

**Всероссийская
научно-техническая конференция**
Пром-Инжиниринг



Челябинск, 2021

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет)»

Пром-Инжиниринг
труды VII Всероссийской научно-технической конференции

17-21 мая 2021 года

Москва-Челябинск-Новочеркасск-Волгоград-Сочи

Челябинск, 2021

Пром-Инжиниринг: труды VII всероссийской научно-технической конференции. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2021. – 296 с.

В научный сборник включены материалы научно-технической конференции, посвященные рассмотрению вопросов динамики машин и рабочих процессов, конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств, особенностей построения наземных транспортно-технологических машин, изучению вопросов трения, смазки и износа машин. Приводятся результаты теоретических исследований и особенности практического применения новых функциональных материалов и технологий. Рассмотрены вопросы инноваций и ресурсосбережения в металлургии. Изложены особенности построения систем и технологий управления, промышленных мехатронных, робототехнических и электроэнергетических систем. Приводятся результаты исследований электрических машин и электроприводов, устройств силовой электроники и возобновляемых источников энергии. Также рассмотрены вопросы моделирования и компьютерных технологий промышленных установок, объектов, процессов, вопросы теории и практики динамических измерений.

Материалы опубликованы в авторской редакции.

Ответственный редактор: профессор, доктор техн. наук А.А. Радионов

ISBN 978-5-696-05263-2

© Авторы, 2021

© Издательский центр ЮУрГУ

ОРГКОМИТЕТ КОФЕРЕНЦИИ

Председатель

Радионов А.А., доктор техн. наук, профессор, Челябинск, Российская Федерация

Программные сопредседатели

Кравченко О.А., доктор техн. наук, доцент, Тула, Российская Федерация

Скворцов А.А., доктор техн. наук, профессор, Москва, Российская Федерация

Навроцкий А.В., доктор химич. наук, профессор, Волгоград, Российская Федерация

Международный программный комитет

Анучин А.С., доктор техн. наук, доцент, Москва, Российская Федерация

Амбарцумянц Р.В., доктор техн. наук, профессор, Одесса, Украина

Андреев С.М., доктор технических наук, доцент, Магнитогорск

Беспалов В.Я., доктор техн. наук, профессор, Москва, Российская Федерация

Бигеев В.А., доктор техн. наук, профессор, Магнитогорск, Российская Федерация

Бочкарев И.В., доктор техн. наук, профессор, Бишкек, Кыргызская Республика

Браславский И.Я., доктор техн. наук, профессор, Екатеринбург, Российская Федерация

Брованов С.В., доктор техн. наук, доцент, Новосибирск, Российская Федерация

Букреев В.Г., доктор технических наук, профессор, Томск, Российская Федерация

Варганов М.В., доктор техн. наук, профессор, Москва, Российская Федерация

Васильев А.С., доктор техн. наук, профессор, Москва, Российская Федерация

Винник Д.А., канд. техн. наук, доцент, Челябинск, Российская Федерация

Ганджа С.А., доктор технических наук, профессор, Челябинск, Российская Федерация

Гасанов Б.Г., доктор техн. наук, профессор, Новочеркасск, Российская Федерация

Гейчук В.Н., доктор техн. наук, доцент, Киев, Украина

Горбатенко Н.И., доктор технических наук, профессор, Новочеркасск, Российская Федерация

Гузев В.И., доктор техн. наук, профессор, Челябинск, Российская Федерация

Гуревич Л.М., доктор техн. наук, профессор, Волгоград, Российская Федерация

Дибров И.А., доктор техн. наук, профессор, Москва, Российская Федерация

Димитров Л.В., Ph. D., профессор, София, Болгария

Добров И.В., доктор техн. наук, профессор, Днепропетровск, Украина

Дорофеев Ю.Г., доктор техн. наук, профессор, Новочеркасск, Российская Федерация

Ершов М.Ю., доктор техн. наук, профессор, Москва, Российская Федерация

Зюзов А.М., доктор техн. наук, доцент, Екатеринбург, Российская Федерация

Исаков В.С., доктор техн. наук, профессор, Новочеркасск, Российская Федерация

Казаринов Л.С., доктор техн. наук, профессор, Челябинск, Российская Федерация

Калашников А.С., доктор техн. наук, профессор, Москва, Российская Федерация

Карандаев А.С., доктор техн. наук, профессор, Магнитогорск, Российская Федерация

Кондаков А.И., доктор техн. наук, профессор, Москва, Российская Федерация

Кравец А.Г., доктор техн. наук, профессор, Волгоград, Российская Федерация

Красновский Б.М., доктор техн. наук, профессор, Москва, Российская Федерация

Липкин М.С., доктор техн. наук, доцент, Новочеркасск, Российская Федерация

Малолетов А.В., доктор физ.-мат. наук, профессор, Волгоград, Российская Федерация

Моргунов Ю.А., доктор техн. наук, профессор, Москва, Российская Федерация

Пинчук В.А., доктор техн. наук, профессор, Луганск, Украина

Пятибратов Г.Я., доктор техн. наук, профессор, Новочеркасск, Российская Федерация

Радев Х., Ph. D., профессор, София, Болгария

Рачков М.Ю., доктор техн. наук, профессор, Москва, Российская Федерация

Рождественский Ю.В., доктор техн. наук, профессор, Челябинск, Российская Федерация

Саушкин Б.П., доктор технических наук, профессор, Москва, Российская Федерация

Сердобинцев Ю.П., доктор техн. наук, профессор, Волгоград, Российская Федерация

Скворцов А.А., доктор физ.-матем. наук, профессор, Москва, Российская Федерация

Спиридонов Е.К., доктор техн. наук, профессор, Челябинск, Российская Федерация

Стефаненко И.В., доктор техн. наук, профессор, Волгоград, Российская Федерация

Сухенко Н.А., доцент, кандидат технических наук, Новочеркасск, Российская Федерация

Труханов А.В., канд. физ.-мат. наук, Минск, Республика Беларусь

Труханов С.В., канд. физ.-мат. наук, Минск, Республика Беларусь

Турченко В.А., канд. физ.-мат. наук, Дубна, Российская Федерация

Харитонов С.А., доктор техн. наук, профессор, Новосибирск, Российская Федерация

Храмшин В.Р., доктор техн. наук, профессор, Магнитогорск, Российская Федерация

Чигиринский Ю.Л., доктор техн., профессор, Волгоград, Российская Федерация

Шляпин А.Д., доктор техн. наук, профессор, Москва, Российская Федерация

Оргкомитет

Гасяров В.Р., канд. техн. наук, доцент, Челябинск, Российская Федерация

Кульмухаметова А.С., канд. техн. наук, доцент, Челябинск, Российская Федерация

Макаров А.М., канд. техн. наук, доцент, Волгоград, Российская Федерация

Маклаков А.С., канд. техн. наук, доцент, Челябинск, Российская Федерация

Сафонов Е.В., канд. техн. наук, доцент, Москва, Российская Федерация

Смолий В.А., канд. техн. наук, доцент, Новочеркасск, Российская Федерация

СОДЕРЖАНИЕ

Вступительное слово председателя оргкомитета конференции.....	9
Машиностроение	
<i>Голованчиков А.Б., Залипаева О.А., Прохоренко Н.А.</i> Моделирование структуры потока при неустановившемся движении воды в трубе.....	10
<i>Шевченко С.В., Муховатый А.А., Кроль О.С.</i> Исследование модифицированной зубчато-ременной передачи обрабатывающего центра.....	16
<i>Балакина Е.В., Сергиенко И.В.</i> Разработка схемы необходимости и достаточности по применению разных видов радиусов автомобильной шины в разных задачах моделирования автомобиля.....	22
<i>Балакина Е.В., Кочетов М.С., Сарбаев Д.С.</i> Оценка влияния наклонной установки колеса на боковую устойчивость автомобиля.....	27
<i>Фурманов Д.В., Лысаков Н.Э., Шамахов Л.М.</i> Исследование динамики рабочего процесса фрезерования асфальтобетона.....	33
<i>Тюремнов И.С., Морев А.С.</i> Моделирование отображения различных режимов колебаний вальца системами непрерывного контроля уплотнения грунта вибрационными катками.....	38
<i>Комшин А.С., Сеница М.О., Тумакова Е.В.</i> Некоторые особенности измерения динамических характеристик объектов тяжелого машиностроения в процессе эксплуатации в условиях Крайнего Севера.....	43
<i>Поздеев А.В., Рябов И.М., Тимошин Н.В.</i> Анализ плавности хода колёсных бесподвесочных машин в различных условиях эксплуатации.....	49
<i>Рябов И.М., Поздеев А.В., Еронтаев В.В.</i> Улучшение эксплуатационных свойств колеса с пневматической шиной за счет внутренней упругодемпфирующей системы.....	56
<i>Устинова Е.С.</i> Моделирование траектории укладки материала на поверхности технологической оправки, задаваемой нерегулярным набором пространственных точек.....	62
<i>Булавин В.Ф., Булавина Т.Г., Яхричев В.В.</i> Проектирование вспомогательного технологического оборудования на эффекте ультразвука.....	68
<i>Морозова К.С., Хаймович И.Н.</i> Разработка алгоритма формирования гладкого профиля пера заготовки компрессорной лопатки в системе автоматизированного проектирования.....	73
<i>Ямников А.С., Богомолов М.Н.</i> Экспериментальное определение минимального осевого натяга комплекта упругих элементов в виброгасящей оправке для закрепления тонкостенных оболочек.....	79
<i>Сафарова Л.Л., Маликов А.А., Ямников А.С.</i> Обоснование рациональных конструкторско-технологических параметров операции хонингования цилиндра дизеля.....	84
<i>Левина Т.А., Сафонов Е.В., То Мань Хунг</i> Анализ методов и средств оценки качества поверхностного слоя изделий, получаемых SLM-методом из жаропрочных сплавов.....	90
<i>Вартанов М.В., Чан Динь Ван, Нгуен Ван Зунг</i> Исследование условий роботизированной сборки профильных валов.....	97
<i>Кузнецов В.А., Аленина И.А., Мочалова Т.С.</i> Оптимизация технологических процессов изготовления и ремонта деталей на основе мощности выполняемых процессов.....	103
Материаловедение и технологии промышленного производства	
<i>Шульгин А.Н., Чуприна О.А., Пыхов В.В.</i> Влияние затупления инструмента на значение осевой составляющей силы резания и процесс сверления.....	109
<i>Нечаев Д.А., Омаров А.Ю., Иванов Н.В.</i> Структура и фазовый состав керамического материала из порошка полученного химическим диспергированием сплава В95.....	113
<i>Ахмедшин Э.Х., Власов Д.Д., Татусь Н.А.</i> Влияние технологии изготовления отверстий на прочность ортогонально-армированных волокнистых композитов....	116
<i>Перфилов В.А.</i> Модифицированные композиционные мелкозернистые бетоны.....	121
<i>Северов П.Б.</i> Механическое поведение слоистого углепластика на участках активного и пассивного деформирования в цикле одноосного растяжения.....	125
<i>Гольцман Б.М., Яценко Л.А., Гольцман Н.С.</i>	

Исследование процессов вспенивания силикатного сырья при использовании смеси порообразователей.....	130
<i>Егорова Ю.Б., Шмырова А.В., Давыденко Л.В.</i>	
Прогнозирование прочностных свойств титановых сплавов от эквивалентов по алюминию и молибдену при температурах эксплуатации.....	136
<i>Логинов Ю.Н., Замараева Ю.В., Комкова Д.А.</i>	
Деформации при угловом прессовании полосы из цилиндрической заготовки.....	141
<i>Типалин С.А., Белоусов В.Б., Шпунькин Н.Ф.</i>	
Исследование неравномерности свойств нержавеющей стали 12Х18Н10Т в зависимости от толщины листа.....	145
<i>Калтин Ю.Г., Типалин С.А., Рябов В.А.</i>	
Аспекты сверхпластичности металлов.....	151
<i>Петрова О.Н., Беликов С.В., Слукин Ю.В.</i>	
Влияние термической обработки на структуру и свойства цементованного слоя лап буровых трехшарошечных долот.	156
<i>Тютрин А.А., Бурдонов А.Е., Бушуев К.С.</i>	
Расширение сферы использования мелкодисперсной пыли печей прокаливания нефтяного кокса алюминиевого производства.....	161
<i>Кучумова И.Д., Батраев И.С.</i>	
Трибологические свойства детонационных покрытий из сплава $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$	166
<i>Морокина Г.С.</i>	
Радиационный контроль объектов малой толщины.....	170
<i>Громов Д.В., Ердаков И.Н., Радионова Л.В., Свистун А.С.</i>	
Компьютерное моделирование в программе QForm валковой формовки профиля из круглой сварной трубы.....	176
<i>Фаизов С.Р., Радионова Л.В.</i>	
Моделирование и прочностной анализ при проектировании оснастки для прямого прессования легкоплавкого припоя.....	180
Энергетика и электротехника	
<i>Колосок И.Н., Коркина Е.С., Тихонов А.В.</i>	
Расстановка РМУ на вставке постоянного тока в задаче оценивания состояния ЭЭС.....	186
<i>Надтока И.И., Звозникова И.А.</i>	
Оценка коррелированности графиков электрической нагрузки по главным компонентам ортогонального разложения.....	191
<i>Янучок А.И., Добрыднев Д.В., Папин В.В.</i>	
Солнечный кондиционер и его эффективность среди существующих решений в сфере кондиционирования.....	196
<i>Папин В.В., Дьяконов Е.М., Шмаков А.С.</i>	
Теплогенератор повышенной эффективности и его экономическая целесообразность.....	202
<i>Безуглов Р.В., Ведмичев Н. А., Дьяконов Е. М.</i>	
Эффективное применение фазового перехода второго рода для преобразования теплоты в электроэнергию на КЭС....	208
<i>Логанчук С.М., Гаврус И.В., Мирошниченко Л.Г.</i>	
Повышение проводимости пленки PEDOT: PSS путем ультрадиспергации и сольватацией органическими соразтворителями.....	214
<i>Безуглов Р.В., Ефимов Н.Н., Филимонов В.Р.</i>	
Утилизация отходов в шлаке котлов тепловых электростанций.....	219
<i>Сысоев А.А., Лазарева Н.В., Проскура А.А.</i>	
Моделирование сложных гидроэнергетических систем для исследований и обучения.....	224
<i>Шестаков А.В.</i>	
Модель рабочих характеристик частотно-управляемого асинхронного двигателя и ее программная реализация.....	230
<i>Сарбаев В., Гармаиш Ю.</i>	
Импульсные преобразователи энергии в системах зажигания, электроснабжения и электрооборудования автомобилей.....	236
<i>Мецерыков В.Н., Пикалов В.В., Бойков А.И.</i>	
Система электронного поджига дуги для электродугового плазматрона.....	240
Системы управления и автоматизации технологических процессов и объектов	
<i>Фархадов З.И., Амирасланов Б.К., Юсифов С.И.</i>	
Система автоматической настройки вибрационно-частотного плотномера на основе нечеткой логики.....	244
<i>Кузора С.С.</i>	
Динамика изменения качества деятельности организаций инновационной инфраструктуры.....	248
<i>Ахмедов М.А., Ахмедова С.М., Магоммедли Х.М.</i>	
Внедрение результатов имитационного моделирования ГПС в реальных производственных системах.....	254
<i>Халилов Э.О.</i>	
Применение двуручных роботов-манипуляторов в гибких технологических процессах.....	258
<i>Орлов С.П., Учайкин Р.А.</i>	
Модели на раскрашенных сетях Петри для управления техническим обслуживанием компьютерного оборудования	

предприятия.....	263
<i>Гапонова Д.А., Родякина Р.В., Щербаков А.В.</i>	
Исследование работы замкнутой системы управления процессом аддитивного формообразования с помощью модели нелинейного теплообмена.....	270
<i>Зрячев С.А., Ларин С.Н.</i>	
Создание системы поддержки принятия решений для послепродажного обслуживания авиационной техники	276
<i>Радионон А.А., Гасиярова О.А., Воронин С.С., Б.М. Логинов</i>	
Совершенствование автоматизированных систем регулирования профиля проката на станах горячей прокатки.....	282
<i>Вялкова С.А., Надтока И.И.</i>	
Анализ погрешности гибридной модели краткосрочного прогнозирования электропотребления г. Москвы.....	291

ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО ПРЕДСЕДАТЕЛЯ ОРГКОМИТЕТА КОНФЕРЕНЦИИ

7-я Всероссийская научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» прошла 17-21 мая 2021 года. Организаторами конференции выступили четыре университета – Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Московский политехнический университет и Волгоградский государственный технический университет. В связи с непростой эпидемиологической ситуацией по коронавирусной инфекции COVID-19 и сложностью с перемещением по территории России и с пересечением границ между странами, конференция проходила в смешанном формате. Участники по своему желанию и по возможности могли выбрать один из трех форматов участия – в традиционном очном формате, дистанционно в формате видеоконференции, дистанционно в формате стендового доклада или в формате краткого on-line сообщения и дальнейшего стендового представления работы. При участии в очном формате и в формате видеоконференции, любой желающий мог дистанционно задать докладчикам вопросы и получить на них устные ответы. В формате стендовых докладов на сайте конференции была сформирована страница, на которой размещались презентация доклада и чат для on-line общения. Все желающие имели возможность посмотреть презентацию доклада и напечатать в чате вопросы, а докладчики могли дать в этом чате свои пояснения. Для участников, выбравших дистанционный формат участия в виде краткого on-line сообщения, также дополнительно была предоставлена возможность обсуждения своей работы с коллегами в индивидуальном чате, созданном на сайте конференции.

Конференция проведена при организационной и информационной поддержке Южно-Уральской группы Сибирской секции Института инженеров электротехники и электроники.

Для участия в конференции программным комитетом было отобрано около 600 докладов. В работе конференции приняли участие ученые и практики из 124 городов, из 18 стран мира. В том числе из России из 86 городов от западной и центральной части до Дальнего Востока. Иностранные участники представляли такие государства, как Азербайджан, Республика Беларусь, Боливия, Вьетнам, Германия, Индия, Ирак, Казахстан, Китай, Ливан, Марокко, Польша, Таджикистан, Турция, Узбекистан, Украина, Южная Корея.

Участники конференции представили свои доклады, отражающие последние достижения в области промышленного инжиниринга, на русском и английском языках. Работа конференции была организована в 24 секциях, включая:

Раздел 1. Машиностроение (секции «Конструирование машин и механизмов», «Динамика машин и рабочих процессов», «Трение, смазка, износ машин», «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», «Транспортно-технологические машины и оборудование», «Механическая обработка материалов», «Промышленные гидравлические и пневматические системы и оборудование», «Зеленые технологии» в машиностроении);

Раздел 2. Материаловедение и технологии промышленного производства (секции «Полимеры, композиты и керамика», «Стали и сплавы, металлургические и металлообрабатывающие технологии», «Химические и гидрометаллургические технологии», «Технологии покрытия и обработка поверхности», «Методы контроля и анализа материалов»);

Раздел 3. Энергетика (секции «Интеллектуальные системы электроснабжения», «Малая распределенная энергетика», «Возобновляемая энергетика», «Качество электрической энергии и электромагнитная совместимость», «Силовая электроника, электрические машины и электроприводы»);

Раздел 4. Системы управления и автоматизации технологических процессов и объектов (секции «Системы и технологии управления», «Промышленные мехатронные системы и робототехника», «Микропроцессорные системы управления», «Датчики и системы технического зрения», «Теория и практика динамических измерений», «Моделирование и компьютерные технологии в промышленности»).

В настоящем сборнике опубликованы доклады, представленные участниками конференции на русском языке.

Без сомнения, общение специалистов в рамках прошедшей конференции способствовало информированию ученых и практиков о наиболее перспективных направлениях исследований и достижениях в области промышленного инжиниринга. Представленные результаты исследований будут способствовать решению приоритетных задач, стоящих на современном этапе развития промышленности, техники и технологий.

Председатель оргкомитета конференции, доктор техн. наук, профессор А.А. Радионов

Моделирование структуры потока при неустановившемся движении воды в трубе

Голованчиков А.Б., Залипаева О.А., Прохоренко Н.А.

Волгоградский технический университет

Волгоград, Российская Федерация

natasha292009@yandex.ru

Аннотация. Приводятся аппроксимирующие степенные уравнения, описывающие неустановившиеся скорости воды в трубе на входном и выходном участках в сравнении с установившимся профилем скорости, то есть с зависимостью скорости от радиуса полученную экспериментально, и с так называемым «законом 1/7», описывающим профиль скорости для турбулентного потока. Предлагается структуру потока моделировать не традиционно по дифференциальным или интегральным кривым отклика, а по профилю скорости, полученному в конкретном сечении трубы и по выведенным формулам определять вышеназванные кривые и функции отклика. Приводятся также результаты расчетов параметров для различных моделей структуры потоков.

Ключевые слова: профиль скорости, установившийся поток, неустановившийся поток, дифференциальная кривая, интегральная кривая, функция отклика, физическое моделирование, математическое моделирование, структура потока.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно формула профиля скорости для установившегося ламинарного потока вязкой жидкости выводится аналитически из дифференциального уравнения Навье-Стокса для одномерного потока и реологического уравнения Ньютоновской жидкости, и имеет вид:

$$v = 2v_s \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где v_s - средняя скорость потока, м/с; r и R - соответственно текущий и внутренний радиус трубы, м.

Эта зависимость хорошо подтверждается экспериментальными данными [1-3]. Сложнее обстоит дело с описанием установившегося профиля скорости при турбулентном режиме течения жидкостей и газов. Экспериментально при $Re > 10^5$ такой профиль скорости описывается «законом 1/7»:

$$v = v_0 \left(1 - \frac{r}{R} \right)^{1/7}, \quad (2)$$

где v_0 - скорость на оси потока, м/с.

Целью работы было:

— определение установившегося и неустановившегося профиля скорости на входе в трубу и на выходе из нее с помощью трубки Пито-Прандтля и моделирование структуры потоков по профилю скорости;

— аппроксимация полученных зависимостей степенным уравнением, аналогичному «закону 1/7» для турбулентного потока;

— расчет дифференциальных и интегральных кривых отклика по профилю скорости;

— моделирование структуры потока типовыми моделями: диффузионной или комбинированной.

НАУЧНАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Данная тема является актуальной, так как используется в химической, нефтегазовой, нефтедобывающей, нефтеперерабатывающей, а также энергетической отрасли промышленности, которая активно развивается в России.

Разработка новых технических комплексов на основании полученных экспериментальных данных, поможет модернизировать уже имеющиеся промышленные образцы, которые будут иметь более высокую производительность и энергоэффективность. Одной из главных целей развития промышленности является ресурсо- и энергосбережение, сокращение потерь на всех стадиях технологического процесса при подготовке запасов, добыче, транспорте и переработке. Энергоемкость ВВП России превышает среднемировой показатель в 2,3 раза, а по странам ЕС – в 3,1 раза. Существующий потенциал энергосбережения России составляет от 360 до 430 млн. т. условного топлива или 39-47% текущего потребления энергии. Почти треть часть его сосредоточена в топливно-энергетических отраслях (в том числе четверть – в электроэнергетике и теплоснабжении), еще 35-37% в промышленности и 25-27% в жилищно-коммунальном хозяйстве [4-11].

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Исходные и справочные данные, при которых проводились экспериментальные исследования, приведены в таблице 1 [12-20]. Здесь же в нижней части таблицы 1 приведены результаты расчетов, а графически полученные профили скорости на рис. 1.

Таблица 1

Исходные справочные данные и расчетные параметры

Наименование параметра	Размерность	Обозначения	Величина
<i>Исходные данные</i>			
Радиус трубы	м	R	0,05
Длина трубы	м	L	4
Расстояние от входа в трубу, где измеряется профиль скорости неустановившегося потока	м	l_n	0,4
Расстояние на выходе из трубы	м	l_k	0,4
Расстояние от входа в трубу, где измеряется профиль скорости установившегося потока	м	l_y	2
Температура	°C	t	22
Давление	ат	p_a	1,030
Расход воды	м ³ /час	q_v	$9,1 \cdot 10^{-3}$

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90002

Наименование параметра	Размерность	Обозначения	Величина
Диаметр входного и выходного патрубков	м	d_0	0,025
Справочные данные			
Плотность воды	кг/м ³	ρ	1000
Динамическая вязкость воды	Па·с	μ	0,001
Расчетные параметры			
Средняя скорость воды	м/с	v_s	1,100
Число Рейнольдса	-	Re	$1,1 \cdot 10^5$
Скорость на оси потока:			
а) для «закона 1/7»	м/с	v_0	1,426
б) для установившегося течения	м/с	v_{0y}	1,384
в) для неустановившегося движения на входе	м/с	$v_{0н}$	1,497
г) для неустановившегося движения на выходе	м/с	$v_{0к}$	1,553
Показатель степени в степенном уравнении (3):			
а) для «закона 1/7»	-	p	0,143
б) для установившегося течения	-	p_y	0,120
в) для неустановившегося движения на входе	-	p_n	0,180
г) для неустановившегося движения на выходе	-	p_k	0,210
Безразмерное расчетное время запаздывания входного импульсного сигнала или скорости потока на оси трубы:			
а) для «закона 1/7»	-	θ_0	0,813
б) для установившегося течения	-	θ_{0y}	0,838
в) для неустановившегося движения на входе	-	$\theta_{0н}$	0,774
г) для неустановившегося движения на выходе	-	$\theta_{0к}$	0,746

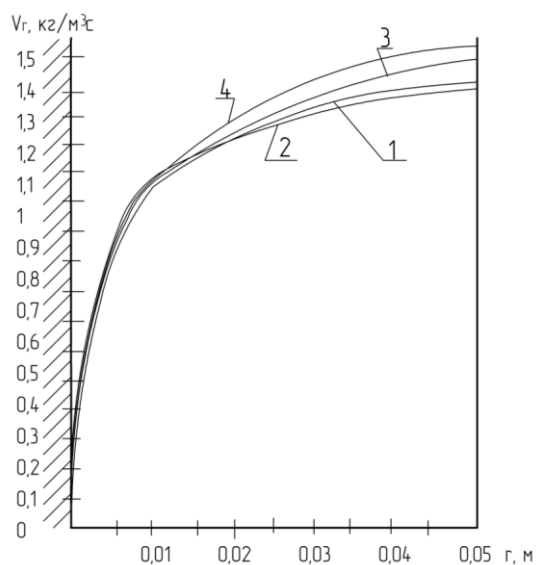


Рис. 1. Профили скорости: 1 – описываемая уравнением (2) ($v_0=1,42$ м/с, $p=0,143$);

2 – в середине трубы ($v_0=1,384$ м/с, $p=0,112$);

3 – на входе ($v_0=1,497$ м/с, $p=0,18$);

4 – на выходе ($v_0=1,55$, $p=0,21$)

Полученные экспериментальные зависимости $v = v(r)$ для участка трубы:

- на входе, когда: $l_n/L=0,1$ и $l_n/D=4$,

где $D=2R$ - внутренний диаметр трубы;

- на выходе, когда: $l_k/L=0,1$ и $l_k/D=4$,

- в середине длины трубы, где предполагается установившийся турбулентный поток воды, когда:

$$l_y/L=0,5 \text{ и } l_y/D=20,$$

были обработаны методом корреляционного анализа, подтвердившего воспроизводимость экспериментальных данных в трех параллельных опытах по критерию Кохрена (наибольшее отклонение от среднего значения локальной скорости составляло [18%], а среднее [8,7%], адекватность аппроксимирующих степенных уравнений):

$$v = v_0(1 - r/R)^p, \quad (3)$$

где p - показатель степени в степенном уравнении, по критерию Фишера в линеаризованном виде:

$$\ln v = \ln v_0 + p(1 - r/R), \quad (4)$$

с наибольшими отклонениями теоретических значений от средних в эксперименте [14,7%], а средних [7,9%], значимость обоих коэффициентов по критерию Стьюдента и высоким коэффициентом корреляции, изменяющимся в пределах 0,968-0,979 [4].

Значения рассчитанных коэффициентов v_0 и p приведены в таблице 1, а сами профили скорости для трех режимов течения: неустановившихся на входе и выходе и установившегося в середине трубы представлены на рис. 1.

Как видно из графиков рис. 1 даже в середине трубы (кривая) при $Re \approx 10^5$ известное уравнение для турбулентного потока не выполняется. Расхождения в показателе p составляет:

$$\delta_y = \frac{0,120 - 0,143}{0,143} \cdot 100 = -16\%.$$

Зато для неустановившихся турбулентных потоков воды на входе и выходе эти относительные отклонения в показателе p являются положительными и составляют для входного участка:

$$\delta_n = \frac{0,18 - 0,143}{0,143} \cdot 100 = 25,8\%.$$

Для участка на выходе:

$$\delta_r = \frac{0,21 - 0,143}{0,143} \cdot 100 = 46,8\%.$$

Если проводить сравнение показателей степени неустановившихся потоков с показателем степени в середине трубы, то эти отклонения составляют:

$$\text{для входа: } \Delta_n = \frac{0,18 - 0,12}{0,12} \cdot 100 = 50\% ,$$

$$\text{для выхода: } \Delta_k = \frac{0,21 - 0,12}{0,12} \cdot 100 = 75\% .$$

Относительные отклонения по максимальной скорости на оси потока менее значительны, чем для показателей степени p :

а) приведенные к средней скорости «закона 1/7»:

$$\delta v_y = \frac{1,384 - 1,426}{1,426} \cdot 100 = -2,9\% ,$$

$$\delta v_n = \frac{1,497 - 1,426}{1,426} \cdot 100 = 5\% ,$$

$$\delta v_k = \frac{1,553 - 1,426}{1,426} \cdot 100 = 8,9\% ,$$

б) приведенные к скорости в середине трубы:

$$\Delta v_u = \frac{1,497 - 1,384}{1,384} \cdot 100 = 3,1\%,$$

$$\Delta v_k = \frac{1,553 - 1,384}{1,384} \cdot 100 = 12,2\%.$$

Большие отклонения по показателю p и осевой скорости v_0 в профилях скорости для неустановившегося потока на выходе по сравнению с неустановившемся потоком на входе, на наш взгляд, объясняется уменьшением (по закону Бернулли) статического давления перед попаданием потока из большой трубы в выходной патрубок. Поток заранее втягивается в область пониженного давления, где его скорость возрастает. Наоборот, на входе рост статического давления при выходе из небольшого по сечению патрубка $d_6=25$ мм в трубу, большего диаметра $D=2R=100$ мм, заставляет тормозить входной поток и быстрее приводит его к установившемуся течению.

Структуру полученных турбулентных потоков воды при установившемся и неустановившемся течении в трубе можно моделировать по полученным профилям скорости, не прибегая к традиционному методу снятия кривых отклика на стандартные входные сигналы: импульсный или ступенчатый [5-8].

Так как относительный расход потока:

$$\frac{dq}{qv} = Cd\theta.$$

где C – дифференциальная кривая отклика на входной импульсный сигнал; $\theta = \frac{\tau}{\tau_{cp}} = \frac{v_s}{v}$ – безразмерное нормированное время; τ – текущее время, с; τ_{cp} – среднее время пребывания, с; q_v – общий расход, м³/с.

С другой стороны исходя из дифференциального уравнения неразрывности:

$$\frac{dq}{qv} = \frac{2\pi r v dr}{\pi R^2 v_s} \quad (6)$$

$$\text{Так как: } d\theta = \frac{d\tau}{\tau_{cp}} \text{ или } d\theta = d\left(\frac{l/v}{l/v_s}\right) = -\frac{v_s}{v^2} dv, \quad (7)$$

то, приравняв правые части уравнений (5) и (6) с учетом (7), получаем формулу для расчета дифференциальной кривой отклика:

$$C = -\frac{2rv^3}{R^2 v_s^2 (dv/dr)}. \quad (8)$$

Знак «минус» учитывает что градиент (dv/dr) – отрицательный.

Для интегральной кривой [5-8]:

$$F = \int_0^\theta Cd\theta,$$

или с учетом дифференциальных уравнений (5) и (6) получаем формулу для расчета интегральной кривой отклика:

$$F = \frac{2}{R^2 v_s^2} \int_0^r r v dr. \quad (9)$$

Таким образом, формулы (8) и (9) позволяют рассчитать дифференциальные и интегральные кривые отклика безиндикаторным методом по профилю скорости.

Для степенных функций (3) градиент скорости:

$$\frac{dv}{dr} = -\frac{v_0 p}{R} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{p-1}.$$

Подставляя это значение градиента в уравнение (8) получаем аналитическую формулу для С-функции отклика:

$$C = \left(\frac{2}{p}\right) \left(\frac{v^3}{v_s^3 v_0}\right) \left(\frac{r}{R}\right) \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{p-1}. \quad (10)$$

Из уравнения (3) следует:

$$\frac{\theta_0}{\theta} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^p \text{ и } \left(1 - \frac{r}{R}\right)^p = \left(\frac{\theta_0}{\theta}\right)^{\frac{1}{p}}.$$

Тогда:

$$\left(\frac{r}{R}\right) = 1 - \left(\frac{\theta_0}{\theta}\right)^{\frac{1}{p}},$$

$$\text{и } \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{p-1} = \left[1 - \left(\frac{\theta_0}{\theta}\right)^{\frac{1}{p}}\right]^{p-1}.$$

Подставляя полученные значения $\left(\frac{r}{R}\right)$ и $\left(1 - \frac{r}{R}\right)^{p-1}$,

выраженные через безразмерное время в уравнение (10), получаем:

$$C = \frac{\frac{2}{p} \left(\frac{\theta_0}{\theta}\right)^{\frac{1}{p}} \left[1 - \left(\frac{\theta_0}{\theta}\right)^{\frac{1}{p}}\right]}{\theta^2}, \quad (11)$$

где $\theta_0 = \frac{v_s}{v_0}$ – время запаздывания.

Для «закона 1/7»:

$$C = 14 \frac{\theta_0^7}{\theta^9} \left[1 - \left(\frac{\theta_0}{\theta}\right)^7\right],$$

что совпадает с известной формулой С-функции отклика для турбулентного потока.

Расчитанные по уравнению (11) С-кривые отклика для установившегося и неустановившегося потока, представлены на рис. 2. Здесь же для сравнения представлены графики модельных С-функций отклика для однопараметрической диффузионной модели и комбинированной модели с последовательным соединением зон идеального вытеснения и смешения.

Дифференциальная С-функция отклика однопараметрической диффузионной модели имеет вид [5]:

$$C = 0,5 \sqrt{\frac{Pe}{\pi}} \exp[-0,25 \cdot Pe(1 - \theta)^2], \quad (12)$$

а комбинированной модели с последовательным соединением зон идеального вытеснения и смешения [8]:

$$C = \frac{1}{1 - \theta_0} \exp\left[-\frac{\theta - \theta_0}{1 - \theta_0}\right], \quad (13)$$

где Pe – число Пекле продольной диффузии, θ_0 – численно равно доли вытеснения (безразмерное время запаздывания).

Особенностью расчетов по уравнению (12) является определение числа Pe для времени $\theta = 1$, то есть соответствующего безразмерному времени пребывания, при котором $C_{\theta=1} = C_{max}$. В этом случае можно совместить максимумы на экспериментальной кривой отклика, рассчитанной по уравнениям (8) или (11) с расчетами по формуле (12). Тогда:

$$C_{\max} = 0,5 \sqrt{\frac{Pe}{\pi}}, \quad (14)$$

и $Pe = 4\pi \cdot C_{\max}^2$.

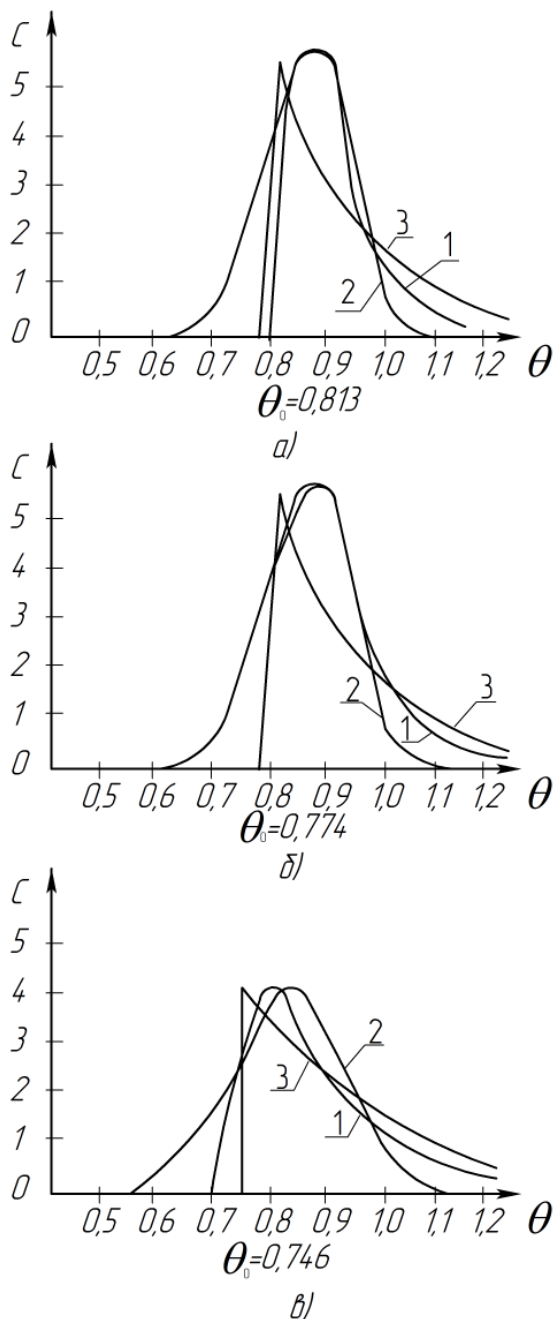


Рис. 2. Дифференциальные С-кривые отклика:

- 1 – рассчитанные по профилю скорости;
- 2 – для диффузионной модели $Pe=213,4$;
- 3 – для комбинированной модели последовательного соединения при $\theta_0 = 0,714$ зон идеального вытеснения и смешения;
- а) для установившегося потока $Pe=429,8$; $\theta_0=0,813$;
- б) для неустановившегося потока на входе $Pe=366,2$; $\theta_0=0,774$;
- в) для неустановившегося потока на выходе $Pe=213,4$; $\theta_0=0,746$

Для комбинированной модели с последовательным соединением зон вытеснения и смешения, подставляя безразмерное время запаздывания θ_0 из экспериментальной зависимости [формулы (8) или (11)] в формулу (13) получаем совмещение дифференциальных кривых с кривыми на входе. Но здесь возможно значительное расхождение по наибольшей высоте расчетной и модельной кривой отклика и их несовпадение по безразмерному времени θ_{\max} (рис. 2).

Для рассматриваемой комбинированной модели можно уравнивать наибольшие значения C_{\max} в расчетной экспериментальной зависимости [формулы (8) или (11)] и модели. Тогда, время запаздывания совпадать не будет (рис. 2.в). В последнем случае из формулы (13) следует:

$$\theta_0 = 1 - \frac{1}{C_{\max}}. \quad (15)$$

На рис. 3 представлены графики интегральных F – кривых отклика (9), полученных экспериментальных зависимостей профилей скорости от радиуса, но они различаются мало и не настолько информативны как выше рассмотренные С-функции и кривые отклика.

Традиционный метод расчета параметров ячеечной и диффузионной модели по дисперсии кривых отклика профиля скорости невозможен, так как дисперсия [5-8]:

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} C \theta^2 d\theta - 1 \rightarrow \infty.$$

Например, для ламинарного потока:

$$C = \frac{1}{2\theta^2}, \theta \geq 0,5, \quad \sigma^2 = \int_{0,5}^{\infty} \frac{1}{2\theta} d\theta = \frac{1}{2} \ln \theta \Big|_{0,5}^{\infty} \rightarrow \infty.$$

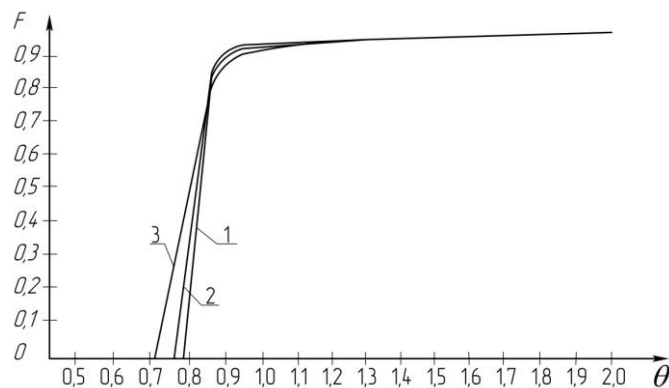


Рис. 3. Интегральные F – функции отклика рассчитанные по формуле профилю скорости (9):

- 1 – для установившегося потока;
- 2 – для неустановившегося входного потока;
- 3 – для неустановившегося на выходе потока

Выводы

Таким образом, описания профиля скоростей для установившегося и неустановившегося турбулентных потоков воды в трубе, степенными уравнениями (3) и определение по ним интегральных и дифференциальных кривых отклика без использования традиционного индикаторного метода входных возмущений, а с помощью уравнений детерминированного класса (8) и (9) или (11) позволяют моделировать структуру потоков по диффузионной моде-

ли (12) или комбинированной модели с последовательным соединением зон идеального вытеснения и смешения (13), совмещающая с повышенной точностью форму расчетных и модельных кривых отклика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романков П.Г. Гидродинамические процессы химической технологии / П.Г. Роменков, М.И. Курочкина. – Л.: Химия, 1974. – 288 с.
2. Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. – 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Альянс, 2013. – 576 с.
3. Романков П.Г. Руководство к практическим занятиям в лаборатории процессов и аппаратаов химической технологии / Под редакцией П.Г. Романкова. – Л.: Химия, 1975. – 255 с.
4. Бондарь А.Г. Планирование эксперимента в химии и химической технологии / А.Г. Бондарь, Г.А. Статюха. – Киев: Высшая школа, 1976. – 183 с.
5. Левеншпиль О. Инженерное оформление химических процессов / О. Левеншпиль; под ред. М. Г. Слинко. – М.: Химия, 1969. – 624 с.
6. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии / В.В. Кафаров. – М.: Химия, 1968. – 379 с.
7. Закгейм А.Ю. Введение в моделирование химико-технологических процессов / А.Ю. Закгейм. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1982. – (серия «Химическая кибернетика»). – 288 с.
8. Тябин Н.В. Методы кибернетики в реологии и химической технологии: учебное пособие / Н.В. Тябин, А.Б. Голованчиков. – Волгоград: Изд-во «Волгоградская правда», 1983. – 103 с.
9. Багатуров С.А. Основы теории и расчета перегонки и ректификации / Под редакцией С.А. Багатурова. – 3-е изд., перераб. – М.: Химия. – 1974.
10. Плановский А.Н. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. Учебник для вузов / А.Н. Плановский, П.И. Николаев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия. – 1987.
11. Рамм В.М. Абсорбция газов / В.М. Рамм. – Изд. 2-е, переработ. и доп. – М.: Химия. – 1976.
12. Тимонин А.С. Основы расчета и конструирования химико-технологического и природоохранного оборудо-

вания: Справочник / А.С. Тимонин. – Т. 2. – 2-е изд. – Калуга: Издательство Н. Бочкаревой. – 2002.

13. Дытнерский Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию / под ред. Ю. И. Дытнерского. – 4-е изд., стер. – М.: Альянс, 2008.
14. Голованчиков А.Б. Алгоритм расчёта насадочной ректификационной колонны с учётом продольного перемешивания по жидкой фазе / А.Б. Голованчиков, Н.А. Прохоренко, В.Н. Карев // Известия ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – № 3 (182). – С. 14-17.
15. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии: учебник / В.В. Кафаров. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1985.
16. Левеншпиль О. Инженерное оформление химических процессов / О. Левеншпиль. – Изд: Химия, 1969.
17. Зайлалова В.Р. Учебное пособие по курсу «Химия нефти и газа» / В.Р. Зайлалова. – Уфа: Изд. УГНТУ, 2014.
18. Голованчиков А.Б. Аппроксимация табличных зависимостей по равновесию бинарных смесей степенным уравнением / А.Б. Голованчиков, А.А. Решетова, А.С. Остроухова, Е.Г. Фетисова // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии. – 2011. – Выпуск 4, №1(74). – С. 37-39.
19. Голованчиков А.Б. Повышение точности при аппроксимации табличных зависимостей по равновесию бинарных смесей / А.Б. Голованчиков, Е.В. Васильева, А.С. Остроухова, А.А. Решетников // Серия «Актуальные проблемы управления вычислительной техники и информатики в технических системах. – 2011. – Выпуск 12, №11 (84). – С. 9-12.
20. Голованчиков А.Б. Моделирование материального баланса с учётом продольной диффузии в ректификационной колонне / А.Б. Голованчиков, Н.А. Прохоренко // Известия ВолгГТУ. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. – Волгоград, 2018. – № 5 (215). – С. 18-21.

Modeling the Structure of the Flow with Unsteady Movement of Water in the Pipe

Golovanchikov A.B., Zalipaeva O.A., Prokhorenko N.A.

Volgograd Technical University

Volgograd, Russian Federation

natasha292009@yandex.ru

Abstract. Approximating power equations are presented that describe the unsteady water velocities in the pipe at the inlet and outlet sections in comparison with the steady-state velocity profile, that is, with the dependence of the velocity on the radius obtained experimentally, and with the so-called “1/7 law” describing the velocity profile for turbulent flow. It is proposed that the flow structure be modeled not traditionally by differential or integral response curves, but by the velocity profile obtained in a

particular pipe section and from the derived formulas to determine the above curves and response functions. The results of parameter calculations for various flow structure models are also presented.

Keywords: velocity profile, steady and unsteady flow, differential and integral response curves, physical and mathematical modeling, flow structure.

Исследование модифицированной зубчато-ременной передачи обрабатывающего центра

Шевченко С.В., Муховатый А.А.

Луганский государственный университет им. В. Даля
Луганск, Украина

Кроль О.С.

Восточноукраинский национальный университет
им. В. Даля
Северодонецк, Украина
krolos.snu.edu@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрен привод главного движения обрабатывающего центра с модифицированной зубчато-ременной передачей. Построена трехмерная модель привода в среде интегрированной САПР КОМПАС-3D. Показана эффективность применения специализированного приложения «Валы и механические передачи-3D» в процессе построения трехмерных моделей механических передач. Предложена процедура параметрического моделирования элементов зубчато-ременных передач в САПР APM WinMachine, предназначенная для проектирования как стандартных вариантов, так и модифицированных. В статье изложены результаты исследования конструктивной модификации зубчато-ременной передачи – с выпуклыми в продольном направлении зубьями ремня. Получены основные параметры зубьев модифицированной конструкции, которые показали ее преимущество перед стандартными зубчатыми ремнями по нагрузочной способности. Отмечена возможность самоустановки предложенных вариантов ремней с криволинейной формой рабочих поверхностей зубьев.

Ключевые слова: зубчатый ремень, выпуклая/вогнутая поверхность ремня, площадь основания зуба, параметры зубьев, самоустановка ремня.

ВВЕДЕНИЕ

В структуре широкоуниверсальных станков с ЧПУ и станочных комплексах часто применяются приводы главного движения с двигателем постоянного тока серии 2П с двузонным регулированием. Для ряда технологических операций, выполняемых на станках, диапазон регулирования необходимо увеличивать, что осуществляется вводом дополнительной коробки скоростей и ременной передачи [1-3]. Широкое применение для этих станочных компоновок зубчатых ременных передач ТВГ, связано с возможностью сохранения передаточного отношения при изменении внешней нагрузки и достаточно высокий КПД. Работоспособность ТВГ определяются через основной критерий – тяговой способности ремня, которую оценивают допустимой приведенной удельной силой, передаваемой 1 мм ширины ремня [4-6].

Имеется ряд работ, посвященных совершенствованию конструкции и эксплуатационных характеристик, направленному на повышение тяговой способности и надежности функционирования привода с ТВГ.

В патенте [7] предлагается новая конструкция ТВГ, зубья ремня которой имеют выпуклый профиль, а канавки шкива - вогнутой формы. Высота зубьев ремня превышает глубину канавки шкива. К недостаткам такого патентного решения можно отнести повышенную деформацию зубьев ремня и, наличие фланцев на торцевых поверхностях шкивов, что приводит к значительным потерям мощности

на трение. Нельзя сбрасывать со счетов и дополнительные расходы на технологию изготовления профиля зуба.

В работе [8] проведено исследование процесса увеличения шага зубчатого ремня и изменение его длины, которое происходит во время работы и сохраняется после разгрузки ремня. Доказано, что максимально величина передаваемой мощности зависит от формы, а наименьше от сил трения в зоне контакта. Основным механизмом этого явления, по мнению авторов является пластическая деформация ленты (около 70%). В работе [8] проведен анализ фактора, связанного с качением по боковой поверхности ремня. В качестве основных движений зубчатого ремня рассматривается удар, скольжение и качение в рамках трибомеханических систем. Представляет интерес явление качения при линейном контакте зуба ремня и боковой поверхности зуба шкива. Во время зацепления возникает натяг, когда зуб ремня врезается в боковую поверхность зуба шкива. В отличие от зубчатой передачи, это явление приводит к резкому увеличению деформации ремня, но с одновременным увеличением поверхности контакта ремня со шкивом [8]. Авторы указывают на важность учета силы трения по сторонам ремня и шкива. Дополнительно к этому, силы трения на поверхностях фланцев ремня также могут изменять шаг ремня. В совокупности эти процессы приводят к нарушению работы зубчатого ремня, что выражается в изменении распределения нагрузки, снижении грузоподъемности и неравномерной работе. Возникает необходимость в дополнительном натяжении ремня, что напрямую влияет на долговечность передачи.. Отмечено в работе [9], что сила натяжения ремня имеет постоянную составляющую (сила первоначального натяжения) и периодическую, вызванную контактами зубьев ремня и шкива в процессе передачи крутящего момента. Причем изменение последней составляющей может повлечь попадание рабочего состояния в область неустойчивости

Модификация конструкции ремня дает эффект в процессе нормативного срока эксплуатации. Состояние элементов ТВГ и их основных механических характеристик необходимо контролировать в оперативном режиме. В этом плане перспективным является механизм измерения толщины ремня (конвейерной ленты) и оценки изменения его поперечного и продольного профиля. [10]. Оценка состояния работоспособности осуществляется вдоль оси ремня, а контроль реализуется специализированным приложением DiagBeltSonic. Такая информация о поперечном сечении ремня по всей длине, а также его продольном и поперечном профилях является

обратной связью для проектировщика механических передач, и как следствие способствует принятию рациональных проектных решений, направленных на повышение надежности ТВГ. Наряду с геометрическими характеристиками важно оценивать уровень нагрузок, возникающих в ременной передаче. В работе [11] разработаны алгоритмы расчета сил возникающих в передаче с учетом параметров ремня и конструктивных характеристик элементов ТВГ. Для этих целей авторы разработали специализированную информационную систему сбора комплексных данных (технических и эксплуатационных). Обработка статистических данных позволяет дать достоверную оценку состояния элементов передачи и используется для проведения имитационных расчетов.

Еще один аспект влияния tension layer на механические свойства зубчатых ремней рассмотрено в работе [12]. Проведен анализ материалов, типа волокон, количества волокон несущего слоя на механические характеристики элементов зубчатых передач. Проводимое исследование касалось зубчатых ремней трапецевидной формы T10 и AT10. Отмечено, что помимо состава резиновой смеси, важным аспектом является так называемая механическая стабилизация и ориентация конструкции, что снижает потери энергии, вызванные внутренним трением и увеличивает механическую прочность материала ремня на натяжение и растяжение (tension and untension).

Анализ вышерассмотренных работ показал важность исследований, связанных с поиском модифицированных конструкций элементов ременной передачи с учетом правильной ориентации их в рабочем пространстве станка.

Постановка задачи. Усовершенствование конструкции зубчато-ременной передачи привода станка за счет поиска рациональной геометрии зубьев ремня и соответствующей геометрии шкивов, в результате чего ожидается увеличение тяговой способности передачи.

ТРЕХМЕРНОЕ И ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗУБЧАТО-РЕМЕННОЙ ПЕРЕДАЧИ СТАНКА

Характерным представителем станков с ЧПУ с расширенным диапазоном регулирования является обрабатывающий центр модели МЦ200ПФ4В. Данный станок имеет порталную компоновку с продольно подвижными крестовыми салазками, по которым поперечно перемещается порталная стойка, несущая вертикально-подвижную шпиндельную бабку [13-15]. Крутящий момент от двигателя к входному валу коробки скоростей передается на входной вал с помощью ТВГ, характеризующейся модулем $m = 4 \text{ mm}$ и передаточным числом $u = 1.4$. В данной работе разработана трехмерная модель привода главного движения с зубчато-ременной передачей (рис. 1) в среде интегрированной САПР КОМПАС-3D. Модели механических передач и валов привода созданы в специализированном приложении «Валы и механические передачи-3D» [16-18]. В отдельном разделе приложения выполнен проектный расчет ЗРП и построены твердотельные модели ведущего и ведомого шкивов.

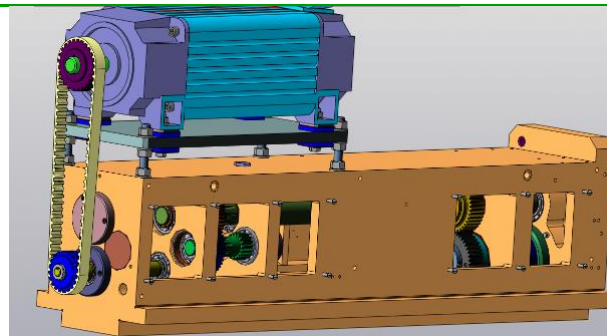


Fig. 1. 3D модель привода главного движения станка МЦ200ПФ4

Большая номенклатура металлорежущего оборудования предопределяет разнообразие типов и конструкций ременных передач. Это приводит к увеличению временных затрат на проектирование работоспособных вариантов передач. Одним из способов повысить производительность процесса проектирования является использование механизма параметризации. Эффективным в плане построения параметрических моделей механических передач является CAD/CAE APM WinMachine [19-21], которая совместима с системой САПР КОМПАС-3D. Полученные параметрические модели передач позволяют рационализировать процесс конструирования в 2D-редакторе и моделирования в 3D-редакторе системы. В процессе параметризации используется синтаксис модуля APM Graph [22, 23]. На рис.2 представлено окно переменных (рис.2, а), в котором осуществляется ввод исходных и производных переменных, а также логические выражения для построения в окне команд параметрической модели ремня и шкивов ЗРП. Разработанная программа ориентирована как на классические конструкции зубчато-ременной передачи, так и на модифицированные варианты (рис. 2, в). Для этого используется опция «Условие выполнения команды» в окне команд модуля APM Graph. На рис. 2, б представлен чертеж конструкции ЗРП, выполненный на базе построенной параметрической модели.

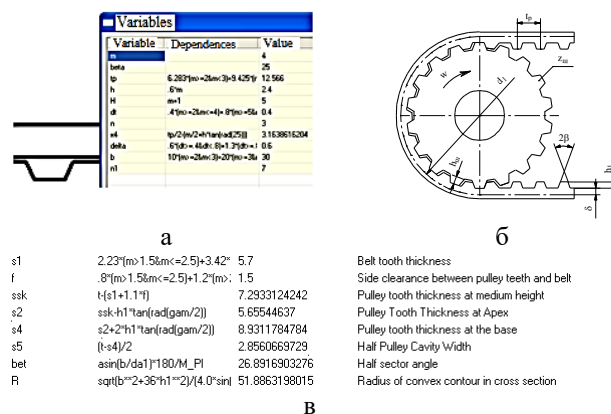


Fig. 2. Параметрическое моделирование шкива

МОДИФИКАЦИЯ ЗУБЧАТО-РЕМЕННОЙ ПЕРЕДАЧИ

Для совершенствования технико-экономических характеристик ЗРП и, в первую очередь, повышение нагрузочной способности и уменьшение трения боковых сторон ремня по ребрам в данной статье

рассматриваются две новые конструктивные разновидности зубчато-ременной передачи [24 Патент].

Поставленная задача достигается тем, что в зубчато-ременной передаче меняется форма боковых сторон зубов в продольном направлении. Исследование направлено на поиске возможностей увеличить длину контакта ремня и шкива за счет использования выпуклой формы, очерченные дугой окружности радиусом и центральным углом.

Предлагается два варианта модифицированной конструкции ЗРП.

1) Зубья ремня выпуклые – вариант 1).

В данном конструктивном исполнении зубчато-ременной передачи выпуклые в продольном направлении боковые стороны зубьев ремня контактируют с вогнутыми в этом же направлении сторонами зубьев шкивов. На рис. 3 представлен фрагмент разработанной 3D модели ЗРП модифицированной конструкции вариант 1):

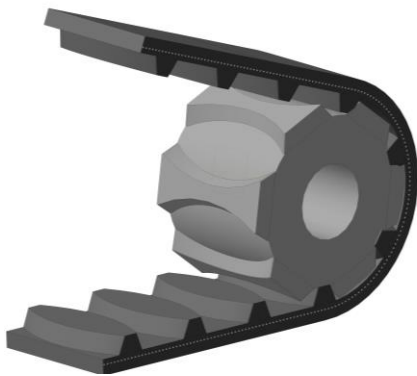


Рис. 3. Модифицированная ременная передача с выпуклыми зубьями

Заданные параметры передачи (рис. 4): ширина ремня b , модуль m , шаг $P = \pi m$ и высота зубьев h , угол между боковыми сторонами зубьев $\gamma = 40^\circ$. Численные значения указанных параметров определяются по известным зависимостям из [1 ОСТ]. Параметр также S считаем заданной величиной и принимаем $S = 0.75P$.

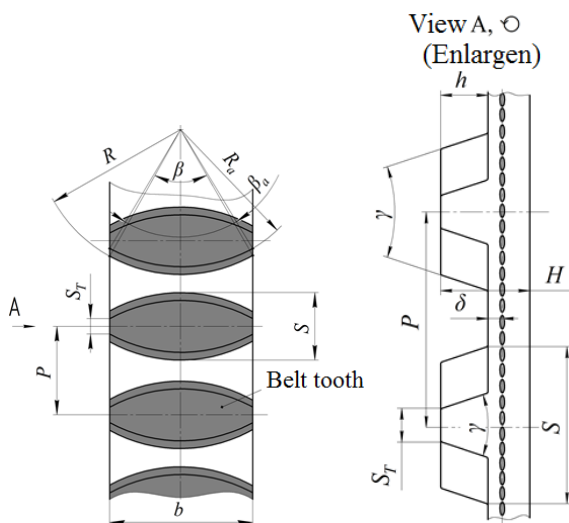


Fig. 4. Модифицированная передача с выпуклыми зубьями: а – параметры; б – cross section

Для идентификации формы определим три параметра (рис. 4): радиус дуги окружности выпуклого зуба R , центральный угол β и ширину вершины зубьев ремня на его торце S_T .

Из рис. 4а, вытекают два очевидных соотношения:

$$\begin{cases} \sin(\beta/2) = 0.5 \cdot b / R; \\ \cos(\beta/2) = \sqrt{R^2 - 0.25 \cdot b^2} / R. \end{cases}$$

Решая совместно эти уравнения, находим значения двух неизвестных параметров зубьев ремня: $R = b$; $\beta = 60^\circ$. После несложных геометрических построений определяется третий искомый параметр зубьев ремня – ширина их вершин на торцах ремня S_T :

$$S_T = 0.75 \cdot P - 2 \cdot [R - R_a \cdot \cos(\beta_a/2)],$$

где

$$R_a = R - h \cdot \operatorname{tg}(\gamma/2); \beta_a = 2 \cdot \arcsin\{0.5b/[R - h \cdot \operatorname{tg}(\gamma/2)]\}.$$

Выпуклая в продольном направлении форма зуба ремня удлиняет его боковую поверхность до величины $L = R \cdot \beta = b \cdot 60 \cdot \pi / 180 = b \cdot \pi / 3$. Это приведет к увеличению общей площади боковых поверхностей зубьев ремня на дуге обхвата меньшего шкива минимум в $(\pi/3) \cdot z_{1\min}$ раз, где $z_{1\min} = 3 \div 4$ – минимальное число зубьев ремня на этой дуге, что соответствует самому неблагоприятному сочетанию параметров передачи, когда их значения имеют предельно допустимые величины: $a = a_{\min}$, $d_1 = d_{1\min}$, $u = u_{\max}$. При этом, прирост площади боковых поверхностей каждого выпуклого зуба в сравнении с прямыми зубьями из [1], при прочих равных условиях, составляет $\sim 5\%$. Это, в свою очередь, будет снижать удельное давление на зубьях и, как следствие, повысит нагрузочную способность зубчато-ременной передачи при неизменных ее габаритах.

Кроме того, выпуклая продольная формы зубьев ремня увеличивает площадь основания зубьев A_1 , что повышает их сопротивляемость напряжению среза. Величина A_1 определяется равенством:

$$A_1 = b^2 \cdot (\beta - \sin \beta) + b \cdot \{0.75 \cdot P - 2 \cdot b \cdot [1 - \cos(\beta/2)]\}.$$

Площадь основания стандартных прямых зубьев A_0 ,

$$A_0 = 0.5 \cdot P \cdot b = 0.5 \cdot \pi \cdot m \cdot b,$$

что существенно меньше площади A_1 . Например, для зубчато-ременной передачи с параметрами: $m = 5 \text{ mm}$, $b = 25 \text{ mm}$, $\beta = 60^\circ$, численные значения A_1 и A_0 составят:

$$A_1 = 25^2 \cdot [\pi/3 - \sin(\pi/3)] + 25 \times \{0.75 \cdot 15.7 - 2 \cdot 25 \cdot [1 - \cos(\pi/6)]\} \approx 240 \text{ mm}^2; A_0 \approx 196 \text{ mm}^2.$$

То есть, площадь A_1 превышает значение A_0 на 22%, что показывает потенциальное превосходство выпуклых зубьев перед прямыми зубьями по сопротивляемости срезу.

Наконец, еще одно преимущество ремней с модифицированными зубьями – способность самоустанавливаться на шкивах, что невозможно у стандартных зубчатых ремней [1] ввиду прямолинейной формы их зубьев в продольном направлении.

II) Зубья ремня вогнутые, рис. 5.

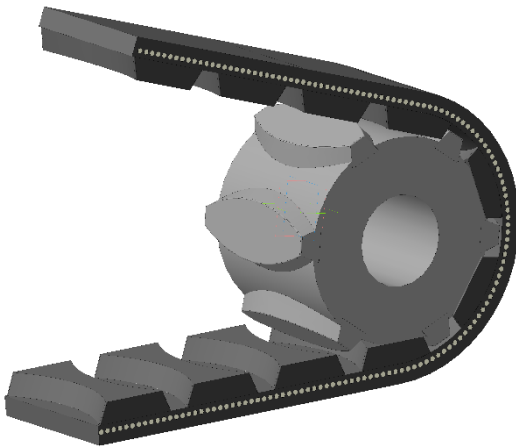


Рис. 5. Модифицированная ременная передача с вогнутыми зубьями

В сравнении с I), конструктивная модификация II) является ее зеркальной противоположностью – вогнутые в продольном направлении боковые стороны зубьев ремня контактируют с выпуклыми в этом же направлении боковыми сторонами зубьев шкивов.

Величины R и β остаются те же, что и в I):

$$R = b; \beta = 60^\circ \text{ (рис. 6, а)}.$$

Принципиальным отличием в расчетах II) и I) является то, что для вогнутых зубьев ремня (рис. 6, б) задаем минимальный поперечный размер зуба ремня – ширину его вершин S_a в среднем сечении ремня: $S_a = 0.25P$.

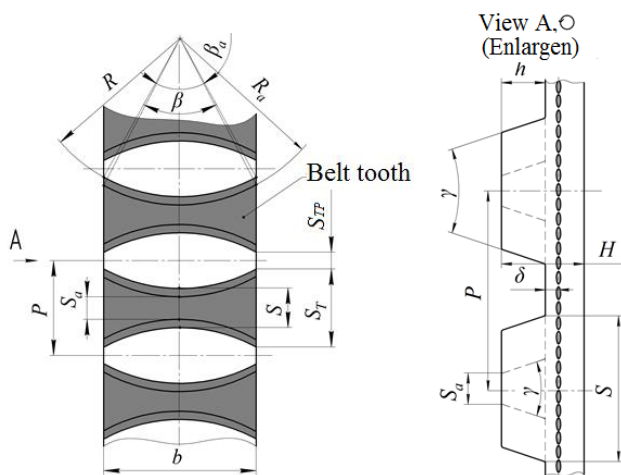


Рис. 6. Модифицированная передача с вогнутыми зубьями: а – параметры; б – cross section

Опуская промежуточные действия, используя данные рис. 2б и 3б, приведем конечные аналитические зависимости для вычисления остальных параметров зубьев ремня по варианту II) с учетом принятого значения S_a :

$$\begin{aligned} S &= 0.25p + 2h \cdot \operatorname{tg}(\gamma/2); \\ S_T &= 2R[1 - \cos(\beta/2)] + 2h \cdot \operatorname{tg}(\gamma/2) + 0.25P; \\ S_{TP} &= 0.75P - 2R[1 - \cos(\beta/2)] - 2h \cdot \operatorname{tg}(\gamma/2); \\ A_{II} &= b \cdot \{2R[1 - \cos(\beta/2)] + 2h \cdot \operatorname{tg}(\gamma/2) + 0.25P\} - \\ &- R^2(\beta - \sin \beta). \end{aligned}$$

Найдем численное значение A_{II} и сравним его с A_I :

$$\begin{aligned} A_{II} &= 25 \cdot [2 \cdot 25(1 - \cos 30^\circ) + 2 \cdot 3.5 \cdot \operatorname{tg} 20^\circ = 0.25 \cdot 15.7] - \\ &- 25^2 \cdot \left(60^\circ \cdot \frac{\pi}{180} - \sin 60^\circ\right) \approx 216 \text{ mm}^2. \end{aligned}$$

Площадь A_{II} меньше, чем $A_I \approx 240 \text{ mm}^2$, но больше, чем $A_O \approx 196 \text{ mm}^2$, то есть, $A_{II} > A_I > A_O$. Следовательно, обе новые конструктивные версии зубчатого ремня превосходят стандартный зубчатый ремень по сопротивляемости зубьев срезу, но в разной степени. Что касается площадей боковых поверхностей зубьев, то они у версий I) и II) по величине одинаковы, так как определяющие их параметры R, β, h имеют одинаковые численные значения.

При этом, методика проектирования модифицированных ремней не отличается от общепринятой, [8, 9], но с учетом замены параметра b на увеличенную длину зубьев $L = b \cdot \pi / 3$.

Как и ремни с модификацией I), ремни II) благодаря криволинейной боковой поверхности зубьев обладают способностью самоустанавливаться на шкивах.

Выводы

В работе создана 3D модель сборочной конструкции привода станка в системе автоматизированного проектирования КОМПАС-3D, состоящая из более 300 деталей. Данный проект стал победителем международного конкурса «Будущие Асы компьютерного 3D моделирования», проводимого группой компаний АСКОН. Разработана программа параметрического моделирования зубчатых ременных передач стандартной и модифицированной конструкций. Данная программа, написанная в среде CAD/CAE APM WinMachine с использованием синтаксиса модуля APM Graph, обеспечивает более эффективное проектирование механических передач различных модификаций.

Разработаны две конструктивные модификации приводных зубчатых ремней с криволинейной формой рабочих поверхностей зубьев. Предложенные конструкции позволяют увеличить длину контакта ремня порядка 5%, что, в свою очередь, будет снижать удельное давление на зубьях и, как следствие, повысит нагрузочную способность зубчато-ременной передачи при неизменных ее габаритах.

Разработана аналитическая модель определения геометрических параметров модифицированных зубчато-ременных передач, на основе которой доказано что площадь основания модифицированного ремня выпуклой формы превышает соответствующее значение стандартизированного ремня на величину порядка 22%, что показывает потенциальное превосходство выпуклых зубьев перед прямыми зубьями по сопротивляемости срезу. Это позволяет повысить их тяговую способность или, при неизменном уровне внешней нагрузки, увеличить ресурс ремней в сравнении со стандартными приводными зубчатыми ремнями. Предложенные новые конструктивные модификации зубьев позволяют зубчатым ремням самоустанавливаться на шкивах, что исключает смещение ремней к торцам шкивов, которое имеет место у стандартных зубчато-ременных передач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бушуев В.В. Металлорежущие станки: Учебник / В.В. Бушуев, А.А. Еремин, А.А. Какоило. – М.: Машиностроение, 2012. – Т.1. – 608 с.
2. Аврамова Т.М. Металлорежущие станки / Т.М. Аврамова, В.В. Бушуев, Л.Я. Гиловой. – М.: Машиностроение, 2012. – 608 с.
3. Соломенцев Ю.М. Металлорежущие станки и станочные системы. Станки с числовым программным управлением. Гибкие производственные системы и автоматические линии / Ю.М. Соломенцев, Ф.Ю. Свитковский. – Ижевск: ИжГТУ, 2001. – Т. 2. – 260 с.
4. Машиностроение. Энциклопедия. В 40 т. Т. IV-1. Детали машин. Конструкционная прочность. Трение, износ, смазка / Под ред. Д.Н. Решетова. – М.: Машиностроение, 1995. – 864 с.
5. Андриенко Л.А. Детали машин / Л.А. Андриенко, Б.А. Байков, М.Н. Захаров. – М.: Изд. МГТУ им. Н.Э.Баумана, серия Terra Mechanica, 2014. – 472 с.
6. ОСТ 38-05114-76. Ремни приводные зубчатые и шкивы. Основные размеры. Методы контроля размеров ремней. – 17 с.
7. Patent of US 21337485, cl. 73-229. 21.07.1977.
8. Stojanović B. Length variation of toothed belt during exploitation / B. Stojanović, N. Miloradović, N. Marjanović, M. Blagojević, L. Ivanović // Strojniški vestnik. Journal of Mechanical Engineering. – 2011. – № 57(9). – P. 648-654. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2010.062>.
9. Беляев А.К. Динамическая устойчивость зубчатременных передач. / А.К. Беляев // Известия Вузов. Приборостроение. – 2010. – Т. 53, № 2. – P. 20-23.
10. Błażej R. A device for measuring conveyor belt thickness and for evaluating the changes in belt transverse and longitudinal profile / R. Błażej, L.P. Jurdziak, A. Kirjanów-Błażej, T. Kozłowski // Diagnostyka. – 2017. – № 18(4). – P. 97-102.
11. Gładysiewicz L. Selection of carry idlers spacing of belt conveyor taking into account random stream of transported bulk material / L. Gładysiewicz, W. Kawalec, R. Krol // Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability. – 2016. – № 18 (1). – P. 32-37. <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2016.1.5>.
12. Wilczyński M. Influence of tension layer quality on mechanical property of timing belts / M. Wilczyński, G. Domek // Matec Web of Conferences. – 2019. – № 254. – 05010. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201925405010>.
13. Колка И.А. Многооперационные станки. / И.А. Колка, В.В. Кувшинский. – М: Машиностроение, 1983. – 136 с.
14. Krol O. Parametric modeling of transverse layout for machine tool gearboxes / O. Krol, V. Sokolov // In: Gapiński B., Szostak M., Ivanov V. (eds) Advances in Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, 2019. – № 4. – P. 122-130. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16943-5_11.
15. Sokolov V. Nonlinear simulation of electrohydraulic technological equipment / V. Sokolov, O. Krol, O. Stepanova // J. Physics: Conf. Series. – 2019. – № 1278. – 012003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1278/1/012003>.
16. Ганин Н.Б. Трехмерное проектирование в КОМПАС-3D / Н.Б. Ганин. – М.: ДМК, 2012. – 776 с.
17. Krol O. 3D modelling of angular spindle's head for machining centre / O. Krol, V. Sokolov // J. Phys.: Conf. Ser. – 2019. – № 1278. – 012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1278/1/012002>.
18. Sokolov V. Choice of correcting link for electrohydraulic servo drive of technological equipment / V. Sokolov, O. Krol, O. Stepanova // In: Ivanov V. et al. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, 2020. – P. 702-710. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_70.
19. Фомин Е.П. Использование параметрических возможностей КОМПАС-3D / Е.П. Фомин // САПР и графика. – 2007. – №10. – С. 70-74.
20. Сокол И. База данных APM Data – связующий элемент в структуре системы APM WinMachine / И. Сокол, Ю. Савченко, Д. Шанин, С. Розинский //САПР и графика. – 2002. – № 9. – С. 9-12.
21. Замрий А.А. Практический учебный курс CAD/CAE APM WinMachine. Учебно-методическое пособие / А.А. Замрий. – М.: Изд-во АПМ, 2007. – 144 с.
22. Шелофаст В.В. Основы проектирования машин. Примеры решения задач / В.В. Шелофаст, Т.Б. Чугунова. – М.: Изд-во АПМ, 2004. – 240 с
23. Krol O. Modeling carrier system dynamics for metal-cutting machines / O. Krol, V. Sokolov // 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon-2018. IEEE, 2018. <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501799>.
24. Шевченко С.В., Муховатий О.А., Кроль О.С. Зубчато-ременная передача // Заявка и 2020 04697 на корисну модель Україна. Заявл. 24. 07.2020.
25. Shevchenko S. Geometric aspects of modifications of tapered roller bearings / S. Shevchenko, A. Mukhovaty, O. Krol // Procedia Engineering. – 2016. – № 150. – P. 1107-1112. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.221>

Research of the Modified Tooth-belt Drive for the Machining Center

Shevchenko S.V., Mukhovaty A.A.
Volodymyr Dahl Lugansk National University
Lugansk, Ukraine

Krol O.S.
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University
Severodonetsk, Ukraine
krolos.snu.edu@gmail.com

Abstract. The article discusses the drive of the main movement for the machining center with a modified toothed-belt drive. A three-dimensional model of the drive in the environment of the integrated CAD KOMPAS-3D is built. A procedure for parametric modeling of the toothed-belt drive elements in CAD APM WinMachine is proposed, intended for the design of both standard and modified versions. The article presents the results of the two variants study with toothed-belt drive constructive modification – with convex and concave in the longitudinal direction of the belt teeth. The main parameters of the both modifications

teeth, which showed their advantage over standard toothed-belts in terms of load capacity have been obtained. The possibility of self-adjusting for the proposed variants of belts with a curved shape of the working teeth surfaces is noted.

Keywords: toothed belt, convex / concave belt surface, tooth base area, tooth parameters, belt self-adjusting.

Разработка схемы необходимости и достаточности по применению разных видов радиусов автомобильной шины в разных задачах моделирования автомобиля

Балакина Е.В., Сергиенко И.В.

Волгоградский государственный технический университет
Волгоград, Российская Федерация
fahrgestell2011@yandex.ru

Аннотация. Автомобильное колесо, снабженное эластичной шиной и ориентированное в пространстве определенным образом, оказывает существенное влияние на такие свойства автомобиля как устойчивость движения, управляемость, тормозная динамика. Поэтому при моделировании этих свойств моделируют и эластичное колесо: его геометрические размеры, упругие и сцепные свойства, его деформации. При этом расчетные параметры моделируемых явлений связаны с применяемым для расчетов видом радиуса колеса. Например, величина радиуса колеса используется при расчете: длины пятна контакта, увода, моментов относительно оси вращения колеса, моментов вокруг оси поворота управляемого колеса, скольжения в контакте и др. Нагруженное радиальной нагрузкой эластичное колесо не имеет единого радиуса в геометрическом смысле вследствие изменения формы круга. Получены приближенные теоретические зависимости для расчета относительных радиусов качения колеса. Разработана схема необходимости и достаточности по применению видов радиусов колеса в разных задачах.

Ключевые слова: автомобильная шина, виды радиусов, относительные радиусы, методика расчета, схема применения.

ВВЕДЕНИЕ

Автомобильное колесо, снабженное эластичной шиной и ориентированное в пространстве определенным образом, оказывает существенное влияние на такие свойства автомобиля как устойчивость движения, управляемость, тормозная динамика [1-24]. Поэтому при моделировании этих свойств моделируют и эластичное колесо: его геометрические размеры, упругие и сцепные свойства, его деформации. При этом расчетные параметры моделируемых явлений связаны с применяемым для расчетов видом радиуса колеса. Например, величина радиуса колеса используется при расчете: длины пятна контакта, увода, моментов относительно оси вращения колеса, моментов вокруг оси поворота управляемого колеса, скольжения в контакте и др. Нагруженное радиальной нагрузкой эластичное колесо не имеет единого радиуса в геометрическом смысле вследствие изменения формы круга. Существуют разные виды радиуса деформированного эластичного колеса: свободный R_0 , качения R_r , статический R_{st} , динамический R_d [1, 4, 8, 9, 12, 15, 16, 18, 21].

Радиусы эластичного колеса (шины) могут иметь разные величины. При этом всегда $R_{st} < R_0$; $R_d \leq R_0$.

В зависимости от радиальной деформации шины, $R_d < > R_{st} \wedge R_d = R_{st}$; $R_r \leq R_{st}$; $R_r > R_{st}$; $R_r \geq R_d$.

Не все виды радиусов колеса являются равнозначными при использовании их для модельных расчетов указанных явлений и свойств. В частности, много споров в научной среде вызывают вопросы использования видов радиусов при расчете: 1 – момента по сцеплению и 2 – скольжения в контакте шины с твердой опорной поверхностью.

С нашей точки зрения, вопрос 1 закрыл автор работы [10], который экспериментально доказал правомерность использования для расчета момента по сцеплению только радиуса качения. Вопрос 2 остается открытым. Также отсутствуют рекомендации по применению видов радиусов колеса при расчете длины пятна контакта, даже при наличии формул [22].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель исследования – разработка схемы необходимости и достаточности по применению видов радиусов колеса в разных задачах.

Для достижения цели исследования требуется решить следующие задачи.

1. Получить выражения для расчета относительных радиусов эластичного колеса. Исследовать взаимосвязи относительных радиусов и относительной деформации шины.
2. Определить влияние видов радиусов на форму расчетных $\varphi_x - s_x$ - диаграмм.
3. Разработать схему необходимости и достаточности по применению видов радиусов колеса в разных задачах.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения задачи 1 авторами получено приближенное выражение для расчета радиуса качения колеса:

$$R_r \approx R_0 \left[\left(1 - \frac{\arcsin(\sqrt{n(2-n)})}{\pi} \right) + \frac{\sqrt{n(2-n)}}{\pi} \right], \quad (1)$$

где n – относительная радиальная деформация шины ($n = \frac{z}{R_0}$).

В выражении (1) при $n=0$ (нет радиальной деформации шины z) $R_r = R_0$. При $n = const$ $R_r = const$.

Т.к.

$$R_d = R_0 - z = R_0 - n \cdot R_0 = R_0(1 - n), \quad (2)$$

то:

$$\frac{R_r}{R_d} \approx \frac{1 - \frac{\arcsin(\sqrt{n(2-n)})}{\pi} + \frac{\sqrt{n(2-n)}}{\pi}}{1 - n}. \quad (3)$$

У уравнений (1) и (3) нет решений в явном виде. Поэтому было принято решение использовать для этих целей среду MATLAB. В среде MATLAB получено решения уравнения (1):

$$\frac{R_r}{R_0} \approx 1 - 0,075 \cdot n; \quad (4)$$

Из (2) \Rightarrow

$$\frac{R_d}{R_0} = 1 - n. \quad (5)$$

Совместное решение позволило найти соотношение

$$\frac{R_r}{R_d} \approx \frac{\frac{1}{n} - 0,075}{1 - n}. \quad (6)$$

На рис. 1 показаны рассчитанные по формулам (4) и (5) относительные радиусы: динамический и качения при разных относительных деформациях шины n , а на рис. 2 – их отношение в соответствии с формулой (6).

Из рис. 1 видно, что при рабочих деформациях шины радиус качения уменьшается не более чем на 2%. Из рисунка 2 видно, что при рабочих деформациях шины радиус качения больше динамического на 0...23%.

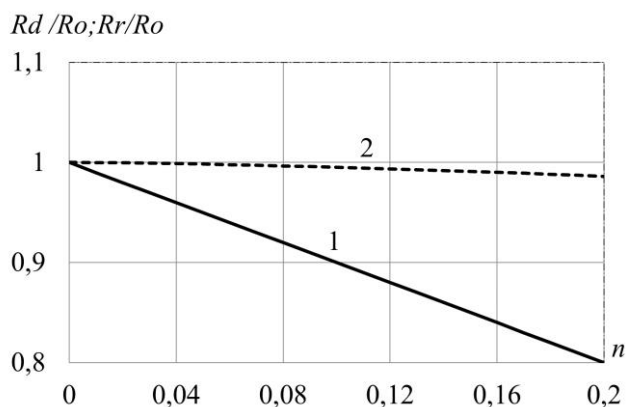


Рис. 1. Расчетные относительные радиусы:
1 – динамический; 2 – качения

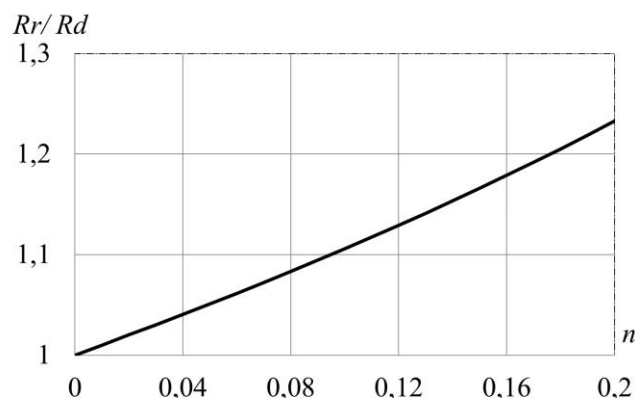


Рис. 2. Отношение радиуса качения к динамическому

Для решения задачи 2 построены $\varphi_x - s_x$ -диаграммы. $\varphi_x - s_x$ -диаграммой называют зависимость коэффициента сцепления φ_x автомобильной шины с опорной поверхностью от коэффициента продольного скольжения колеса (скольжения) s_x . Вид и численные характеристики этих зависимостей оказывают существенное влияние на расчетные оценочные параметры устойчивости, управляемости и тормозной динамики автомобиля

$$s_x = \frac{V_s}{\omega \cdot R_r}, \quad (7)$$

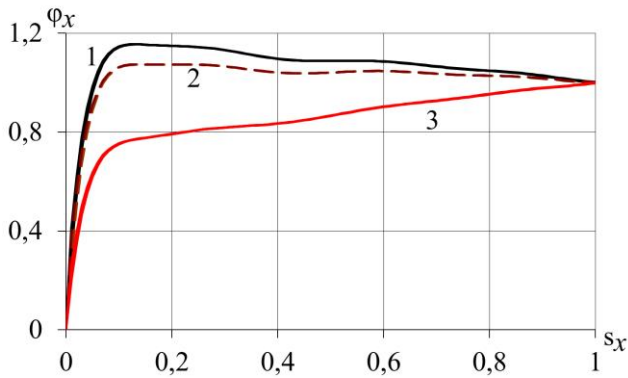
где V_s – скорость продольного скольжения колеса ($V_s \approx V_x - \omega \cdot R_r$); ω – угловая скорость колеса; R_r – радиус качения колеса; V_x – продольная составляющая поступательной скорости оси колеса.

Диапазон изменения $s_x = 0-100\%$. В знаменателе формулы (1) в практических расчетах КПСК в режиме торможения ставят V_x для исключения деления на ноль при блокировании колеса.

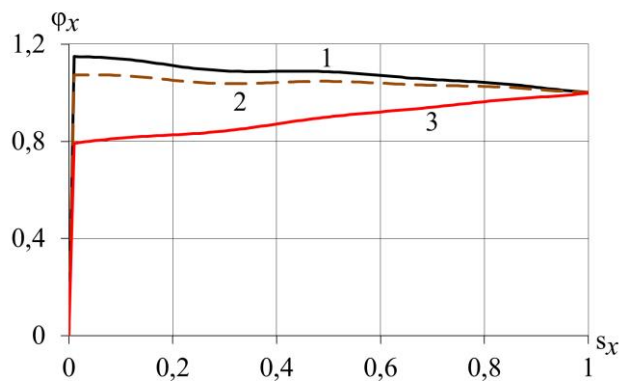
Многие авторы рассчитывают величину s_x по указанной зависимости (1), т.е. через радиус качения, например [2, 5, 6, 12, 14, 15, 19, 21, 23 и др.].

Некоторые же авторы, ввиду отсутствия данных по радиусу качения, заменяют его другими величинами: свободным радиусом [7, 17, 24 и др.], динамическим радиусом [8, 13 и др.]. Поэтому в данной статье авторы провели анализ влияния вида используемого радиуса при расчете скольжения на форму получаемых $\varphi_x - s_x$ -диаграмм.

Был проведен расчетный анализ влияния вида используемого радиуса при расчете скольжения s_x по зависимости (7) на форму получаемых $\varphi_x - s_x$ -диаграмм, результаты которого приведены на рис. 3 и 4. Для расчета φ_x использовалась известная методика [4, 17].



а



б

Рис. 3. Расчетные $\varphi_x - s_x$ -диаграммы при разных величинах боковой силы, появившейся до начала торможения, полученные при расчете величины:

а – по свободному радиусу и радиусу качения;

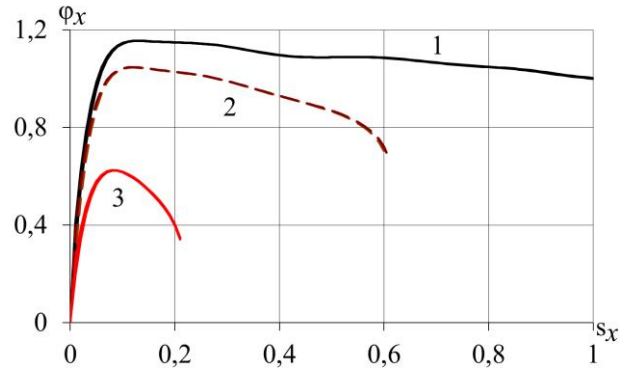
б – по динамическому радиусу;

$$1 - \frac{P_y}{P_z} = 0; 2 - \frac{P_y}{P_z} = 0,5; 3 - \frac{P_y}{P_z} = 1$$

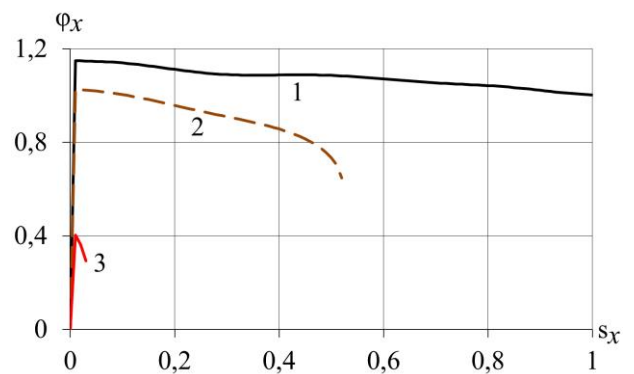
На основании проведенного анализа сделан вывод о целесообразности использования при расчетах скольжения s_x радиуса качения шины (но не динамического!).

При расчетах $\varphi_x - s_x$ -диаграмм вместо значения радиуса качения можно применять близкое к нему значение свободного радиуса.

Конечно, с точки зрения механики, грамотнее было бы использовать радиус качения. Но, поскольку он отличается от свободного радиуса, даже при максимально допустимых деформациях шины, не более чем на 2%, и это расхождение не оказывает видимого влияния на расчетные $\varphi_x - s_x$ -диаграммы при разных величинах боковой силы, появившейся до или после начала торможения колеса, то нет необходимости усложнять задачу расчетом радиуса качения в каждый момент движения, поскольку это увеличивает время счета, а использование свободного радиуса дает тот же результат. А приближенно рассчитать радиус качения с достаточной для практических расчетов точностью можно по приведенной выше зависимости (2).



а



б

Рис. 4. Расчетные $\varphi_x - s_x$ -диаграммы при разных величинах боковой силы, появившейся после начала торможения, полученные при расчете:

а – по свободному радиусу и радиусу качения;

б – по динамическому радиусу;

$$1 - \frac{P_y}{P_z} = 0; 2 - \frac{P_y}{P_z} = 0,5; 3 - \frac{P_y}{P_z} = 1$$

Длина пятна контакта рассчитывается из геометрических соображений с использованием свободного радиуса и радиальной деформации шины, или, что то же самое, свободного и динамического радиусов [22].

Для решения задачи 3 авторами разработана схема необходимости и достаточности по применению видов радиусов колеса в разных задачах, связанных с моделированием свойств активной безопасности автомобилей. Она показана на рис. 5. Перечислены свойства активной безопасности автомобиля и основные явления, определяющие параметры этих эксплуатационных свойств. Это увод эластичного колеса, большие и малые колебания управляемых колес, продольное и поперечное перераспределение нагрузок на колеса, продольное и поперечное скольжение в пятне контакта. Интенсивность указанных явлений связана с множеством параметров первого и второго уровня, но на данной схеме рис. 5 приведены не все, а только те из них, которые так или иначе зависят от одного из радиусов колеса!

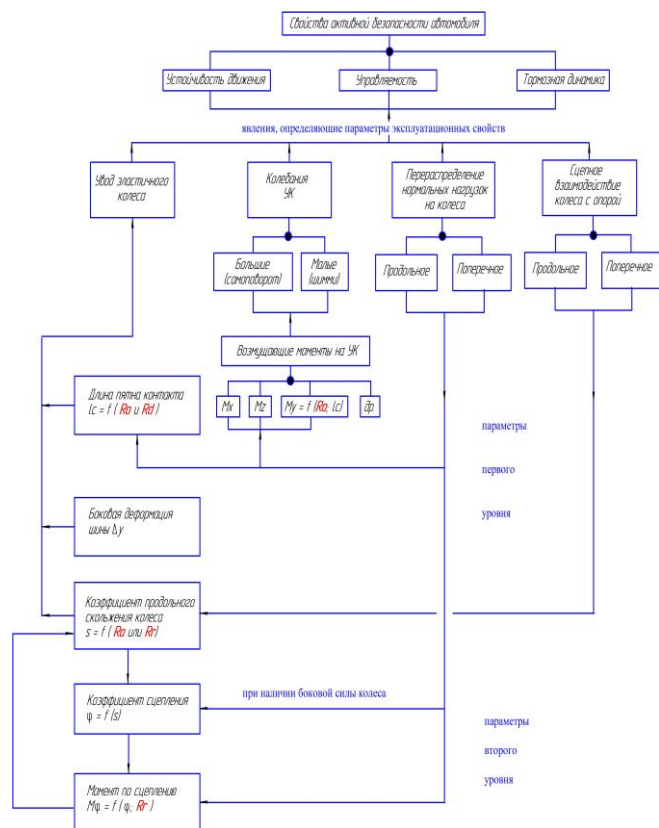


Рис. 5. Схема необходимости и достаточности по применению видов радиусов колеса в разных задачах

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

1. Получены выражения для расчета относительных радиусов эластичного колеса. Исследованы взаимосвязи относительных радиусов и относительной деформации шины. Показано, что:

- при рабочих деформациях шины радиус качения уменьшается не более чем на 2%;
- при рабочих деформациях шины радиус качения больше динамического на 0...23%.

2. Установлено, что при расчете скольжения в контакте шины с твердой опорной поверхностью следует использовать радиус качения. Также можно применять близкое к нему значение свободного радиуса. При расчете момента по сцеплению – только радиус качения. Длину пятна контакта следует определять из геометрических соображений с использованием свободного и динамического радиусов.

3. Разработана схема необходимости и достаточности по применению видов радиусов колеса в разных задачах моделирования автомобиля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балабин И.В. Автомобильные и тракторные колеса и шины / И.В. Балабин, В.А. Путин, И.С. Чабунин. – МГТУ «МАМИ», 2012. – 920 с.
2. Балакина Е. В. Применение разных радиусов колеса в задачах моделирования свойств активной безопасности автомобилей / Е. В. Балакина, И. В. Сергиенко // Автомобильная промышленность. – 2019. – №5. – С. 16-19.
3. Балакина Е.В. Расчет геометрического положения и размеров зон трения покоя и скольжения в пятне контакта эластичного колеса с твердой опорной поверхностью /

Е.В. Балакина // Трение и износ. – 2017. – Т.38, №2. – С. 136-143.

4. Балакина Е.В. Расчет коэффициента сцепления устойчивого эластичного колеса с твердой опорной поверхностью при наличии боковой силы / Е. В. Балакина // Трение и износ. – 2019. – Т. 40, №6. – С. 756-765.

5. Бойко А.В. Пространственная математическая модель процесса торможения автомобиля на полноопорном роликовом стенде / А. В. Бойко, А.И. Федотов // Автомобильная промышленность. – 2016. – №3. – С. 8-15.

6. Дик А.Б. О радиусе эластичного колеса / А.Б. Дик // Автомобильная промышленность. – 2020. – №10. – С.21-28.

7. Задворнов В.Н. Прогнозирование износа протектора по жесткостным характеристикам шин / В.Н. Задворнов, Е.В. Балакина, Н.А. Мищенко // Трение и износ. – 2020. – Т. 41, №4. – С. 485-490.

8. Кравец В.Н. Теория автомобиля: учеб. для вузов / В.Н. Кравец, В.В. Селифонов. – М.: ООО «Гринлайт+», 2011. – 884 с.

9. Пожидаев С.П. О теории качения эластичного колеса с позиций механики / С.П. Пожидаев // Автомобильная промышленность. – 2014. – №11 – С.16-17.

10. Пожидаев С.П. Экспериментальная проверка взаимосвязи крутящего момента и полной окружной силы эластичного колеса / С.П. Пожидаев, Г.В. Шкаровский // Автомобильная промышленность. – 2019. – №9. – С. 8-13.

11. Рыжих Л.А. Определение продольной реализуемой силы сцепления автомобильного колеса с опорной поверхностью по крутильной деформации шины и ее жесткости / Л.А. Рыжих, Д.Н. Леонтьев, А.В. Бакадоров // Автомобильная промышленность. – 2019. – №5. – С. 16-19.

12. Тарасик В.П. Теория движения автомобиля: Учебник для вузов. / В.П. Тарасик. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 478 с.

13. Туренко А.Н. Методы расчета реализуемого коэффициента сцепления при качении колеса в тормозном режиме / А.Н. Туренко, С.И. Ломака, Л.А. Рыжих, Д.Н. Леонтьев // Автомобильный транспорт. – 2010. – №27. – С.7-12.

14. Федотов А.И. Динамический метод диагностики пневматического тормозного привода автомобилей: монография / А.И. Федотов. – Иркутск: Изд-во ИрНТУ, 2015. – 514 с.

15. Balakina E.V. Advantages of using wheel rolling radius for calculating friction characteristics in Wheel-to-Road contact patch / E.V. Balakina, E.Y. Lipatov, D.S. Sarbaev // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Springer, Cham, 2020. doi:10.1007/978-3-030-22041-9_107.

16. Balakina E.V. Analysis of various types of elastic wheel radii and establishing necessity and sufficiency of their application for various problem solving / E.V. Balakina, I.V. Sergienko, R.R. Sanzhapov // Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Springer, Cham, 2021. doi:10.1007/978-3-030-54814-8_2.

17. Balakina, E.V. Forms of $\varphi_x - s_x$ - diagrams of an automobile tire / E.V. Balakina // Proceedings of 9th International

al Scientific Conference "Balttrib'2017", Aleksandras Stulginskis University Akademija, Kaunas, Lithuania, 16-17 November 2017. – 2018. – P. 110-116.

18. Jimenez E. Experimental investigation of the tractive performance of pneumatic tires on ice / E. Jimenez, C. Sandu // *Tire Science and Technology (USA)*. – 2020. – Vol. 48, No. 1. – P. 22-45.

19. Pacejka H.B. *Tire and vehicle dynamics* / H.B. Pacejka. – USA: Elsevier Ltd, 2012. – 672 p.

20. Prokop G. Physical understanding of transient generation of tire lateral force and aligning torque / P. Sarkisov, G. Prokop, J. Kubenz, S. Popov // *Tire Science and Technology (USA)*. – 2019. – Vol. 47, No. 4. – P. 308-333.

21. Reza N. *Jazar vehicle dynamics: theory and application* / Jazar N. Reza. – Springer Science + Business Media, LLC, 2008. – 1015 p.

22. Balakina E.V. The calculation method of the length of contact of car tires with the road surface / E.V. Balakina, V.N.

Zadvornov, D.S. Sarbaev, I.V. Sergienko, Y.N. Kozlov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 632: International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering (Irkutsk, Russia, 27 May – 1 June, 2019): Proceedings / Irkutsk National Research Technical University. – IOP Publishing, 2019. doi:10.1088/1757-899X/632/1/012022.

23. Viehweger M. Vehicle state and tyre force estimation: demonstrations and guidelines / M. Viehweger, C. Vasseur, S. van Aalst, M. Acosta, E. Regolin, A. Alatorre, V. Ivanov, A. Victorino // *Vehicle System Dynamics*. – 2021. – Vol. 59, № 5. – P. 675-702. doi:10.1080/00423114.2020.1714672.

24. Zotov N.M. Using the $\Phi - S_x$ nomogram in calculating the dynamics of a braked wheel / N.M. Zotov, E. V. Balakina // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2007. – Vol. 36, No. 2. – P. 193-198.

Development of a Necessity and Sufficiency Scheme for the Use of Different Types of Car Tire Radii in Different Car Modeling Tasks

Balakina E.V., Sergienko I.V.
Volgograd State Technical University
Volgograd, Russian Federation
fahrgestell2011@yandex.ru

Abstract. A car wheel equipped with an elastic tire and oriented in a certain way has a significant effect on such car properties as driving stability, handling, braking dynamics. Therefore, when modeling these properties, an elastic wheel is also modeled: its geometric dimensions, elastic and friction properties, and its deformation. In this case, the calculated parameters of the simulated phenomena are related to the type of wheel radius used for calculations. For example, the value of the wheel radius is used when calculating: the contact patch length, slip, moments about the axis of the wheel rotation, moments about the axis of the con-

trolled wheel rotation, sliding in contact, etc. An elastic wheel loaded with a radial load does not have a uniform radius in the geometric sense due to a change in the shape of the circle. Approximate theoretical dependences are obtained for calculating the relative rolling radii of the wheel. The scheme of necessity and sufficiency for the use of wheel radii types in different tasks has been developed.

Keywords: car tire, types of radii, relative radii, calculation method, application scheme.

Оценка влияния наклонной установки колеса на боковую устойчивость автомобиля

Балакина Е.В., Кочетов М.С., Сарбаев Д.С.

ФГБОУ ВО "Волгоградский государственный технический университет"

Волгоград, Российская Федерация

fahrgestell2011@yandex.ru

Аннотация. К свойствам активной безопасности автомобиля относятся: устойчивость, управляемость, тормозная динамика. На них влияет множество конструктивных параметров шасси: неподрессоренная масса, радиусы колес, геометрия рулевого привода, жесткость и демпфирование подвесок, шин, рулевого привода, компоновочные параметры машины и др. Для улучшения этих свойств проводят оптимизацию перечисленных параметров или их бортовое регулирование. Поиск управляющих параметров - одна из важных задач обеспечения стабилизации траектории автомобиля. Данное исследование относится к области установки колес автомобиля, а именно, к вопросу углов их наклона в поперечной вертикальной плоскости и влиянию этого угла на свойства шин и эксплуатационные свойства автомобиля. Проведена расчетная оценка взаимосвязей наклонной установки колеса с устойчивостью автомобиля по поперечному скольжению и поперечному опрокидыванию. Получены приближенные зависимости для определения влияния угла наклона колеса на указанные свойства. Изменение устойчивости движения автомобиля при наклонной установке колес требует дополнительных исследований.

Ключевые слова: колесо транспортного средства, наклон в поперечной вертикальной плоскости, устойчивость по поперечному скольжению, устойчивость по поперечному опрокидыванию.

ВВЕДЕНИЕ

Наклон автомобильного колеса в поперечной вертикальной плоскости называют развалом и значения его величины на современных автомобилях небольшие. При этом положительным развалом в настоящее время считается развал, при котором расстояние между верхними частями колес одной и той же оси больше, чем между нижними. Так устанавливают передние управляемые колеса для уменьшения плеча обкатки (с целью уменьшения горизонтальных угловых колебаний управляемых колес) и для способствования недостаточной поворачиваемости автомобиля, со значениями положительного развала от 0 до +2°. Отрицательным (обратным) развалом в настоящее время считается развал, при котором расстояние между верхними частями колес одной и той же оси меньше, чем между нижними. Так иногда устанавливают задние колеса для некоторого улучшения оценочных параметров управляемости, со значениями отрицательного развала от 0 до -2,5°.

При наклонной установке левого и правого колес одной и той же оси они наклоняются в противоположных направлениях в любом случае, поэтому нелогично называть развал, относящийся сразу к двум колесам одной оси (левому и правому) положительным или отрицательным.

В связи с этим предлагается уточнить терминологию, связанную с наклоном колес, и применять термины "наружный наклон" и "внутренний наклон", как показано в табл. 1.

Таблица 1

Предлагаемая терминология для наклоненного колеса

Термин	Определение
Наклон колеса	Неперпендикулярность плоскости вращения колеса опорной плоскости
Конструктивный наклон колеса	Наклон колеса, заложенный в конструкцию автомобиля
Эксплуатационный наклон колеса	Дополнительный наклон колеса, появляющийся в процессе эксплуатации автомобиля: – при движении поддрессоренного колеса по неровности опорной поверхности; – при крене поддрессоренного кузова от действия боковой силы; – при повороте управляемого колеса вокруг оси, наклоненной в поперечной вертикальной плоскости; – при принудительном бортовом автоматическом регулировании наклона колеса
Угол наклона колеса	Угол между плоскостью вращения и продольной плоскостью колеса
Угол конструктивного наклона колеса	Угол наклона колеса, предусмотренный конструкторской документацией
Угол эксплуатационного наклона колеса	Дополнительный угол наклона колеса, появляющийся в процессе эксплуатации автомобиля
Наружный наклон колес оси автомобиля	Наклон колес, при котором оси их вращения пересекаются выше оси автомобиля, в пределах колеи автомобиля
Внутренний наклон колес оси автомобиля	Наклон колес, при котором оси их вращения пересекаются ниже оси автомобиля, в пределах колеи автомобиля
Разнонаправленный наклон колес оси автомобиля	Наклон колес, при котором оси их вращения пересекаются выше или ниже оси автомобиля, за пределами колеи автомобиля или не пересекаются
Одиночный наклон колес оси автомобиля	Наклон одного из колес оси автомобиля
Схождение колеса	Неперпендикулярность плоскости вращения колеса поперечной плоскости, заложенная в конструкцию автомобиля
Угол схождения колеса	Угол между плоскостью вращения колеса и продольной плоскостью автомобиля, предусмотренный конструкторской документацией
Наружное схождение колес оси автомобиля	Схождение колес, при котором их центральные продольные оси пересекаются позади оси автомобиля, в пределах колеи автомобиля

Термин	Определение
Внутреннее схождение колес оси автомобиля	Схождение колес, при котором их центральные продольные оси пересекаются впереди оси автомобиля, в пределах колеи автомобиля
Разнонаправленное схождение колес оси автомобиля	Схождение колес, при котором их центральные продольные оси пересекаются впереди или позади оси автомобиля, за пределами колеи автомобиля или не пересекаются
Одиночное схождение колес оси автомобиля	Схождение одного из колес оси автомобиля

Известно, что наклон колес до 3° не оказывает видимого влияния на расход топлива и износ шин, но сказывается на устойчивости движения и управляемости, что создает предпосылки для его использования в качестве управляющего параметра в системах управления движением. Однако появляется вопрос неизменности этого угла при движении автомобиля.

В процессе движения автомобиля его колеса могут наклоняться на угол, дополнительный по отношению к конструктивному. Причинами являются:

- наличие заданной кинематики подвески для обеспечения направления воздействий на упругие и демпфирующие элементы;
- наличие угла поперечного наклона оси поворота управляемого колеса для обеспечения его весовой стабилизации и для уменьшения плеча обкатки.

Общий угол наклона колеса определяется как

$$\alpha = \alpha_0 \pm \alpha_s \pm \alpha_{\ominus},$$

где α_0 – угол конструктивного наклона колеса; α_s – углы эксплуатационного наклона колеса, появляющиеся при движении поддресоренного колеса по неровности опорной поверхности и при крене поддресоренного кузова от действия боковой силы; α_{\ominus} – угол эксплуатационного наклона колеса, появляющийся при повороте управляемого колеса.

Существуют многочисленные исследования свойств шин, в том числе связанные с наклоном колес [1-26].

Ранее Козловым Ю.Н. и Балакиной Е.В. были выполнены экспериментальные исследования значений углов эксплуатационного наклона колеса α_s . Эксперименты проводились на автополигоне [3]. Объектом исследований был переднеприводный легковой автомобиль с задней независимой подвеской. Установлено, что при движении по дороге с асфальтобетонным покрытием как передние, так и задние колеса легкового автомобиля при переезде неровностей наклоняются на угол, меньший до 30 раз угла α_0 (3°) конструктивного наклона колес. Проведены расчеты составляющей угла α_{\ominus} эксплуатационного наклона колеса при его повороте. Она до 3 раз меньше угла конструктивного наклона колес α_0 . Это делает целесообразным решение задачи оптимизации углов наклона задних колес для улучшения характеристик управляемости автомобилей.

Цель исследования

Цель исследования – определить влияние угла наклона колеса на устойчивость автомобиля по поперечному

скольжению и поперечному опрокидыванию.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведена расчетная оценка влияния наклонной установки колес на устойчивость автомобиля по поперечному скольжению. На рис. 1 приведена расчетная схема.

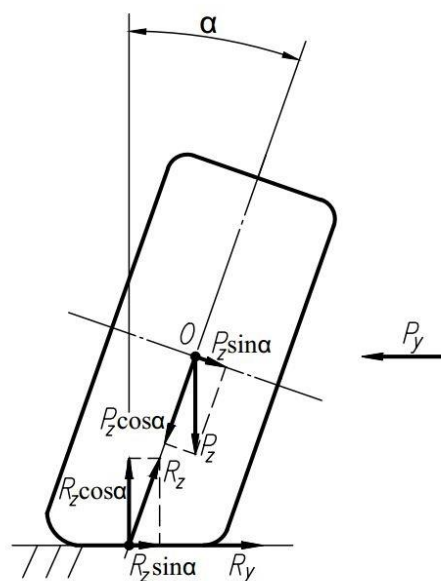


Рис. 1. Расчетная схема для оценки склонности автомобиля с наклоненными колесами к поперечному скольжению

Условие начала бокового скольжения:

$$P_y = R_y,$$

где R_y – боковая реакция опорной поверхности.

$$R_y = P_z \cdot \cos^2 \alpha \cdot f_{sl} + P_z \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha,$$

где f_{sl} – коэффициент трения скольжения.

Отношение боковой силы к нормальной нагрузке, при котором начинается боковое скольжение автомобиля с колесами, наклоненными на угол α определится как

$$\left(\frac{P_y}{P_z} \right)_{sl\alpha \neq 0} = \cos \alpha \cdot (\cos \alpha \cdot f_{sl} + \sin \alpha).$$

При $\alpha = 0$ боковое скольжение начинается при

$$\left(\frac{P_y}{P_z} \right)_{sl\alpha=0} \approx f_{sl}.$$

Обозначим через $K_{\alpha sl}$ удельное отношение боковой силы к нормальной нагрузке по критерию начала бокового скольжения автомобиля с наклоненными колесами

$$K_{\alpha sl} = \frac{\left(\frac{P_y}{P_z} \right)_{sl\alpha \neq 0}}{\left(\frac{P_y}{P_z} \right)_{sl\alpha=0}}$$

Тогда

$$K_{\alpha sl} = \cos \alpha \cdot \left(\cos \alpha + \frac{\sin \alpha}{f_{sl}} \right).$$

Результаты расчета коэффициента $K_{\alpha sl}$ показаны на рис. 2.

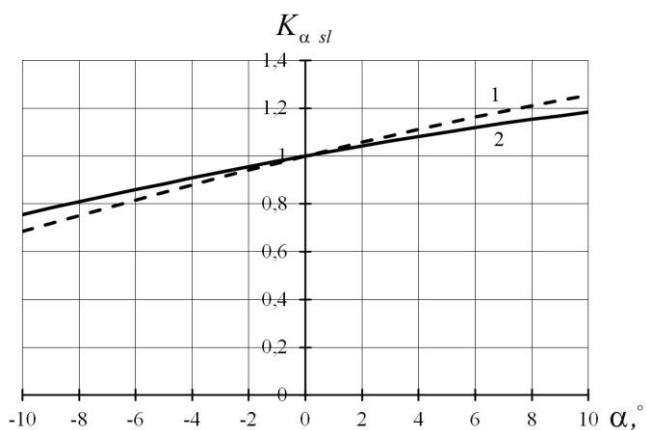


Рис. 2. Результаты расчета коэффициента $K_{\alpha sl}$:

$$1 - f_{sl} = 0,8; 2 - f_{sl} = 0,6$$

Из рисунка следует, что при внутреннем наклоне колес легковой автомобиль становится более устойчивым к поперечному (боковому) скольжению. При $\alpha = 5^\circ$ он становится более устойчивым к поперечному скольжению приблизительно на 10%. При этом значение коэффициента трения скольжения влияет на склонность автомобиля с наклоненными колесами к поперечному скольжению не более 5%.

Проведена расчетная оценка влияния наклонной установки колес на устойчивость автомобиля по поперечному опрокидыванию. На рис. 3 приведена расчетная схема.

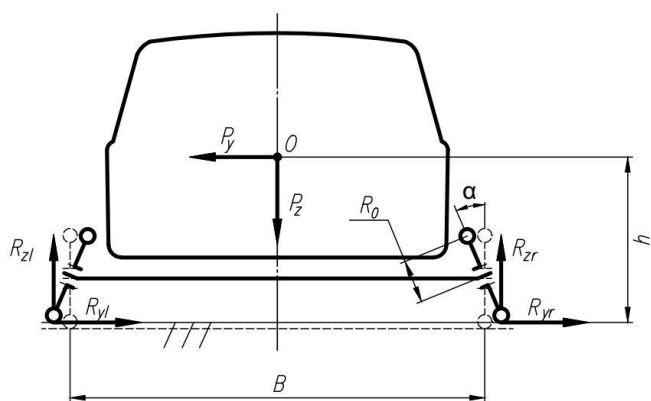


Рис. 3. Расчетная схема для оценки склонности автомобиля с наклоненными колесами к поперечному опрокидыванию

Проведенная расчетная оценка является приближенной, т.к. она не учитывает кинематику подвески, т.е. расположение оси крена.

$$R_{zr} \cdot (B + 2R_0 \cdot \sin \alpha) + P_y \cdot (h - \Delta h_\alpha) - P_z \cdot \left(\frac{B}{2} + R_0 \cdot \sin \alpha \right) = 0$$

$$\Delta h_\alpha = R_0 \cdot (1 - \cos \alpha),$$

где B – колея автомобиля с колесами, плоскости вращения которых перпендикулярны опорной; h – колея автомобиля с колесами, плоскости вращения которых перпендикулярны опорной; Δh_α – изменение высоты центра масс при наклоне колес; R_0 – свободный радиус

колеса; P_z – нормальная нагрузка; P_y – боковая сила; R_{zr} – нормальная реакция на правое колесо.

При потере контакта колеса с опорной поверхностью $R_{zr} = 0$. Тогда

$$P_y \cdot (h - \Delta h_\alpha) = P_z \cdot \left(\frac{B}{2} + R_0 \cdot \sin \alpha \right).$$

Отношение боковой силы к нормальной нагрузке, при котором начинается боковое опрокидывание автомобиля с колесами, наклоненными на угол α , определится как

$$\left(\frac{P_y}{P_z} \right)_{\text{til} \alpha \neq 0} = \frac{\frac{B}{2} + R_0 \cdot \sin \alpha}{h - R_0 \cdot (1 - \cos \alpha)}.$$

При $\alpha = 0$ боковое опрокидывание начинается (без учета конструктивных особенностей подвески) при

$$\left(\frac{P_y}{P_z} \right)_{\text{til} \alpha = 0} \approx \frac{B}{2h}.$$

Т.е. чем шире автомобиль, тем он устойчивее. Чем ниже центр масс автомобиля, тем он устойчивее.

Обозначим через K_{atil} удельное отношение боковой силы к нормальной нагрузке по критерию начала бокового опрокидывания автомобиля с наклоненными колесами

$$K_{\text{atil}} = \frac{\left(\frac{P_y}{P_z} \right)_{\text{til} \alpha \neq 0}}{\left(\frac{P_y}{P_z} \right)_{\text{til} \alpha = 0}}$$

После алгебраических преобразований получено итоговое выражение

$$K_{\text{atil}} = \frac{1 + (2R_0 / B) \cdot \sin \alpha}{1 - (R_0 / h) \cdot (1 - \cos \alpha)}.$$

У автомобилей между минимальными и максимальными значениями свободных радиусов колес и высоты центра масс нет однозначного соответствия. В табл. 2 приведены рассчитанные отношения R_0 / h для некоторых легковых автомобилей. Требуемые для расчета геометрические параметры легковых автомобилей приведены в табл. 3.

Таблица 2

Рассчитанные отношения R_0 / h некоторых легковых автомобилей

Автомобиль	Свободный радиус колеса R_0 , м	Высота центра масс h , м	Отношение R_0 / h
Daewoo Matiz	0,22	0,4	0,55
Ford Focus	0,308	0,526	0,58
Jeep Cherokee	0,37	0,768	0,48
Ssang Yong Kyron	0,37	0,669	0,55
Mitsubishi Outlander	0,35	0,621	0,56
Mitsubishi Pajero Sport	0,37	0,643	0,57
Nissan X-Trail	0,34	0,73	0,47

Автомобиль	Свободный радиус колеса R_0 , м	Высота центра масс h , м	Отношение R_0 / h
Land Rover Dafender	0,4	0,802	0,5

Таблица 3
Геометрические параметры легковых автомобилей

Параметр	Обозначение	Минимальное значение	Максимальное значение
Колея, м	B	1,3	1,65
Высота центра масс, м	h	0,4	0,8
Свободный радиус колеса, м	R_0	0,22	0,35
Отношение свободного радиуса колеса к колее автомобиля	R_0 / B	0,17	0,21
Отношение свободного радиуса колеса к высоте центра масс автомобиля	R_0 / h	0,5	0,58

В полученных выражениях учтено изменение высоты центра масс при наклоне колес Δh_α , но не учтено изменение высоты центра масс при крене, связанное с кинематикой подвески Δh_N (расположение центра крена N). Эту величину следует рассчитывать в динамике. При максимальной деформации подвески в процессе крена $\Delta h_N = 0$.

Результаты расчета коэффициента $K_{\alpha \text{til}}$ представлены на рис. 4 для разных углов наклона колес α .

Из рисунка следует, что при внутреннем наклоне колес легковой автомобиль становится более устойчивым к поперечному (боковому) опрокидыванию. При $\alpha = 5^\circ$ он становится более устойчивым к поперечному опрокидыванию приблизительно на 3...3,5%. На этот процесс практически не оказывают влияния существующие значения отношения R_0 / h . Отношение R_0 / B влияет на склонность автомобиля с наклоненными колесами к поперечному опрокидыванию не более 1% при $\alpha = 5^\circ$. Можно считать, что свободный радиус колеса практически не влияет на склонность автомобиля с наклоненными колесами к поперечному опрокидыванию.

Выводы

1. Наклон колес автомобиля до 3° не оказывает видимого влияния на расход топлива и износ шин, но сказывается на устойчивости движения и управляемости. Это создает предпосылки для его использования в качестве управляющего параметра в системах управления движением. Однако появляется вопрос неизменности этого угла при движении автомобиля.

2. Установлено, что при движении по дороге с асфальтобетонным покрытием колеса легкового автомобиля при переезде неровностей наклоняются на угол, меньший до 30 раз угла конструктивного наклона колес. Установлено, что при повороте управляемых колес они наклоняются на

угол, меньший до 3 раз угла конструктивного наклона колес. Это делает целесообразным решение задачи оптимизации углов наклона задних колес для улучшения характеристик управляемости автомобилей.

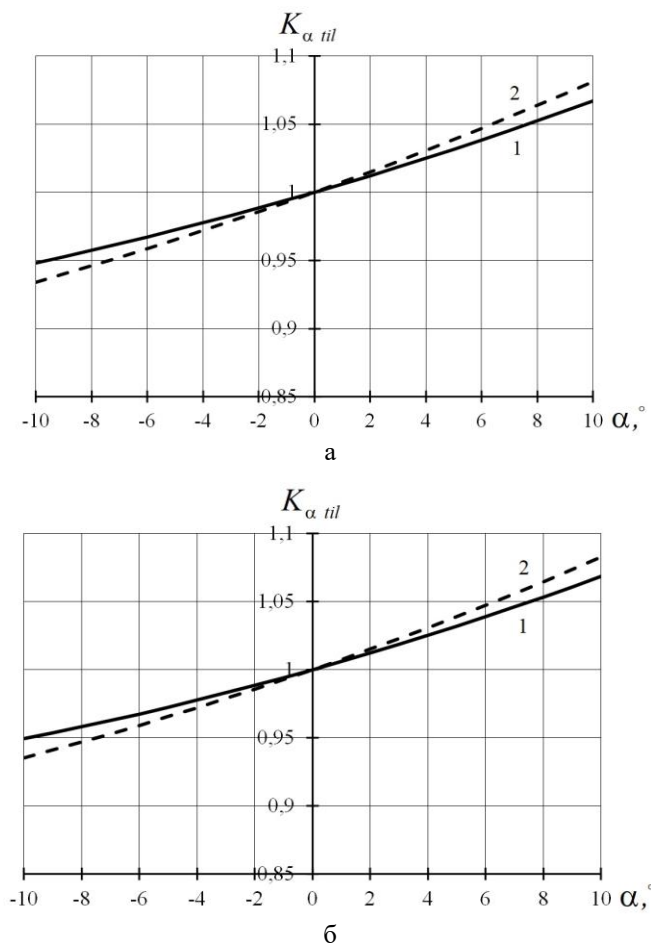


Рис. 4. Результаты расчета коэффициента $K_{\alpha \text{til}}$:

а – $R_0 / h = 0,5$; б – $R_0 / h = 0,58$;

1 – $R_0 / B = 0,17$; 2 – $R_0 / B = 0,21$

3. При внутреннем наклоне колес легковой автомобиль становится более устойчивым к поперечному (боковому) скольжению. При значении угла наклона 5° он становится более устойчивым к поперечному скольжению приблизительно на 10%. При этом значение коэффициента трения скольжения влияет на склонность автомобиля с наклоненными колесами к поперечному скольжению не более 5%.

4. При внутреннем наклоне колес легковой автомобиль становится более устойчивым к поперечному (боковому) опрокидыванию. При значении угла наклона 5° он становится более устойчивым к поперечному опрокидыванию приблизительно на 3...3,5%. На этот процесс практически не оказывает влияния значение отношения свободного радиуса к высоте центра масс. Отношение свободного радиуса к колее влияет на склонность автомобиля с наклоненными колесами к поперечному опрокидыванию не более 1%. Можно считать, что свободный радиус колеса практически не влияет на склонность автомобиля с наклоненными колесами к поперечному опрокидыванию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балабин И.В. Повышение устойчивости мобильной машины путем применения отрицательного развала колес / И.В. Балабин, И.С. Чабунин // Автомобильная промышленность. – 2020. – №7. – С. 8-9.
2. Балабин И.В. Углы установки управляемых колес и их количественное влияние на сопротивление движению автомобиля / И.В. Балабин // Автомобильная промышленность. – 2016. – №9. – С. 21-24.
3. Балакина Е.В. Изменение углов конструктивного наклона колеса при движении легкового автомобиля / Е.В. Балакина, Ю.Н. Козлов, А.Н. Тодоров // Автомобильная промышленность. – 2016. – №12. – С. 16-19.
4. Балакина Е.В. Применение разных радиусов колеса в задачах моделирования свойств активной безопасности автомобилей / Е.В. Балакина, И.В. Сергиенко // Автомобильная промышленность. – 2019. – №5. – С. 16-19.
5. Балакина Е.В. Расчет геометрического положения и размеров зон трения покоя и скольжения в пятне контакта эластичного колеса с твердой опорной поверхностью / Е.В. Балакина // Трение и износ. – 2017. – Т.38, №2. – С. 136-143.
6. Балакина Е.В. Расчет коэффициента сцепления устойчивого эластичного колеса с твердой опорной поверхностью при наличии боковой силы / Е. В. Балакина // Трение и износ. – 2019. – Т. 40, №6. – С. 756-765.
7. Бойко А.В. Пространственная математическая модель процесса торможения автомобиля на полноопорном роликовом стенде / А.В. Бойко, А.И. Федотов // Автомобильная промышленность. – 2016. – №3. – С. 8-15.
8. Дик А. Б. О радиусе эластичного колеса / А.Б. Дик // Автомобильная промышленность. – 2020. – №10. – С. 21-28.
9. Задворнов В.Н. Прогнозирование износа протектора по жесткостным характеристикам шин / В.Н. Задворнов, Е.В. Балакина, Н.А. Мищенко // Трение и износ. – 2020. – Т.41, №4. – С. 485-490.
10. Кравец В.Н. Теория автомобиля: Учебник для вузов / В.Н. Кравец, В.В. Селифонов. – М.: ООО «Гринлайт+», 2011. – 884 с.
11. Пожидаев С.П. О теории качения эластичного колеса с позиций механики / С.П. Пожидаев // Автомобильная промышленность. – 2014. – №11. – С. 16-17.
12. Пожидаев С.П. Экспериментальная проверка взаимосвязи крутящего момента и полной окружной силы эластичного колеса / С.П. Пожидаев, Г.В. Шкаровский // Автомобильная промышленность. – 2019. – №9. – С. 8-13.
13. Рыжих Л.А. Определение продольной реализуемой силы сцепления автомобильного колеса с опорной поверхностью по крутильной деформации шины и ее жесткости / Л.А. Рыжих, Д.Н. Леонтьев, А.В. Бакадоров // Автомобильная промышленность. – 2019. – №5. – С. 16-19.
14. Тарасик В.П. Теория движения автомобиля: Учебник для вузов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 478 с.
15. Туренко А.Н. Методы расчета реализуемого коэффициента сцепления при качении колеса в тормозном режиме / А.Н. Туренко, С.И. Ломака, Л.А. Рыжих, Д.Н. Леонтьев // Автомобильный транспорт. – 2010. – №27. – С. 7-12.
16. Федотов А.И. Динамический метод диагностики пневматического тормозного привода автомобилей: монография. – Иркутск: Изд-во ИрННТУ, 2015. – 514 с.
17. Balakina E.V. Advantages of using wheel rolling radius for calculating friction characteristics in Wheel-to-Road contact patch / E.V. Balakina, E.Y. Lipatov, D.S. Sarbaev // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Springer, Cham, 2020. doi:10.1007/978-3-030-22041-9_107.
18. Balakina E.V. Analysis of various types of elastic wheel radii and establishing necessity and sufficiency of their application for various problem solving / E.V. Balakina, I.V. Sergienko, R.R. Sanzhapov // Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Springer, Cham, 2021. doi:10.1007/978-3-030-54814-8_2.
19. Balakina E.V. Forms of $\varphi_x - s_x$ - diagrams of an automobile tire / E.V. Balakina // Proceedings of 9th International Scientific Conference "Balttrib'2017", Aleksandras Stulginskis University Akademija, Kaunas, Lithuania, 16-17 November 2017. – 2018. – P. 110-116.
20. Jimenez E. Experimental investigation of the tractive performance of pneumatic tires on ice / E. Jimenez, C. Sandu // Tire Science and Technology. – 2020. – Vol. 48, No. 1. – P. 22-45.
21. Pacejka H.B. Tire and vehicle dynamics / H.B. Pacejka. – USA: Elsevier Ltd, 2012. – 672 p.
22. Prokop G. Physical understanding of transient generation of tire lateral force and aligning torque / P. Sarkisov, G. Prokop, J. Kubenz, S. Popov // Tire Science and Technology (USA). – 2019. – Vol. 47, No. 4. – P. 308-333.
23. Reza N. Jazar Vehicle Dynamics: Theory and Application. Springer Science + Business Media, LLC, 2008, 1015 p.
24. Balakina E.V. The calculation method of the length of contact of car tires with the road surface / E.V. Balakina, V.N. Zadvornov, D.S. Sarbaev, I.V. Sergienko, Y.N. Kozlov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 632: International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering (Irkutsk, Russia, 27 May – 1 June, 2019): Proceedings / Irkutsk National Research Technical University. – IOP Publishing, 2019. doi:10.1088/1757-899X/632/1/012022.
25. Viehweger M. Vehicle state and tyre force estimation: demonstrations and guidelines / M. Viehweger, C. Vasseur, S. van Aalst, M. Acosta, E. Regolin, A. Alatorre, V. Ivanov, A. Victorino // Vehicle System Dynamics. – 2021. – Vol. 59, № 5. P. 675-702. doi:10.1080/00423114.2020.1714672.
26. Zotov N.M. Using the $\varphi - s_x$ nomogram in calculating the dynamics of a braked wheel / N.M. Zotov, E. V. Balakina // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2007. – Vol. 36, No. 2. – P. 193-198.

Assessment of the Influence of Inclined Wheel Installation on the Vehicle Lateral Stability

Balakina E.V., Sarbaev D.S., Kochetov M.S.

Volgograd State Technical University
Volgograd, Russian Federation,
fahrgestell2011@yandex.ru

Abstract. The properties of active vehicle safety include: stability, controllability, braking dynamics. They are influenced by many design parameters of the chassis: unsprung weight, wheel radii, steering geometry, stiffness and damping of suspensions, tires, steering gear, machine configuration, etc. To improve these properties, the listed parameters are optimized or their on-board regulation is carried out. The search for control parameters is one of the important tasks of ensuring vehicle trajectory stabilization. This study relates to the field of vehicles wheels installation, namely, to the issue of their inclination angles in the transverse vertical plane and the influence of this angle on the tire properties and the performance properties of the vehicle. A cal-

culated assessment of the relationship between the inclined wheel setting and the vehicle stability in transverse sliding and lateral rollover is carried out. Approximate dependences are obtained to determine the influence of the wheel inclination angle on the indicated properties. Changing the vehicle stability when the wheels are inclined requires additional research.

Keywords: vehicle wheel, lateral vertical incline, lateral sliding stability, lateral rollover stability.

Исследование динамики рабочего процесса фрезерования асфальтобетона

Фурманов Д.В., Лысаков Н.Э., Шамахов Л.М.

ФГБОУ ВО Ярославский государственный технический университет
Ярославль, Российская Федерация
denisfurmanoff@yandex.ru

Аннотация. В процессе фрезерования асфальтобетона неизбежно возникают пульсирующие нагрузки на режущем элементе рабочего органа, характер и величина которых зависит от ряда факторов. Это, в свою очередь, вызывает ударные нагрузки на элементы привода дорожных машин и преждевременное разрушение узлов и деталей приводов и сварных соединений барабана. В статье приведены основные направления в исследовании процессов фрезерования асфальтобетона. Кроме того, в работе анализируются результаты экспериментальных исследований процесса резания асфальтобетона единичным режущим элементом. Описана методика проведения эксперимента. Представлены осциллограммы сил сопротивления резанию, полученные при резании асфальтобетона марок ЦМА-16, ЦМА – 20, А1, Б2, В3, МЗП. Рассчитаны динамические коэффициенты, и амплитудно-частотные характеристики импульсов сил резания. Отмечается, что амплитудные значения пульсаций сил сопротивления резанию превышают средние значения сил сопротивления резанию в несколько раз. На основании полученных результатов предложены конструктивные решения, направленные на увеличение надежности элементов рабочего органа и привода фрезерных машин.

Ключевые слова: асфальтобетон, фрезерование асфальтобетона, силы сопротивления резанию, режущий элемент, динамический коэффициент, дорожная машина.

ВВЕДЕНИЕ

Фрезерование асфальтобетона является дорогостоящей технологической операцией, важность которой трудно переоценить [1]. Являясь дисперснонаполненным композитом [2, 3], асфальтобетон проявляет комплекс сложных прочностных свойств как в процессе эксплуатации, так и в процессе разрушения рабочими органами дорожных фрез [4, 5]. В том числе, поэтому процесс фрезерования связан с большими затратами энергии. Для обеспечения требуемой производительности необходимо использовать машины, оснащаемые мощными двигателями внутреннего сгорания, потребляющими достаточно большое количество топлива. Совершенно очевидно, что работа этих машин не только требует больших капитальных и эксплуатационных затрат, но и вызывает загрязнение окружающей среды.

Решение указанных проблем требует совершенствования конструкции рабочих органов дорожных фрез, однако без тщательного изучения рабочего процесса сделать это не представляется возможным.

Совершенствование конструкций дорожных фрез идет по нескольким направлениям. Одним из них является определение сил сопротивления резанию для различных конструкций режущих элементов, типов материала, величин подачи. Эти нагрузки определяются эксперименталь-

ными [6, 7] и численными методами [8, 9]. На основании некоторых моделей, позволяющих определить силы сопротивления резанию, рассчитываются параметры машины в целом [10], а так же обосновываются параметры систем управления этими машинами [11, 12].

Отдельная группа работ направлена на обеспечение необходимого качества поверхности асфальтобетона после фрезерования [13] а так же оценке прочности асфальтобетона, расположенного ниже плоскости фрезерования [14]. Так как очень часто отфрезерованный асфальтобетон используется вторично, определенное внимание уделяется режимам фрезерования, направленным на сохранения целостной структуры наполнителя [15]. Огромную группу работ составляют материалы, посвященные изучению абразивного изнашивания режущего инструмента материалом [16].

Таким образом, учитывая продолжающийся интерес исследователей, несмотря на более чем полувековую историю существования машин для удаления асфальтобетона, рабочий процесс холодного фрезерования еще пока далек до совершенства.

ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Почти все выше перечисленные задачи невозможно решать без понимания процесса контактного взаимодействия материала с режущим элементом. Для полной схематизации процесса резания асфальтобетона необходимо знание законов развития сил сопротивления резанию, затрат энергии на режущем элементе и величин средней и максимальной сил сопротивления резанию, частоте пульсаций этих сил, направление силы резания.

Частично эти вопросы могут быть исследованы при использовании стенда с маятниковым рабочим органом. Такие конструкции успешно используются для определения энергии хрупкого разрушения при испытании металлов [17] и полимеров [18], определения энергоемкости процесса резания природных материалов - древесных отходов и торфа [19]. Имеется так же положительный опыт использования данных конструкций для определения энергоемкости процесса резания единичным режущим элементом фрезерной машины [20].

Применение такого метода возможно для определения энергоемкости процесса резания и среднего значения касательной составляющей силы резания. Исследование образцов на маятниковом стенде позволяет определить энергетические показатели процесса и, как следствие, определяет требуемую мощность привода и усредненное значение нагрузок на элементы привода и барабана. Еще одним бесспорным достоинством такого оборудования

является то, что оно позволяет максимально точно эмитировать работу режущего элемента в соответствии с работой режущего элемента на барабане фрезы, достигая требуемых скоростей резания с использованием реальных (не масштабируемых) режущих элементов.

Однако, этот метод не позволяет оценить величину пульсаций сил сопротивления резания, значение максимальных сил сопротивления резанию и направление силы сопротивления резанию на режущем элементе.

Так как подавляющее большинство конструкций фрезерных барабанов являются сварными, для обеспечения их гарантированной прочности особенно важной задачей является определение частоты импульсов и максимальное значение силы резания в процессе взаимодействия материала с режущим элементом. Определение этих закономерностей и является задачей настоящего исследования.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные задачи динамики резания асфальтобетона невозможно решать без данных, полученных при максимальном соответствии условий эксперимента реальному объекту. С этой целью разработана конструкция стенда с механическим приводом (рис. 1). Стенд представляет собой подвижный стол 2 перемещающийся относительно станины двигателем с винтовой передачей 1. На столе установлена плита 3 с горизонтальной степенью свободы и закрепленным на ней образцом материала 4. С другой стороны плита удерживается датчиком силы 8. При перемещении стола с материалом взаимодействует неподвижный резец 7, который через параллелограмную подвеску 6 передает реакцию на датчик силы 5. Таким образом, горизонтальная составляющая силы сопротивления резанию воспринимается датчиком 8, а вертикальная – датчиком 6. Питание на указанные тензометрические датчики подается от тензостанции 9, на нее же подается сигнал с датчиков. Обработанный цифровой сигнал передается в режиме реального времени на персональный компьютер и записывается в память устройства.

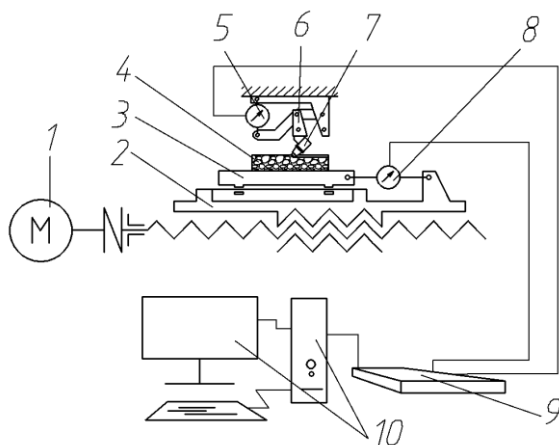


Рис. 1. Схема стенда для определения сил сопротивления резанию асфальтобетона единичным режущим элементом дорожной фрезы

Основой для стенда служит универсальный вертикально-фрезерный станок модели 6Р12П (рис. 2). Такое решение позволяет обеспечить высокую жесткость системы, точную регулировку величины подачи и толщины срезае-

мой стружки. Указанный метод позволяет определить характеристику пульсаций сил сопротивления резанию, вертикальную и горизонтальную составляющую силы резания.



Рис. 2. Общий вид стенда для исследования процессов резания асфальтобетона единичным режущим элементом дорожной фрезы

Датчики вертикальной и горизонтальной составляющих сил сопротивления резанию предварительно тарировались непосредственно на стенде электронным динамометром.

В результате проведения экспериментальных работ были получены осциллограммы составляющих сил сопротивления резанию (рис. 3) для различных марок асфальтобетонов.

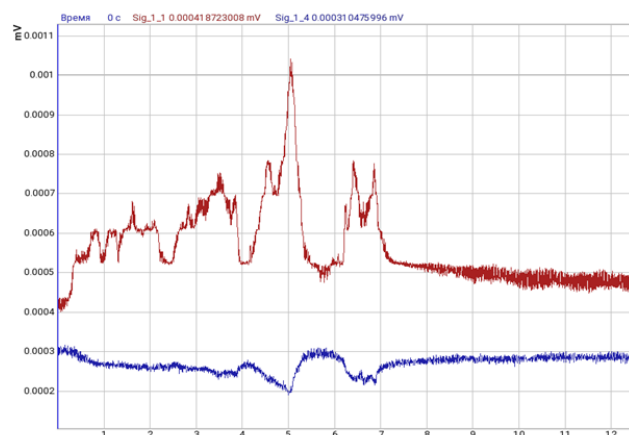


Рис. 3. Осциллограмма горизонтальной и вертикальной составляющих сил сопротивления резанию асфальтобетона марки В3 [21]

Выбранные образцы соответствовали наиболее часто используемым в строительстве дорог центральной части Российской Федерации маркам асфальтобетона. Выбраны образцы марок А1, В2, В3, МЗП [21], ЩМА-20 [22], ЩМА-16 [23]. Эксперимент проводился при температуре асфальтобетона 22 °С.

Полученные осциллограммы проходят фильтрацию и выбираются активные участки, которые характеризуют

процесс резания асфальтобетона. Далее, эти участки обрабатываются (рис. 4).

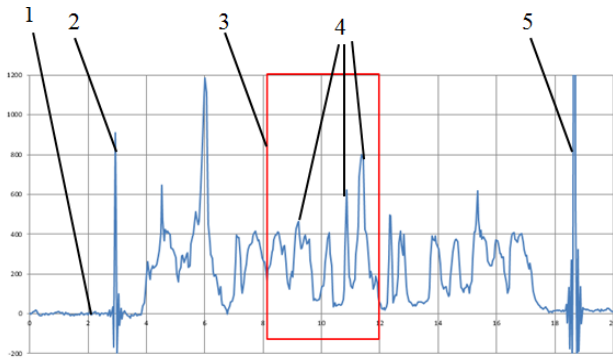


Рис. 4. Характерные зоны оциллограммы, рассматриваемые в ходе анализа результатов эксперимента

На оциллограммах можно выделить несколько характерных зон. Зона 1 соответствует нулевому значению составляющей силы сопротивления резанию, зона 2 представляет собой всплеск напряжения в цепи датчиков силы, возникающий в результате возникновения больших пусковых токов в цепи электродвигателя подачи стола. Зона 3 соответствует установившемуся движению стола в процессе резания асфальтобетона. В этой зоне учитываются несколько максимальных значений составляющих силы сопротивления резанию, образующих пики 4. Зона 5 обусловлена отключением электродвигателя и появлением всплеска напряжения, причина появления которого схожа с причиной появления зоны 2 указанной оциллограммы.

В результате обработки массива данных необходимо получить значение динамического коэффициента, который определяет расчетные нагрузки на элементы фрезерного барабана и привода для расчета на прочность.

С этой целью определяются динамические коэффициенты K_{di} для наблюдаемых пиковых значений нагрузки:

$$K_{di} = F_{max i} / F \quad (1)$$

где $F_{max i}$ – максимальное наблюдаемое значение силы сопротивления резанию, F – среднее значение силы сопротивления резанию на рассматриваемой области оциллограммы.

По полученным значениям динамических коэффициентов определяется его среднее значение K_d и среднеквадратичное отклонение по выборочной совокупности $\sigma(K_d)$.

Максимальное значение динамического коэффициента, которое следует принимать во внимание при проектировании новых машин, определяется по указанной зависимости:

$$K_{d max} = K_d + 3\sigma(K_d). \quad (2)$$

Полученное значение расчетного динамического коэффициента опирается на предположение, что вероятность того, что значение динамического коэффициента превысит его среднее значение на величину более чем утроенное значение среднеквадратичного отклонения, чрезвычайно мала [24].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Представленный на рисунке 5 график зависимости сил сопротивления резанию асфальтобетона от толщины сре-

заемой стружки отражает среднее значение горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию, а так же его максимальное значение и усредненное значение по пяти наибольшим импульсам.

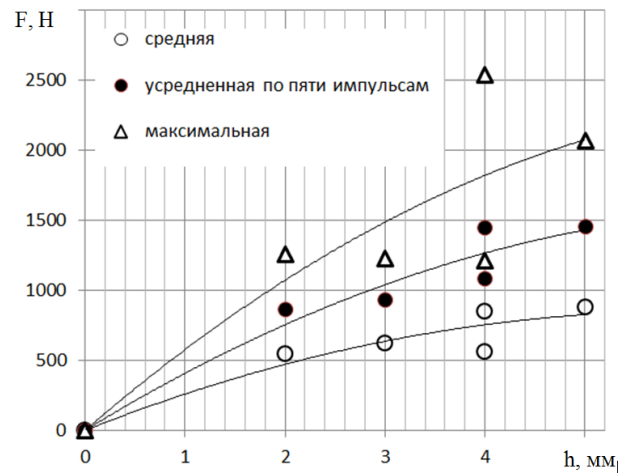


Рис. 5. Зависимости средней, максимальной и усредненной по пяти импульсам составляющих силы сопротивления резанию, полученные при испытании образца асфальтобетона марки ВЗ на стенде

Вместе с тем, установить какую-либо достаточно достоверную корреляционную зависимость динамического коэффициента от толщины срезаемой стружки не удалось (рис. 6), хотя видно, что для зернистых асфальтобетонов с более высокой прочностью каменной фракции этот показатель принимает более высокие значения. Очевидно, что этот показатель является случайной величиной, зависящий от структуры асфальтобетона.

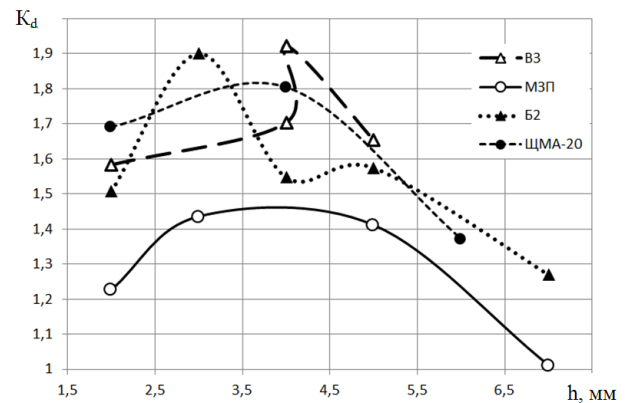


Рис. 6. Динамические коэффициенты, полученные на различных глубинах резания

Для того, чтобы в практических расчетах оборудования использовать значение динамических коэффициентов их необходимо разделить условно на два вида. Учитывая плотность распределения случайной величины динамического коэффициента, полученного в ходе анализа результатов эксперимента можно выделить два важных значения – первое значение K_d будет соответствовать среднему вероятному превышению сил сопротивления резанию. Второе значение $K_{d max}$ соответствует максимальному значе-

нию сил сопротивления резанию, которые могут представлять собой опасные нагрузки. Расчетные значения параметров K_d и $K_{d \max}$ представлены в таблице 1 для всех перечисленных выше асфальтобетонов.

Полученные значения коэффициентов могут быть рекомендованы для прочностного расчета элементов фрезерного барабана. Поскольку фрезерная дорожная машина может работать с асфальтобетонами различных марок, следует принимать наибольшие значения динамических коэффициентов.

Таблица 1

Результаты статистического анализа и расчета динамических коэффициентов сил сопротивления резанию асфальтобетонов некоторых марок

Марка асфальтобетона	Результаты статистической обработки		
	Среднее значение динамического коэффициента	Стандартное отклонение	Максимальное значение динамического коэффициента
A1	1,445	0,260	2,228
B2	1,567	0,372	2,674
B3	1,673	0,478	3,106
MЗП	1,340	0,505	2,854
ЩМА-20	1,622	0,655	3,587
ЩМА-16	1,542	0,572	3,258

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Асфальтобетон является сложным композитным материалом, и процесс его утилизации сопровождается чрезвычайно высокими эксплуатационными затратами. Поэтому, даже незначительное снижение энергоемкости фрезерования приводит к повышению эффективности оборудования. Однако, проектируя новые машины невозможно обойти вопрос динамических нагрузок, неизбежно возникающих на режущих элементах фрезерного барабана.

Экспериментально установлено, что для проектирования нового оборудования значение динамических коэффициентов должно соответствовать примерным значениям от 2,2 до 3,6 в зависимости от типа и марки асфальтобетона. Однако, несмотря на указанные рекомендации, выбор запаса прочности при проектировании оборудования остается за инженером, с учетом возможного появления новых материалов и режущих элементов в течение срока эксплуатации машины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wisdom B. The power of milling / B. Wisdom // Better Roads. – 1 October 2009.
2. Баженов Л. Механика и технология композиционных материалов: Научное издание / С. Л. Баженов. – Долгопрудный: Издательский дом "Интеллект", 2014. – 328 с.
3. Мэттьюз Ф. Композитные материалы. Механика и технология / Ф. Мэттьюз, Р. Ролингс. – М.: Техносфера, 2004. – 408 с.
4. Гезенцевей Л.Б. Дорожный асфальтобетон / Л.Б. Гезенцевей. – М.: Транспорт, 1976. – 336 с.
5. Рыбьев И.А. Строительные материалы на основе вяжущих веществ / И.А. Рыбьев. – М.: Высшая школа, 1978. – 309 с.

6. Кулепов В.Ф. Экспериментальное исследование нагрузок на дискофрезерном рабочем органе при вскрытии асфальтобетонных покрытий / В.Ф. Кулепов // Применение ЭВМ в проектировании и испытании машин и оборудования: Тезисы докладов и сообщений. Горьковская областная науч.-техн. конф. – Горький, 1983. – С. 27.

7. Бараташвили М.П. Определение влияющих факторов на режимы работы машины и их значение для разрушения поверхностных слоев асфальтобетонных покрытий // Научный электронный архив – URL: <http://econf.rae.ru/article/6606> (дата обращения: 11.02.2019).

8. Zhou L.Q. Computer simulation for the orthogonal milling process of asphalt concrete / L.Q. Zhou, Y.P. Li, H. Liu, G. Xing // Advanced Materials Research. – 2010. – Vol. 139-141. – P. 1014-1017. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.139-141.1014.

9. Шерстнев Н.С. Расчет мощности силовой установки дорожной фрезы / С.Д. Игнатов, Н.С. Шерстнев // Развитие дорожно-транспортного и строительного комплексов и освоение стратегически важных территорий Сибири и Арктики: вклад науки: Материалы Международной научно-практической конференции. – Омск: СибАДИ, 2014. – Кн. 2. – С. 79-81.

10. Wong J.Y. Theory of ground vehicles / J.Y. Wong. – New York: John Wiley & Sons, 2001. – P. 301-309.

11. Повышение эффективности рабочих органов и агрегатов дорожно-строительных машин: сб. науч. тр. Моск. автомоб.-дорож. ин-та (МАДИ). – М., 1984. – 126 с.

12. Кочетков А.В. Управление дорожной фрезой при ремонте колеи / А.В. Кочетков, Л.В. Янковский, Г.Н. Волков, Н.Е. Кокодеева, Д.И. Жунусов // Строительные и дорожные машины. – 2013. – № 3. – С. 39-41.

13. Gao L. Milled pavement texturing to optimize skid improvements / L. Gao, A. de Fortier Smit, J.A. Prozzi, P. Buddhavarapu, M. Murphy, L. Song // Construction and Building Materials. – 2015. – Vol. 101, Part 1. – P. 602-610. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.077.

14. Diouri K. A study on the effect of milling on stress distributions in asphalt pavements / K. Diouri, R. Bousselham, A. De, A. Hera, T. El-Korchi, R.B. Mallick // C. Raab (eds) Proceedings of the 9th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements—Mairepav9. Lecture Notes in Civil Engineering. – Springer, Cham, 2020. – Vol. 76. – P. 953-964. doi:10.1007/978-3-030-48679-2_89.

15. Wu J. Milling process simulation of old asphalt mixture by discrete element / J. Wu, D. Li, B. Zhu, C. Wu // Construction and Building Materials. 2018. – Vol. 186. – P. 996-1004. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.08.015.

16. Бибииков В.Н. Влияние механических свойств асфальтового бетона на износ режущего инструмента при его фрезеровании / В.Н. Бибииков, Н.Н. Тарбаев, В.Ф. Кулепов // Тр. Горьковского политехнического института. – Горький, 1975. – Т. 31, в. 8. – С. 11-14.

17. ГОСТ 4647-2015. Пластмассы. Методы определения ударной вязкости по Шарпи. Введены с 20.11.2015. – М.: Стандартинформ 2017.

18. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. Введены с 17.04.78. – М.: Издательство стандартов, 1994.

19. Самсонов Л.Н. Фрезерование торфяной залежи / Л.Н. Самсонов. – М.: Недра, 1985. – 211 с.

20. Фурманов Д.В. Экспериментальное определение сил сопротивления резанию при разрушении асфальтобетона единичным режущим элементом / Д.В. Фурманов, В.С. Чижов, Н.Э. Лысаков / Научный рецензируемый журнал "Вестник СибАДИ". – 2020. – Т. 17, № 2. – С. 196-207.

21. ГОСТ 9128-2009. Смеси асфальтобетонные, дорожные и аэродромные и асфальтобетон. Технические условия. Введены с 1.01.2009. – М.: Стандартинформ, 2010.

22. ГОСТ 31015-2002. Смеси асфальтобетонные и асфальтобетон щебеночно-мастичные. Технические условия

(с поправкой). Введены с 01.05.2003. – М.: Госстрой России, ГУП ЦПП. – 2003.

23. ГОСТ Р 58406.1-2020. Дороги автомобильные общего пользования. Смеси щебеночно-мастичные асфальтобетонные и асфальтобетон. Технические условия. Введены 01.06.2020. – М.: Стандартинформ, 2020.

24. Власов К.П. Методы исследования и организация экспериментов / под. ред. проф. К.П. Власова. – Х.: Изд-во Гуманитарный Центр, 2013. – Изд. второе, перераб. и дополн.– 412 с.

Study of Asphalt Milling Workflow Dynamics

Furmanov D.V., Lisakov N.E., Shamachov L.M.

Yaroslavl State Technical University

Yaroslavl, Russian Federation

denisfurmanoff@yandex.ru

Abstract. During milling asphalt, there are inevitable pulsating loads that impact the cutting element of the working unit, the nature and magnitude of which depends on a number of factors. This, in turn, causes shock loads on road machine drive elements and premature failure of drive units and welded joints of a drum. The paper presents the main directions in the research of asphalt concrete milling processes. In addition, it contains the results of experimental studies of asphalt concrete cutting process by a single cutting element. The paper also includes a description of the experiment. It contains oscillograms of cutting resistance forces obtained while cutting asphalt concrete of grades SMA-16, SMA-20, A1, B2, B3, MZP. It also presents calculations of dy-

amic coefficients and amplitude-frequency parameters of cutting force impulses. It is noted that the pulsation amplitudes of cutting resistance forces greatly exceed the averages for cutting resistance forces. Based on the study results, the paper offers substantial solutions aimed to increase the reliability of elements of a working unit and a drive of milling machines.

Keywords: asphalt concrete, asphalt concrete milling, cutting resistance forces, cutting element, dynamic factor, road machine.

Моделирование отображения различных режимов колебаний вальца системами непрерывного контроля уплотнения грунта вибрационными катками

Тюремнов И.С., Морев А.С.

Ярославский государственный технический университет
Ярославль, Российская Федерация
tyuremnovis@yandex.ru, asmorev@bk.ru

Аннотация. Для обеспечения экспресс-контроля качества уплотнения грунта вибрационными катками не только в отдельных точках взятия проб, а по 100% площади уплотнения, современные вибрационные катки оснащаются системами непрерывного контроля качества уплотнения. В основу функционирования систем непрерывного контроля уплотнения грунта вибрационными катками положен расчет показателей CMV, RMV и CCV и других. В статье приводятся результаты вычислительного эксперимента сравнительной эффективности показателей CMV, RMV и CCV по сравнению с новым предложенным показателем CV. В результате вычислительного эксперимента по трехмассной реологической модели установлено, что показатель CV, при обособленном выборе влияющих коэффициентов, обладает высокой чувствительностью к изменению свойств грунта при уплотнении вибровальцем катка в режиме колебаний “частичный отрыв” и индицирует переход колебаний в нежелательный режим “двойной прыжок”. Однако в режиме “постоянный контакт” показатель CV нечувствителен к изменению свойств грунта, как и показатели CMV, RMV и CCV. Дальнейшие исследования целесообразно осуществлять в направлении уточнения численных значений коэффициентов, влияющих на рассчитываемое значение показателя CV при уплотнении различных видов грунтов различными вибрационными катками, проведении полевых экспериментальных исследований, а также совершенствования математической модели взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым грунтом.

Ключевые слова: грунт, уплотнение, вибрация, каток вибрационный, контроль уплотнения непрерывный, критерий уплотнения, Continuous Compaction Control.

ВВЕДЕНИЕ

Уплотнение грунтов является одной наиболее эффективных технологий повышения их прочности и устойчивости к действию климатических факторов и механических нагрузок. Технологический процесс строительства грунтовых сооружений на уплотненных грунтах включает в себя отсыпку грунта слоем заданной толщины, уплотнение слоя вибрационными катками и профилирование поверхности автогрейдерами. При этом вибрационные катки реализуют функцию уплотнения за счет движения по слою грунта и воздействию на него собственным весом и генерируемой вибрацией. Требуемое количество проходов катка при уплотнении каждого слоя зависит от вида грунта, толщины слоя, требуемой плотности (прочности) грун-

та и характеристик катка (массы, размеров вальца, частоты и вынуждающего усилия вибрации, а также скорости движения) и составляет обычно от 6 до 20 проходов. Данная операция имеет хорошие предпосылки для автоматизации и роботизации благодаря сравнительной простоте, повторяемости, достаточно больших размерах строительной площадки и её изолированности. Однако обеспечение качества уплотнения грунта зависит от правильного выбора массы катка, параметров вибрации и скорости движения. Изменение свойств грунта на каждом проходе приводит к тому, что при возрастании плотности грунта вибрационный валец работает в различных режимах колебаний. На первых проходах катка колебания носят безотрывной характер (в каждом цикле колебаний валец не отрывается от грунта). Такой режим принято называть “постоянный контакт” (“continuous contact”) [1-3] (рис. 1). После нескольких проходов валец переходит в режим “частичный отрыв” (“partial uplift”), при котором в каждом цикле колебаний происходит отрыв вальца от грунта, с последующим восстановлением контакта, причем амплитуда колебаний вальца в каждом цикле колебаний одинакова (рис. 1). Далее, по мере уплотнения грунта, колебания могут переходить в нежелательный режим “двойной прыжок” (“double jump”), при котором амплитуды последовательных отскоков вальца от грунта не одинаковы и возрастают пиковые значения нагрузок на элементы вальца (рис. 1). Свойства грунта могут изменяться случайным образом по длине и ширине полосы движения катка в пределах одного прохода, поскольку в пределах одного слоя может изменяться вид и влажность отсыпаемого грунта. При определенных грунтовых условиях, из-за несимметричного приложения вынуждающей силы вибровозбудителя относительно центра тяжести вибровальца, а также при движении с частичным перекрытием следа от предыдущего прохода, когда правая и левая кромки вальца будут находиться на грунте с различной степенью уплотнения, может возникать режим “раскачивания” (“rocking motion”) с нежелательными поперечными колебаниями вальца [1-4]. Эти особенности послужили причиной появления систем непрерывного контроля уплотнения (Continuous Compaction Control или, сокращенно, CCC) [2, 5-6], которые в режиме реального времени регистрируют изменение свойств грунта в процессе уплотнения, а также могут сигнализировать о переходе вибровальца катка в

нежелательные режимы колебаний “двойной прыжок” (“double jump”) и “раскачивания” (“rocking motion”).

Движение вальца	Контакт с грунтом	Режим работы	Характер колебаний	Работа с ССС	Плотность	Скорость катка	Амплитуда
Периодическое	Постоянный контакт	Постоянный контакт		Да	Низкая ↓ Высокая	Быстро ↑ Медленно	Низкая ↓ Высокая
		Периодический отрыв от грунта		Да			
	«Двойной прыжок»		Да				
	Раскачивание		Нет				
Хаотическое	Непериодический отрыв	Хаотическое движение		Нет			

Рис. 1. Влияние свойств грунта и режима работы вибрационного катка на реализуемые режимы колебаний вибровальца [1]

Применение систем непрерывного контроля уплотнения (ССС) также позволяет выполнять важную функцию документирования результатов уплотнения. При наличии на катке системы высокоточного позиционирования, наложение на траекторию движения катка данных о текущем состоянии материала позволяет формировать “карту плотности” участка работ для обнаружения недоуплотненных участков, обеспечения 100 % контроля всей площади участка и документирования полученного результата [5-7].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Различные производители вибрационных катков используют системы непрерывного контроля уплотнения, функционирующие по различным принципам [2, 3, 5-6, 8-12].

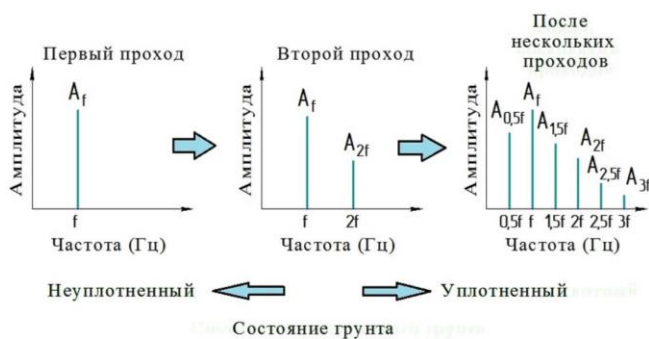


Рис. 2. Изменение спектра вертикальных ускорений вибровальца вибрационного катка в процессе уплотнения грунта [12]

Наиболее широкое распространение получили системы, основанные на принципе спектрального анализа вертикальной составляющей ускорения вибрационного вальца и расчете некоторых показателей по значениям амплитуд различных гармоник спектра вертикальных ускорений вибрационного вальца (рис. 2).

Компании DYNAPAC, VOLVO и некоторые другие устанавливают на свои вибрационные катки системы непрерывного контроля уплотнения, функционирующие на основе расчета показателей CMV и RMV [5-7]. Компания SAKAI использует параметр CCV [5-6]:

$$CMV = C \cdot A_{2f} / A_f; \quad (1)$$

$$RMV = BV = C \cdot A_{0,5f} / A_f; \quad (2)$$

$CCV = (A_{0,5f} + A_{1,5f} + A_{2f} + A_{2,5f} + A_{3f}) / (A_{0,5f} + A_f) \cdot 100\%$, (3) где $A_{0,5f}$, A_f , $A_{1,5f}$, A_{2f} , $A_{2,5f}$, A_{3f} - соответственно, амплитуда гармоники спектра вертикальных ускорений вибрационного вальца на частотах $0,5f$, f , $1,5f$, $2f$, $2,5f$, $3f$ (рис. 2); f - частота колебаний вибрационного вальца, Гц.

Системы непрерывного контроля уплотнения должны быть максимально чувствительными к изменению свойств грунта в режиме “частичный отрыв”, являющимся основным режимом работы вибрационного вальца катка в процессе уплотнения, и реагировать на переход колебаний в нежелательный режим “двойной прыжок” [1-3].

Для совершенствования существующих показателей ССС, основанных на анализе спектра вертикальных ускорений вибрационного вальца, в Ярославском государственном техническом университете предложен [13] показатель CV, являющийся модификацией показателей CMV, RMV и CCV:

$$CV = K \cdot (K_{0,5f} \cdot A_{0,5f} + K_{1,5f} \cdot A_{1,5f} + K_{2f} \cdot A_{2f} + K_{2,5f} \cdot A_{2,5f} + K_{3f} \cdot A_{3f}) / (K_{0,5f} \cdot A_{0,5f} + K_f \cdot A_f), \quad (4)$$

где K - общий тарифовочный коэффициент; $K_{0,5f}$, K_f , $K_{1,5f}$, K_{2f} , $K_{2,5f}$, K_{3f} - соответственно, коэффициенты значимости амплитуд гармоник спектра вертикальных ускорений вибрационного вальца на частотах $0,5f$, f , $1,5f$, $2f$, $2,5f$, $3f$.

Для предварительной проверки эффективности предложенного показателя CV в сравнении с существующими (CMV, RMV и CCV) необходима разработка математической модели взаимодействия вибрационного вальца с грунтом и проведение вычислительных и натурных экспериментов.

Для анализа сравнительной эффективности показателя CV, была разработана математическая модель взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым грунтом и проведен вычислительный эксперимент. В качестве математической модели была использована трёхмассная реологическая модель [14] (рис. 3), содержащая раму вальца массой m_f , вибрационный валец массой m_d к которому прикладывалось гармонически изменяющееся вынуждающее усилие $P\sin(\omega t)$ и присоединенный грунт с массой m_s .

Амортизаторы вальца моделировались элементами упругого сопротивления (с коэффициентом k_f) и вязкого сопротивления (с коэффициентом b_f). Наряду с массой присоединенного грунта, при расчете сопротивления грунта деформированию учитывались упругие и вязкие силы сопротивления, зависящие от значений коэффициентов упругого k_s и вязкого b_s сопротивления грунта.

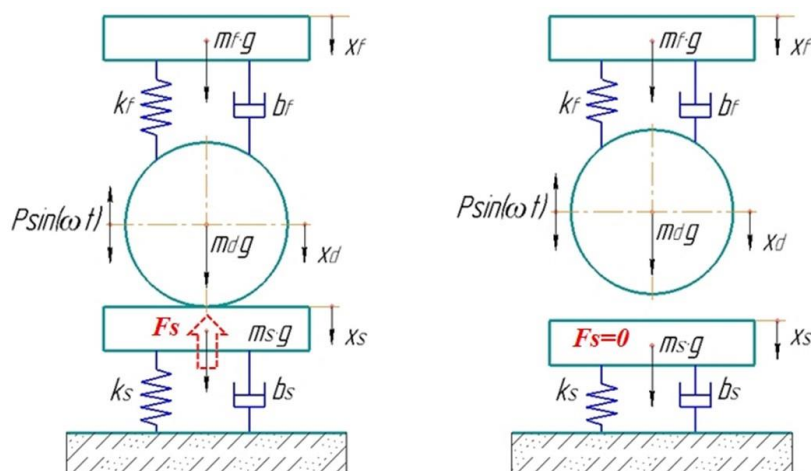


Рис. 3. Трёхмассная реологическая модель взаимодействия вибрационного вальца катка с грунтом [14]

РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве вибрационного катка был взят каток DM-614 компании “Завод “Дорожных машин” с параметрами: $m_d=4000$ кг; $m_f=4000$ кг; $P=215$ кН; $k_f=7.240$ МН/м (для 20 амортизаторов модели У150.030 [18]); $b_f=6,148$ кН·с/м [19]; $\omega=188,4$ рад/с. Масса присоединенного грунта рассчитывалась как $m_d=0,2m_d$ [19-20]. Коэффициент вязкого сопротивления грунта принимался постоянным и равным $b_s=212$ кН·с/м [19].

Верификация результатов моделирования перемещений и ускорений вибровальца катка DM-614 с результатами полевых экспериментальных исследований [20] показала адекватность воспроизведения моделью колебаний вибровальца катка.

После оценки корректности воспроизведения математической моделью значений вертикальных ускорений вибрационного вальца и спектров вертикальных ускорений вибрационного вальца с учетом результатов полевых экспериментальных исследований [20], на разработанной математической модели был проведен вычислительный эксперимент по расчету значений параметров CMV, RMV, CCV и CV (рис. 4).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Вычислительный эксперимент показал, что предложенный показатель CV для систем непрерывного контроля уплотнения обладает высокой чувствительностью к

особенностью разработанной математической модели [14] являлась возможность моделировать взаимодействие вальца с грунтом не только в режиме “постоянный контакт” (рис. 3, а), рассматриваемый в большинстве работ аналогичного характера (например, [15-17]), но и режимы с периодическим отрывом вальца от грунта (режимы “частичный отрыв” и “двойной прыжок”) (рис. 3, б). Для моделирования движения элементов системы “рама-валец-грунт” в безотрывном и отрывном режимах, были составлены дифференциальные уравнения движения всех элементов системы для фазы контакта вальца с грунтом и отрыва от грунта, а также условия начала отрыва вальца от грунта и последующего восстановления контакта [14]. Численное решение дифференциальных уравнений производилось в программе MatLab Simulink.

изменению свойств грунта в процессе уплотнения при работе в режиме “частичный отрыв”, являющийся основным режимом работы современных вибрационных катков. При этом показатель CV реагирует на переход колебаний вальца в режим “двойной прыжок” (см. рис. 4). В то же время, в режиме “постоянный контакт” показатель CV не чувствителен к изменениям свойств грунта, как и показатели CMV и CCV. Это обусловлено тем, что в режиме “постоянный контакт” в спектре ускорений присутствует всего одна гармоника (на частоте f) и расчет по формулам (1)-(4) не приводит к изменению значений показателей CV, CMV, RMV и CCV.

Следует отметить, что результаты расчета значений показателя CV существенным образом зависят от обоснования численных значений коэффициентов K , $K_{0,5f}$, K_f , $K_{1,5f}$, K_{2f} , $K_{2,5f}$, K_{3f} , входящих в формулу (4).

Обоснование численных значений вышеуказанных коэффициентов для различных моделей вибрационных катков и видов грунта требует дальнейших исследований.

Разработанная математическая модель позволяет не только моделировать работу системы непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков, но и решать задачи проектирования и модернизации вибрационных катков, например, обоснования характеристик и количества амортизаторов крепления вибрационного вальца к раме [21]. В то же время, использованная реологическая модель не позволяет учитывать накопление не-

обратимых деформаций грунта и имеет потенциал совершенствования

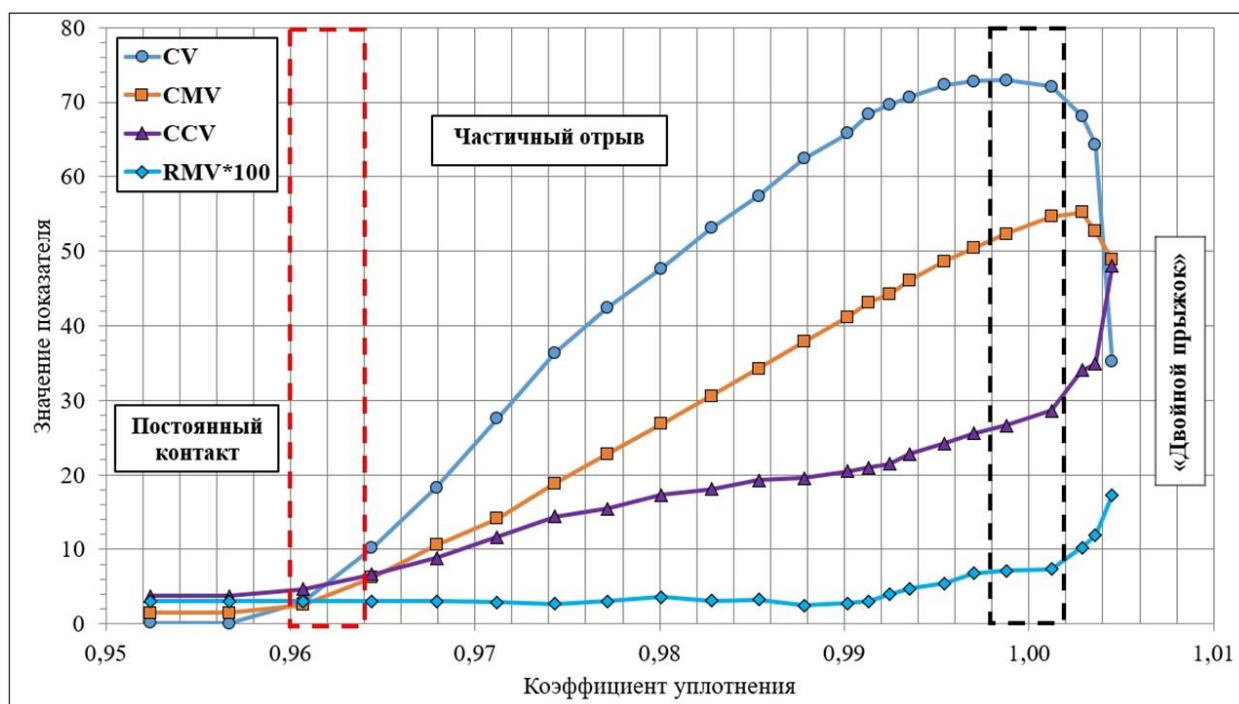


Рис. 4. Результаты расчета значений показателей CV, CMV, RMV и CCV при работе вибрационного катка в различных режимах

Выводы и заключение

Для решения задач повышения качества уплотнения грунтов вибрационными катками, необходимо совершенствование систем непрерывного контроля, конструкций вибрационных вальцов и алгоритмов управления режимами уплотнения грунта с учетом изменяющихся свойств грунта и условий производства работ.

Разработанный показатель CV для систем непрерывного контроля уплотнения грунта вибрационными катками обладает высокой чувствительностью к изменению свойств грунта в режиме «частичный отрыв», позволяет обнаруживать переход колебаний в нежелательный режим «двойной прыжок». Однако, в режиме «постоянный контакт» показатель CV нечувствителен к изменению свойств грунта.

Дальнейшее развитие разработанной математической модели и предложенного показателя CV для систем непрерывного контроля уплотнения грунтов вибрационными катками целесообразно вести в направлении дополнения реологической модели элементами, учитывающими накопление необратимых деформаций грунта при уплотнении, а также уточнения численных значений коэффициентов K , $K_{0,5f}$, K_f , $K_{1,5f}$, K_{2f} , $K_{2,5f}$, K_{3f} , входящих в формулу расчета показателя CV при уплотнении различных видов грунтов вибрационными катками разных моделей и в различных режимах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Adam D. Operational devices for compaction optimization and quality control (continuous compaction control & light falling weight device) / D. Adam, F. Kopf // Proceedings of the International Seminar on Geotechnics in Pavement and

Railway Design and Construction. – Athens, Greece. – 2004. – P. 97-106.

2. Mooney M.A. Vibratory roller integrated measurement of earthwork compaction: an overview / M. Mooney, D. Adam // Seventh International Symposium on Field Measurements in Geomechanics. – 2004. – P. 1-12.

3. Тюрёмнов И.С. Обзор систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков. Часть 3. Особенности функционирования и «интеллектуальное уплотнение» / И.С. Тюрёмнов // Вестник ТОГУ. – 2016. – №2(41). – С. 115-122.

4. Facas N.W. Influence of rocking motion on vibratory roller-based measurement of soil stiffness / N.W. Facas, P.J. van Susante, M.A. Mooney // Journal of Engineering Mechanics. – 2010. – Vol. 136, № 7. doi:10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000132.

5. Mooney M.A. Intelligent soil compaction systems / M.A. Mooney, R.V. Rinehart, N.W. Facas, O.M. Musimbi // National Cooperative Highway Research Program 676. – Washington, D.C., 2010.

6. Тюрёмнов И.С. Обзор систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков. Часть 1 / И.С. Тюрёмнов, А.С. Морев // Вестник ТОГУ. – 2015. – Т. 4, № 39. – С. 99-108.

7. Dynapac Documentation System. Soil Compaction 3492 0033 01 – URL: <http://www.dynapac.com/en-us/Products/?product=663&cat=36> (дата обращения 02.01.2021).

8. Тюрёмнов И.С. Обзор систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков. Часть 2 / И.С. Тюрёмнов, А.С. Морев // Вестник ТОГУ. – 2015. – Т. 1, № 40. – С. 69-76.

9. Thurner H. Continuous compaction control, CCC / H. Thurner, A. Sandstrom // European Workshop Compaction of Soils and Granular Materials. – Presses Ponts et Chaussées, Paris, France. – 2000. – P. 237-246.

10. Vennapusa P.K.R. Geostatistical analysis for spatially referenced roller-integrated compaction measurements / P.K.R. Vennapusa, D.J. White, M.D. Morris // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 2010. – P. 813-822.

11. White D.J. A review of roller-integrated compaction monitoring technologies for earthworks / D.J. White, P.K.R. Vennapusa // Final Report ER10-04 – URL: http://www.intrans.iastate.edu/reports/White%20and%20Vennapusa%202010_FHWA%20IC%20Lit%20Review.pdf (дата обращения 02.01.2021).

12. Scherocman J.A. Intelligent Compaction, Does It Exist? [Электронный ресурс] / J. A. Scherocman, S. Rakowski, K. Uchiyama. // Intelligent Compaction – URL: http://www.intelligentcompaction.com/downloads/PapersReports/Saikai_Jim%20Scherocman_IC%20Does%20it%20Exist_C_TAA_2007.pdf (дата обращения: 05.12.16).

13. Тюремнов И.С. Новый показатель для систем непрерывного контроля уплотнения грунта вибрационными катками / И.С. Тюремнов, А.С. Морев // Пром-Инжиниринг: труды V Всероссийской научно-технической конференции. – 2019. – С. 128-132.

14. Тюремнов И.С. Системы непрерывного контроля уплотнения грунта вибрационными катками: монография / И.С. Тюремнов, А.С. Морев. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2019. – 172 с.

15. Yoo T.S. Dynamics of vibratory-roller compaction / T.S. Yoo, E.T. Selig // Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 105 (GT10). – 1979. – P. 1211-1231.

16. Савельев С.В. Методика обоснования режимов работы дорожных катков с учётом массы уплотняемого грунта в зоне активного действия вибрации / С.В. Савельев, Г.Г. Бурый // Строительные и дорожные машины. – 2015. – № 3. – С. 48.

17. Тарасов В.Н. Влияние массы вертикального пригруза на колебания вибровальца при уплотнении материалов / В.Н. Тарасов, И.В. Бояркина, Г.Н. Бояркин, В.С. Серебренников // Динамика систем, механизмов и машин. – 2019. – Т. 7, № 1. – С. 168-176.

18. Тюремнов И.С. Экспериментальное определение численных значений коэффициента упругого сопротивления сдвигу амортизаторов У150.030 для вибрационных катков / И.С. Тюремнов, Д.В. Фёдорова, А.С. Морев, Н.Е. Тарасова // Механизация строительства. – 2017. – № 4. – С. 42-45.

19. Van Susante P.J. Capturing nonlinear vibratory roller compactor behavior through lumped parameter modeling / P.J. van Susante, M.A. Mooney // Journal of Engineering Mechanics ASCE. – 2008. – P. 684-693.

20. Тюремнов И.С. К вопросу обоснования значения присоединённой массы грунта при реологическом моделировании процесса уплотнения грунта вибрационным катком / И.С. Тюремнов, А.С. Морев, Д.В. Фурманов // Проблемы машиноведения. Материалы III Международной научно-технической конференции. – Омск, 2019. – С. 215-223.

21. Тюремнов И.С. К обоснованию влияния количества амортизаторов на характеристики колебаний вальца и рамы вибрационного катка / И.С. Тюремнов, Д.В. Федорова, А.С. Морев // Пром-Инжиниринг: труды V Всероссийской научно-технической конференции. – 2019. – С. 150-155.

Simulation of Different Vibration Modes of a Drum in Continuous Compaction Control Systems of Soil by Vibratory Rollers

Tyuremnov I.S., Morev A.S.
Yaroslavl State Technical University
Yaroslavl, Russian Federation
tyuremnovis@yandex.ru, asmorev@bk.ru

Abstract. Modern vibratory rollers are equipped with systems of Continuous Compaction Control to quickly monitor the quality of soil compaction by vibratory rollers not only at individual points of sampling, but over the whole compaction area. The operation of the Continuous Compaction Control systems of vibratory rollers is based on the calculation of CMV, RMV, CCV, and other indicators. The paper presents the results of a computational experiment on the comparative performance of CMV, RMV, and CCV compared to the newly proposed Compaction Value. As a result of computational experiment on the three-mass rheological model, it was found that this CV, with a reasonable choice of influencing factors, has a high sensitivity to changing

the properties of soil during compaction by vibratory drum in Partial Uplift mode and indicates the transition of vibrations in the undesirable Double Jump mode. At the same time, CV is insensitive to changes in soil properties in Constant Contact mode, as are CMV, RMV, and CCV. Further studies should clarify the values of factors influencing the calculated CV for various types of soil compacted by different vibratory rollers, conduct field experiments, as well as improve the simulation of interaction between vibratory roller and the compacted soil.

Keywords: soil, compaction, vibration, vibratory roller, compaction criterion, Continuous Compaction Control.

Некоторые особенности измерения динамических характеристик объектов тяжелого машиностроения в процессе эксплуатации в условиях Крайнего Севера

Комшин А.С., Сеница М.О., Тумакова Е.В.

МГТУ им. Н.Э. Баумана
Москва, Российская Федерация
tumakova_ekaterina@bmstu.ru

Аннотация. С 2019 года в РФ и в мире активно развиваются исследования Арктической зоны. Очевидным является тот факт, что особую актуальность сегодня приобретает разработка технологий по созданию и внедрению не просто возобновляемых источников энергии, а именно ВИЭ, способных функционировать в условиях Арктики. Существенным фактором, который может оказывать негативное влияние на ВИЭ, кроме сурового климата, является космическая погода. В работе приводится анализ влияния геоиндуцированных токов на работу традиционных электростанций и ветроэлектростанций, проведен корреляционный анализ экспериментальных данных, полученных на одном из турбоагрегатов Сургутской ГРЭС-1 и данных об АЕ-индексе, характеризующем интенсивность авроральных токов, для установления взаимосвязи между функционированием электромеханических систем и геомагнитными возмущениями. Проанализированы факторы, приводящие к неисправностям на объектах ВИЭ, а также на объектах традиционной электроэнергетики.

Ключевые слова: Возобновляемые источники энергии, геоиндуцированные токи, измерительный комплекс, тяжелое машиностроение

ВВЕДЕНИЕ

С 2019 года в РФ и в мире активно развиваются исследования Арктической зоны. Следует упомянуть Arctic Strategy Congress Department of Defense, программы *Sustainable Development in the Arctic*, *Arctic Contamination Action Program* и др.

В России в 2019 году была принята государственная программа «Развитие энергетики», срок реализации планируется до 2024 года. Целью программы является два аспекта:

1. максимальное содействие социально-экономическому развитию страны, что играет значимую роль в формировании доходов бюджета РФ;
2. укрепление и сохранение позиций Российской Федерации в мировой энергетике.

Для достижения поставленной цели требуется ускоренный переход к более эффективной, гибкой и устойчивой энергетике [1].

Помимо указанной выше программы в 2020 году Указом Президента РФ от 26 октября 2020 г. № 645 была утверждена стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопас-

ности на период до 2035 года. В этой стратегии среди прочего в качестве основных опасностей, вызовов и угроз, формирующих риски для развития Арктической зоны и обеспечения национальной безопасности выделена высокая доля локальной генерации электроэнергии на основе использования экономически неэффективного и экологически небезопасного дизельного топлива.

Очевидным является тот факт, что особую актуальность сегодня приобретает разработка технологий по созданию и внедрению не просто возобновляемых источников энергии, а именно ВИЭ, способных функционировать в условиях Арктики.

С другой стороны, по данным GWEC¹ Global Wind Report [2]:

- суммарная мощность всех ветроэнергетических установок в мире в настоящее время превышает 651 ГВт;
- доля офшорной ветроэнергетики от общего количества новых установок также стала рекордной и составила 10 % [3].

На этом фоне резко возрастает потребность в инновационных решениях в области информационно-метрологического обеспечения и измерительных технологий, которые способствуют переходу от мониторинга к прогнозированию оценки технического состояния основного и вспомогательного оборудования в области тяжелого машиностроения в процессе эксплуатации и энергетики [4, 5].

На современном этапе научного и технологического развития созданы все условия для реализации на новом метрологическом уровне интеллектуальных измерительных комплексов поддержки жизненного цикла сложных технических систем с применением интеллектуальных измерительных систем обучения и искусственного интеллекта, учитывающих не только технологические факторы (внутренние), но и внешние (гелиогеофизические, геомагнитные, ионосферные и сейсмические измерения). В подобных условиях возникает необходимость достижения уровня информационно-метрологического обеспечения техносферы, соответствующего требованиям ее развития в условиях четвертой промышленной революции.

В последнее десятилетие начался новый этап изучения воздействия космоса на различные сферы деятельности

¹ GWEC – Глобальный совет по ветроэнергетике, <https://gwec.net/gwec-over-60gw-of-wind-energy-capacity-installed-in-2019-the-second-biggest-year-in-history/>

человека. Космическая погода, под которой понимается комплекс процессов, происходящих на Солнце и в космосе, создает прямые риски для нормального функционирования природных, технологических и биологических систем, находящихся на Земле и в околоземном космическом пространстве.

С одной стороны, Арктические регионы России имеют значительный потенциал для развития ВЭУ. Средняя скорость ветра во многих районах составляет порядка 6–7 м/с, что способствует развитию, в частности, ветроэнергетики. Однако с другой стороны выступают суровые климатические условия Арктики, для которых характерны очень низкие температуры, порывистые ветры, и, как следствие, минимум обслуживания [6-8].

Ещё одним существенным фактором, который может оказывать негативное влияние на ВИЭ, является космическая погода. Исследование ее влияния на техносферу – одно из развивающихся направлений в науке. До сих пор не изучены последствия, к которым могут приводить изменения магнитного поля Земли, в отношении электромеханических систем.

Территория Арктики находится в так называемой авроральной зоне. Авроральная зона — это полоса широт, на которых регистрируются самые мощные магнитные возмущения и самые яркие полярные сияния. Авроральная зона в России и Северной Европе в основном проходит над Северным Ледовитым океаном [9].

Источником геомагнитных бурь является солнечный ветер. Его образуют заряженные частицы, испускаемые Солнцем. Во время шторма в космической погоде магнитосферно-ионосферная система становится сильно нарушенной, содержащей интенсивные и быстро меняющиеся потоки. Возникает так называемая авроральная зона (авроральная электроструя) – электрический ток в области аврорального овала, направленный на запад в ночные и утренние часы, на восток – в вечерние. И согласно закону индукции Фарадея, на поверхности Земли индуцируется геоэлектрическое поле. Это геоэлектрическое поле создает геоиндуцированные токи (ГИТ) в наземных технологических сетях [10]. ГИТ является квазипостоянным током. Продолжительность протекания по электросетям когда-либо зафиксированных ГИТ колеблется от сотен секунд до десятков часов. А самое большое зафиксированное значение ГИТ составляет 320 А [11]. Подобные токи способны приводить к негативным последствиям для объектов электроэнергетики. В работах [12-16] приводятся описания зафиксированных аварий на электрических сетях, произошедших по причине возникновения в них ГИТ.

СОСТОЯНИЕ ОТРАСЛИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ

В работе [17] представлен анализ развития области ветроэнергетики и гидроэнергетики в РФ и обоснована возможность применения измерительной фазохронометрической технологии для объектов возобновляемой энергетики, таких как ветроустановки и гидроагрегаты.

Согласно данным исследований ветряных турбин и времени их простоя (исследовалось более 24000 ветряных турбин, результаты опубликованы Durham University) было установлено, что частота отказов на одну ветроустановку составляет от 0,2 до 0,5, а наибольшее количество отказов наблюдается у ответственных конструктивных частей, среди них следует отметить [17,18]:

- электрические системы;

- системы управления;
- гидравлические системы;
- флюгерная система управления;
- лопасти ветроустановки;
- редукторы и коробки передач;
- генератор и др.

Из результатов исследований следует, что электрические системы имеют наибольшую частоту отказов и выход из строя коробок передач приводит к наиболее длительным простоям, в то же время отказы редукторов, поломки лопастей и отказы трансмиссии приводят к 95 % простоев оборудования.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕДУКТОРОВ И ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Как отмечалось, в работе [17] приведены результаты экспериментальных исследований в зависимости от типа износа зубчатых колес и результатов измерения величины износа в полярных координатах.

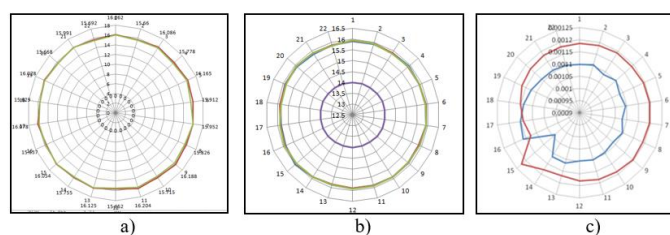


Рис. 1. Результаты измерений соответствующих зубьев зубчатых колес в зависимости от типа износа в полярных координатах: по окружности – номер зуба, по оси ординат – результат измерения размера зуба по делительной окружности

Точность измерения износа зубьев в пределах $\pm 0,15\%$. При этом очевидно, что изменения величины ЭДС при естественном износе рабочей поверхности зуба будут плавными, а все объёмные изменения типа выкрашивания или поломки зуба будут давать скачкообразные изменения ЭДС датчика. На рисунке 1 (с) представлен пример диагностирования поломки 15-го зуба зубчатого колеса.

На рисунке 2 представлен график изменения измерительного сигнала генераторной катушки индукционного датчика во времени в зависимости от износа зуба.

Измерительные информационные фазохронометрические технологии позволяют решать следующие задачи:

- контроль параметров естественного абразивного износа рабочих поверхностей зубьев, их возможного выкрашивания;
- контроль поломки зубьев;
- измерение износа зубьев в режиме эксплуатации;
- оценка параметров зубчатого зацепления;
- оценка работы редуктора (коробки передач и т.п.).

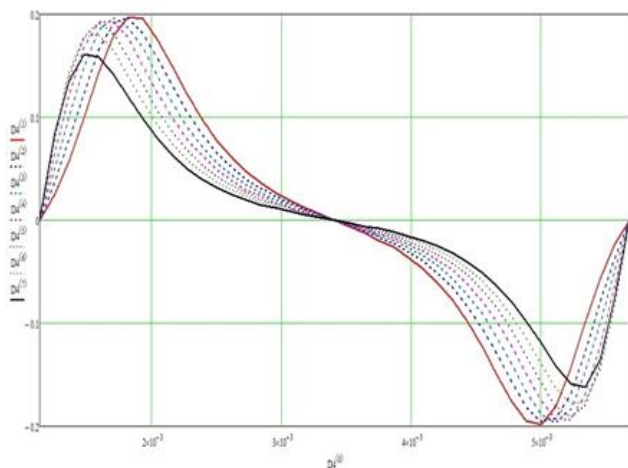


Рис. 2. График изменения измерительного сигнала генераторной катушки индукционного датчика во времени в зависимости от износа зуба

Для получения достоверной информации о работе подшипника необходим системный подход, включающий:

- разработку методов испытаний, построенных на единых научных принципах для всех этапов жизненного цикла объекта;
- применение минимальной номенклатуры измеряемых физических величин;
- создание единого методологического подхода к оценке текущего технического состояния опор качения.

Проблемой являются дорогостоящие испытания подшипников, особенно крупногабаритных, берущихся от промышленной партии. В связи с этим стоит задача разработки методов исследования подшипников и методик ускоренных испытаний. Испытания сопровождают все этапы жизненного цикла подшипников, а сложившееся неудовлетворительное положение в отработке конструкций связано с недостаточностью научных знаний и низкого метрологического уровня традиционных методов и средств диагностики.

Обобщенная функция изменения временных интервалов роликового подшипника качения представлена путем ввода для всех роликов связи между изменением угла вращения с соответствующим ему изменением интервала времени:

$$\Delta T_n = f(\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2, \Delta\varphi_3, \dots, \Delta\varphi_n, \Delta N_n, \Delta F_n), \quad (1)$$

где n – количество тел качения, $\Delta\varphi$ – приращение угла положения центра тел качения относительно центра колец подшипника, ΔN – дополнительная нагрузка, связанная с функционированием подшипника качения (ПК) (например, для буксового подшипника воздействие при прохождении стрелки колесной парой).

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ТЯЖЕЛОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Для установления взаимосвязи между функционированием электромеханических систем и геомагнитными возмущениями был проведен корреляционный анализ экспериментальных данных, полученных на одном из турбоагрегатов Сургутской ГРЭС-1 и данных об АЕ-индексе, характеризующем интенсивность авральных токов. АЕ-

индекс используется при исследовании геомагнитной активности в высоких широтах и широко используется в качестве характеристики изменения геомагнитной обстановки в целом [19, 20].

Для рассмотрения были выбраны данные в периоды времени, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Рассматриваемые периоды времени

Дата	Время
15.06.2010	02:00 – 02:50
15.06.2010	16:00 – 16:50
15.06.2010	22:00 – 22:50
16.06.2010	00:00 – 00:50
16.06.2010	02:00 – 02:50
16.06.2010	04:00 – 04:50
16.06.2010	14:00 – 14:50
16.06.2010	16:00 – 16:50
17.06.2010	08:00 – 08:50
17.06.2010	12:00 – 12:50
17.06.2010	14:00 – 14:50

Экспериментальные данные, полученные на одном из турбоагрегатов Сургутской ГРЭС-1, представляют собой интервалы времени, полученные с помощью фазохронометрической системы, разработанной в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Значения АЕ-индекса хранит и обрабатывает Мировой центр в Японии [19]. Вид данных из этого центра, показан на рис. 3.

DATE	TIME	D0Y	AE	AU	AL	A0	
16,06,2010	0:01:00	167	443,00	198,00	-245,00	-24,00	
16,06,2010	0:02:00	167	437,00	184,00	-253,00	-35,00	
16,06,2010	0:03:00	167	446,00	182,00	-264,00	-41,00	
16,06,2010	0:04:00	167	469,00	188,00	-281,00	-47,00	
16,06,2010	0:05:00	167	457,00	181,00	-276,00	-48,00	
16,06,2010	0:06:00	167	430,00	170,00	-260,00	-45,00	
16,06,2010	0:07:00	167	437,00	165,00	-272,00	-54,00	
16,06,2010	0:08:00	167	468,00	164,00	-304,00	-70,00	

Рис. 3. Данные из Мирового центра в Киото, Япония

В качестве критериев при проведении корреляционного анализа используются критерий Пирсона, Кендалла, Фехнера и др. Одним из ключевых ограничений при использовании того или иного коэффициента корреляции является необходимость того, чтобы совокупность значений всех факторных и результативных признаков подчинялась многомерному нормальному распределению.

В данной работе были рассмотрены коэффициенты корреляции Спирмена и Кендалла. Было установлено, что корреляция и по Спирмену и по Кендаллу наблюдается 16.06.2010 в период времени с 02:00 до 02:50, а также 17.06.2010 в период времени с 14:00 до 14:50. Значения коэффициентов корреляции приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов корреляции

16.06.2010, 02:00 до 02:50		17.06.2010, 14:00 до 14:50	
Коэффициент корреляции Спирмена	Доверительная вероятность	Коэффициент корреляции Спирмена	Доверительная вероятность
-0,383	P = 0,994	-0,387	P = 0,994
16.06.2010, 02:00 до 02:50		17.06.2010, 14:00 до 14:50	
Коэффициент корреляции Кендалла	Доверительная вероятность	Коэффициент корреляции Кендалла	Доверительная вероятность
-0,252	P = 0,990	-0,267	P = 0,993

При проектировании ВИЭ для условий Арктической зоны необходимо учитывать все основные факторы, при-

водящие к неисправностям на объектах электроэнергетики в настоящее время. Для этого был проведен анализ аварий на теплоэлектростанциях за 2019 год – с одной стороны, и анализ аварий на ветроэлектростанциях в период с 1980 по 2013 годы – с другой стороны.

Выбор теплоэлектростанций в качестве объекта для анализа обусловлен тем, что на долю теплоэлектростанций в 2019 году пришлось около 70 % от всей выработанной в Российской Федерации электроэнергии. В результате этого анализа было установлено, что все аварии можно разделить между тремя группами влияющих факторов [21]. К таким группам были отнесены следующие:

- ошибки обслуживающего персонала;
- дефекты в электрической части;
- дефекты в механической части.

В табл. 3 показаны неисправности, выявленные в ходе анализа аварий на теплоэлектростанциях.

Таблица 3

Неисправности в работе теплоэлектростанций

Ошибки обслуживающего персонала	Дефекты в электрической части	Дефекты в механической части
Неверное соединение витков обмотки статора (обмотка соединена не звездой, а треугольником)	Напряжение на зажимах двигателя ниже номинального, вследствие чего двигатель при номинальной мощности перегружен током	Дефекты ротора (внезапное изменение вибрации подшипниковых опор турбогенератора вследствие обрыва пера лопатки)
Неправильно соединены контакты одной фазы; одна или несколько катушек «перевёрнуты»	Обрыв в одной фазе сети или внутренний обрыв в обмотке статора	Обрыв шпильки горизонтального разъема корпуса цилиндра среднего давления
Механический дисбаланс турбины после замены лопаток и дефекта сборки муфт (причина относится к двум группам)	Короткое замыкание в обмотке статора	Механический дисбаланс турбины после замены лопаток и дефекта сборки муфт (причина относится к двум группам)

В ходе анализа аварий на ветроэлектростанциях было установлено, что все аварии можно разделить на следующие категории [22]:

- аварии, случившиеся из-за несоблюдения техники безопасности при обслуживании ветрогенератора;
- аварии, связанные с природными явлениями. Такие аварии могут быть вызваны природными катаклизмами:
 - молнии
 - тайфуны
 - ураганы
 - обледенение
 - эрозия и т.п.
- аварии, возникшие из-за плохого контроля и монтажа на производстве.

РЕАЛИЗАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ОБЪЕКТОВ ТЯЖЕЛОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Рассмотрим более подробно все уровни реализации подобной системы. Основными элементами построения подобной системы должны стать:

- единый подход и концепция в рамках отраслевой принадлежности и типовых конструкторских решений (теплоэлектроэнергетика, гидроэнергетика, Ж/Д транспорт, авиация,

металлургическая промышленность, нефте- и газодобыча и т.п.);

- реализация измерительной (приборной части системы), обеспечивающий требуемый уровень точности в зависимости от исследуемого объекта и процессов в нем;
- реализация комплексного подхода к информационному метрологическому обеспечению объектов на уровне одного производственного звена (участок-цех-завод, гидроагрегат-машинный зал – станция и др.) с передачей информации в аналитические центры принятия решений;
- реализации Единой централизованной системы мониторинга и диагностики поддержки объектов машиностроения в условиях цифровой экономики.

На рисунке 4 представлен пример реализации измерительного комплекса объектов тяжелого машиностроения в условиях крайнего Севера.

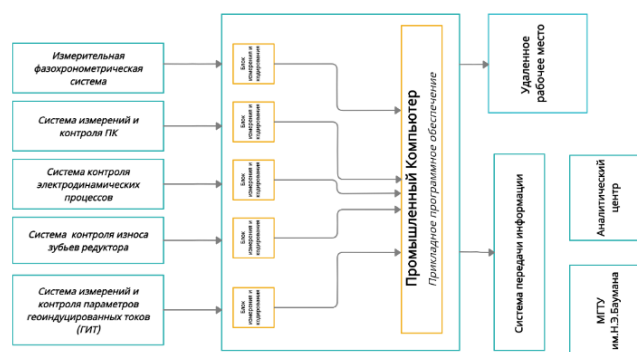


Рис. 4. Схема измерительного комплекса для объектов тяжелого машиностроения в условиях крайнего Севера

Измерительный комплекс содержит измерительные фазохронометрическую систему, систему измерений и контроля ПК, систему контроля электродинамических процессов, систему контроля износа зубьев редуктора, систему измерений и контроля параметров геоиндуцированных токов (ГИТ). На рисунке 5 представлена динамическая схема измеряемых характеристик ветрогенератора с использованием систем, входящих в измерительный комплекс.

Важными составляющими комплекса является реализация передачи измерительной информации как на удаленное рабочее место на станции, научный центр обработки (МГУ им. Н.Э. Баумана) и аналитический центр принятия решений [23, 24].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проектировании новых ВИЭ для Арктической зоны необходимо учитывать особенности этой зоны. К основным особенностям Арктической зоны можно отнести суровый климат и геомагнитные возмущения. Проанализировав аварии и их причины на традиционных электростанциях и ветроэлектростанциях, было установлено отсутствие в качестве официальных причин геомагнитных бурь или их частного проявления – ГИТ.

Согласно полученным результатам, общим фактором, приводящим к неисправностям, как на объектах традиционной электроэнергетики, так и ВИЭ, являются ошибки персонала, возникающие при обслуживании

энергоустановок. Для условий Арктической зоны – этот фактор является особенно важным, ввиду минимального обслуживания персоналом.

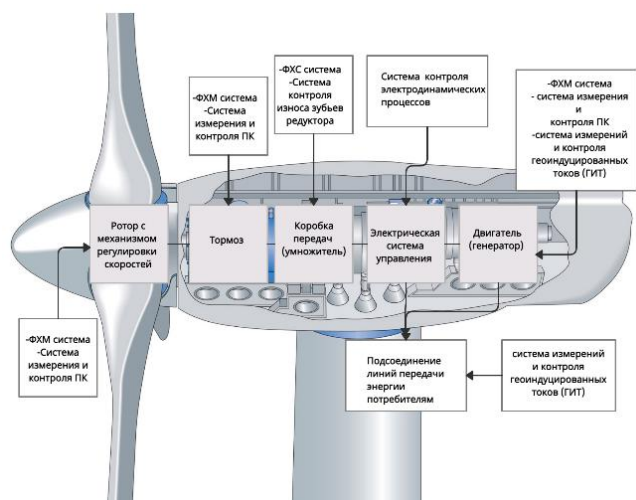


Рис. 5. Динамическая схема измеряемых характеристик ветрогенератора

ЛИТЕРАТУРА

1. Государственная программа Российской Федерации "Развитие энергетики" – URL: <https://minenergo.gov.ru> (дата обращения 13.09.2020).
2. <https://gwec.net/gwec-over-60gw-of-wind-energy-capacity-installed-in-2019-the-second-biggest-year-in-history/> (дата обращения 01.02.2021).
3. Burtsev S.A. Challenges in development of wind energy in russia / S.A. Burtsev, A.S. Komshin // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2019. doi: 10.1109/ICIEAM.2019.8743088.
4. Kiselev M.I. Technical diagnostics functioning machines and mechanisms / M.I. Kiselev, V. I. Pronyakin, A.K. Tulekbaeva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – Vol. 312, No. 1. – 012012. doi: 10.1088/1757-899X/312/1/012012.
5. Boldasov D.D. Method of lathe tool condition monitoring based on the phasechronometric approach / D.D. Boldasov, A.S. Komshin, A.B. Syritskii // Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2020. – Vol. 641. – P. 753-762. doi: 10.1007/978-3-030-39225-3_82.
6. Бердин В.Х. Возобновляемые источники энергии в изолированных населенных пунктах Российской Арктики / В.Х. Бердин, А.О. Кокорин, Г.М. Юлькин, М.А. Юлькин. – М.: WWF, 2017. – 80 с.
7. Minaev V. Oil-and-gas-bearing territories in the Arctic: New models for finding and clarifying boundaries / V. Minaev, Y. Starozuk, R. Stepanov, A. Faddeev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 539, № 1. – 012147. doi: 10.1088/1755-1315/539/1/012147.
8. Лазутин Л. Влияние магнитных бурь на техносферу и эффект смещения северного магнитного полюса – URL: <https://trv-science.ru/2012/07/17/vozdzejstvие-magnitnykh-bur-na-tekhnosferu-i-ehffekt-smeshheniya-severnogo-magnitnogo-polyusa/> (дата обращения 01.02.2021).
9. Romash M.E. A new passive-active method of protection from dynamic vortex atmospheric structures: physical

foundations, technical and economic advantages / M.E. Romash, A.Y. Varaksin, M.V. Protasov // International Journal of Engineering Research and Technology. – 2021. – Vol. 13, № 12. – P. 4134-4138.

10. Pirjola R. Space weather effects on electric power transmission grids and pipelines / R. Pirjola, A. Vilijanen, A. Pulkkinen et al. // Effect of Space Weather on Technology Infrastructure. – Amm. GeoForschungsZentrum Potsdam. – Germany, 2004. – P. 235-256.

11. Tumakova E.V. Development of a system for monitoring the state of electromechanical objects taking into account the influence of magnetic storms / E.V. Tumakova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 747, № 1. – 012133. doi: 10.1088/1757-899X/747/1/012133.

12. Potapov K.G. The computational models of measurement parameters for electromechanical energy systems with the application of neurodiagnostics / K.G. Potapov, E.V. Tumakova, O.V. Ummanova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 971. doi: 10.1088/1757-899X/971/4/042038.

13. Авакян С.В. Роль космических факторов в энергетической и экологической безопасности / С.В. Авакян, Н.А. Воронин // Академия энергетики. – 2011. – № 6 (44). – С. 28-35.

14. Кузнецов В.А. Обнаружение геоиндуцированных токов и их мониторинг в системах электроснабжения: дисс. ... канд. техн. наук. – Тольятти, 2014. – 148 с.

15. Pulkkinen A. Statistics of extreme geomagnetically induced current events / A. Pulkkinen, R. Pirjola, A. Viljanen // A Space Weather. – 2008. – № 6(7). doi: 10.1029/2008SW000388.

16. Воробьев А.В. Статистические взаимосвязи вариаций геомагнитного поля, аврорального электроджета, и геоиндуцированных токов / А.В. Воробьев, В.А. Пилипенко, Я.А. Сахаров, В.Н. Селиванов // Солнечно-земная физика. – 2019. – Т. 5, № 1. – С. 48-58.

17. Komshin A.S. Monitoring system of hydro and wind power equipment based on intelligent measuring complexes and Neurodiagnostics / A.S. Komshin, K.G. Potapov, A.B. Syritsky, A.E. Fomin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 971. – 022055. doi:10.1088/1757-899X/971/2/022055.

18. Anishchanka Y.V. Investigation of minimum laser ignition energies of combustible gas mixtures / Y.V. Anishchanka, E.Y. Loktionov, V.D. Telekh // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Vol. 1115, No. 4. – 042020.

19. <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir> (дата обращения 28.01.2011).

20. Гаврилов Б.Г. О применимости планетарных и стационарных индексов геомагнитной активности / Б.Г. Гаврилов, И.А. Ряховский, И.Э. Маркович, А.Н. Ляхов, Д.В. Егоров // Гелиогеофизические исследования. – 2016. – № 15. – С. 42-48.

21. Buzoverov E.A. Ensuring the quality of power supply to industrial enterprises using universal power converters / E.A. Buzoverov, A.Y. Varaksin, K.K. Denshchikov // International Journal of Engineering Research and Technology. – 2019. – Vol. 12, № 12. – P. 2683-2686.

22. Wind turbine accident compilation – URL: <https://fliphtml5.com/dqsm/kcam/basic> (дата обращения 25.10.2020)].

23. Komshin A.S. Measurement control of the degradation of the properties of the structural materials of shaft lines / A.S. Komshin, O.V. Medvedeva // Meas Tech. – 2014. – Vol. 57. – P. 526-532. doi:10.1007/s11018-014-0491-3/.

24. Kiselev M.I. The system of information and metrological support of the country's energy facilities based on satellite grouping / M.I. Kiselev, A.S. Komshin, V.A. Matveev // Science-Intensive Technologies. – 2017. – Vol. 18, № 6. – P. 68-72.

Some Features of Measurements of Dynamic Characteristics of Heavy Machinery Objects during Operation in the Far Northaper

Tumakova E.V.

Bauman MSTU

Moscow, Russian Federation

tumakova_ekaterina@bmstu.ru

Abstract. Since 2019, arctic studies are actively developing in Russia and the world. It is obvious that the development of technologies to create and implement not just renewable energy sources, namely renewable energy sources capable of operating in the Arctic, is becoming particularly relevant today. Space weather is a significant factor that can have a negative impact on renewable energy, in addition to the harsh climate. The paper provides an analysis of the impact of geo-induced currents on the operation of traditional power plants and wind farms. It has conducted a correlation analysis of experimental data obtained from one of the turbines of Surgut GRES-1 and data on the AE index,

characterizing the intensity of Auroral currents, to establish the relationship between the functioning of electromechanical systems and geomagnetic disturbances. The factors leading to malfunctions at renewable energy facilities, as well as at traditional electricity facilities, have been analyzed.

Keywords: renewable energy sources, geo-induced currents, measuring complex, heavy engineering.

Анализ плавности хода колёсных бесподвесочных машин в различных условиях эксплуатации

Поздеев А.В., Рябов И.М., Тимошин Н.В.

Волгоградский государственный технический университет

Волгоград, Российская Федерация

pozdeev.vstu@gmail.com, rjabov1603@mail.ru, titan_34rus@mail.ru

Аннотация. Данная статья посвящена анализу плавности хода колесных бесподвесочных машин в различных условиях эксплуатации на основе экспериментальных исследований, полученных НАТИ и другими научно-исследовательскими организациями. Приведены графики зависимостей средних квадратичных вертикальных и горизонтальных ускорений, для трех уровней норм по стандарту ISO 2631-1:1997. Выявлено, что виброзащитные свойства пневматических шин являются очень низкими из-за узкой по ширине частотной зоны и очень крутого резонанса. Для анализа плавности хода бесподвесочных машин приведены уровни вертикальных средних квадратичных виброускорений в 1/3 октавных полосах частот для тракторов ЮМЗ, МТЗ-50, К-700, Т-150К, Т-40, а также экспериментальные значения частот их собственных колебаний. Выявлено, что отечественные колесные тракторы во всех рассмотренных условиях эксплуатации могут совершать резонансные колебания на шинах. Поэтому плавность хода отечественных колесных тракторов неудовлетворительна, средние квадратичные значения вертикальных ускорений остовов отечественных тракторов до 4,5 раз выше допустимого уровня.

Ключевые слова: колесная бесподвесочная машина, условия эксплуатации, плавность хода, частота колебаний.

ВВЕДЕНИЕ

Проведенные авторами исследования [1-5] показывают, что колёсные бесподвесочные машины (КБМ) имеют низкую плавность хода и многие потенциальные технико-эксплуатационные показатели (ТЭП) этих машин, заложенные при проектировании (скорость движения, производительность, устойчивость и управляемость движения, топливная экономичность) в различных условиях эксплуатации в полной мере не реализуются. При движении эти машины испытывают значительные вибрации, раскачиваются, их колебания затухают очень медленно. Поэтому, даже при наличии поддресоренных сидений и движении со скоростью ниже расчетной, не обеспечивается соблюдение норм вибронегруженности оператора, как при выполнении ими основных технологических операций на полях, так и при выполнении транспортных работ на дорогах [6-11]. Оператор для уменьшения действующей на него вибрации, а также для обеспечения безопасности движения, вынужден снижать скорость движения машины, что ухудшает топливную экономичность, уменьшает производительность и эффективность ее использования. Колебания сельскохозяйственных машин, работающих на полях, увеличивают давление шин на почву, что снижает урожайность. При длительном воздействии вибрации, у

операторов машин часто возникают профессиональные заболевания – деформации позвоночника, опущение желудка и др., что снижает престижность их профессии. В работе [12] отмечается, что при переходе на первую ступень повышения рабочих скоростей машинно-тракторных агрегатов (до 6...9 км/ч) условия труда на колесных тракторах МТЗ-50, Т-40, Т-74 и др. значительно ухудшились, и трактористы не могли без вреда для здоровья в полной мере реализовать мощности, заложенные в эти машины. Проведенные медицинскими организациями клинические обследования механизаторов показали, что около 50% механизаторов страдает заболеваниями, причинно-связанными с работой на машинах.

АНАЛИЗ ПЛАВНОСТИ ХОДА КОЛЁСНЫХ БЕСПОДВЕСОЧНЫХ МАШИН В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ.

В работе [13] отмечено, что недопустимо применение виброопасных машин и выполнение работ, если вибрация, действующая на человека в течение 8-ми часового рабочего дня, превышает заданные нормы. Общепринятым параметром для оценки плавности хода машин в настоящее время являются средние квадратичные ускорения. Они измеряются в абсолютных единицах (в м/с^2) и относительных единицах децибелах (дБ). Для второго варианта используется следующая зависимость:

$$L = 20 \lg(\ddot{z}_c / \ddot{z}_0), \quad (1)$$

где $\ddot{z}_0 = 0,000314 \text{ м/с}^2$ – ускорение порога чувствительности.

Для более точной оценки зависимости допустимых значений виброскоростей и виброускорений от частот колебаний октавные полосы делятся на 1/3-октавные. Для этого диапазон частот, составляющих октавы, разделяют на три составляющих и средние геометрические значения каждой третьоктавной полосы частот округляют.

В стандарте [14] приведены допустимые значения виброускорений для уровня предельно допустимой утомляемости, превышение которого при длительности действия вибраций в течение 8-ми часов опасно для здоровья, т.к. приводит к профессиональным заболеваниям.

Для получения заданной нормы уровня допустимой утомляемости оператора, не приводящего к снижению производительности труда, значения нормы для уровня предельно допустимой утомляемости уменьшают в 2 раза или на 6 дБ. Для получения нормы уровня комфорта, обеспечивающего возможность чтения, письма и употребления пищи во время движения, нормативные средне-квадратичные ускорения уровня предельно допустимой утомляемости уменьшают в 6,3 раза или на 16 дБ. В

настоящее время норма уровня комфорта для КБМ желательна, но не применяется, вследствие отсутствия технических возможностей ее соблюдения.

Анализ данных, представленных в [14], показывает, что наиболее опасной является полоса частот от 4 до 8 Гц. Минимальное значение ускорений для уровня допустимой утомляемости составляет $0,315 \text{ м/с}^2$ или $0,032 \text{ g}$.

С течением времени воздействия вибрации утомляемость человека накапливается, поэтому, если в течение рабочего дня оператор подвергается вибрации одного и того же уровня с перерывами, то общее время воздействия определяют как сумму отдельных периодов [15].

При интегральной частотной оценке плавности хода КБМ используют допустимые уровни вибрации II уровня (обеспечение производительной работы) при длительности воздействия в течение рабочего дня (480 мин): $[\ddot{z}_c] = 0,54 \text{ м/с}^2$; $[\ddot{x}_c] = [\ddot{y}_c] = 0,38 \text{ м/с}^2$ [13].

Для определения степени увеличения допускаемых ускорений $[\ddot{z}_T]$ при уменьшении продолжительности воздействия вибраций T относительно 8-ми часов удобно пользоваться формулой:

$$[\ddot{z}_T] = \delta [\ddot{z}_{8ч}], \quad (2)$$

где δ – коэффициент увеличения допускаемых ускорений при уменьшении продолжительности воздействия вибраций от 8-ми часов. Зависимость коэффициента увеличения допускаемых ускорений при уменьшении продолжительности воздействия вибраций от 8-ми часов по стандарту ISO 2631-1:1997 приведена в [16].

Поскольку у КБМ единственными элементами, защищающими их остова от вибрации, возникающей в результате наезда колес на неровности дороги, являются пневматические шины, то представляют интерес экспериментальные исследования, выявляющие особенности их виброзащитных свойств. В работе [2] были проведены испытания колебаний шины трактора «Беларусь» с грузом массой 700 кг, установленной на виброплощадку динамического стенда [17, 18]. Привод стенда позволял виброплощадке совершать гармонические колебания с различной частотой в диапазоне 1-5 Гц и амплитудой 15 мм (рис. 1 а). В результате испытаний колеса получили амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) размахов колебаний груза на шине при различном начальном давлении воздуха в шине (рис. 1 б).

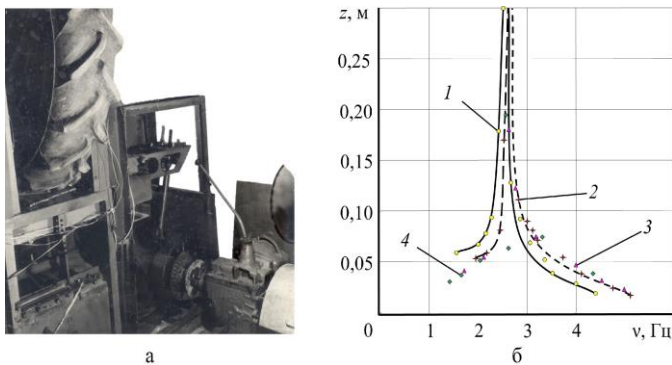


Рис. 1. Вид шины трактора «Беларусь» на динамическом стенде (а) и АЧХ размахов колебаний груза массой 700 кг на шине при различном давлении (б): 1 – $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$; 2 – $p_0 = 0,15 \text{ МПа}$; 3 – $p_0 = 0,20 \text{ МПа}$; 4 – $p_0 = 0,26 \text{ МПа}$

Анализ АЧХ размахов колебаний груза на шине (рис. 1 б) позволяет сделать следующие выводы об особенностях виброзащитных свойств пневматической шины:

1) размахи колебаний массы на шине при приближении частоты колебаний виброплощадки к области резонанса резко увеличивается (более чем в 10 раз), шина при колебаниях отрывается от виброплощадки вследствие низких демпфирующих свойств в материале шины и отсутствия демпфирующих свойств у сжатого воздуха внутри шины;

2) зона резонанса весьма узкая, ее ширина около 0,5 Гц, она мало зависит от давления в шине, при повышении давления все АЧХ смещаются вправо;

3) смещение АЧХ при изменении давления весьма мало, например, при снижении давления в шине в 2,6 раза (с 0,26 МПа до 0,10 МПа), АЧХ смещается влево только на 8 %, т.е. снижением давления в шине до допустимого уровня не дает необходимого снижения ее жесткости и частоты собственных колебаний остова КБМ.

В работе [2] также отмечена еще одна особенность поведения шины при испытании на стенде: интенсивность роста и величина размахов колебаний массы на шине увеличивается при повышении давления в ней. Поэтому для получения зарезонансной части АЧХ при высоком давлении в шине (0,20-0,26 МПа) использовался метод быстрого прохождения частоты возмущения, соответствующей области резонанса, для исключения поломки стенда.

Таким образом, виброзащитные свойства пневматических шин являются очень низкими из-за узкого по ширине зоны и очень крутого резонанса, поэтому при анализе плавности хода КБМ представляет интерес оценка вероятности этого явления в различных условиях эксплуатации. Для этого выполним сопоставление частотного воздействия неровностей пути с собственными частотами колебаний кузова КБМ на шинах при выполнении транспортных работ на дорогах и основных технологических операций на полях.

В работе [19] отмечается, что плавность хода отечественных и зарубежных колесных тракторов неудовлетворительна, поскольку средние квадратичные значения (СКЗ) вертикальных ускорений остовов отечественных тракторов составляют $0,25 \text{ g}$, т.е. в 4,5 раза выше допустимого уровня. Зарубежные колесные тракторы имеют еще более низкую плавность хода, на их сиденьях СКЗ вертикальных ускорений составляют $0,30 \text{ g}$, т.е. в 5,5 раза выше допустимого уровня. Эти данные подтверждаются результатами измерений вертикальных ускорений на серийном сиденье и на полу кабины тракторов МТЗ-50, МТЗ-52, МТЗ-82, Т-40, Т-150К, проведенными при скорости движения 10...12 км/ч на одном агрофоне [20]. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Анализ данных табл. 1 свидетельствуют о том, что для тракторов МТЗ-50, МТЗ-52, МТЗ-82, Т-40, Т-150К средние квадратичные ускорения на сиденьях на 15-25% выше, чем на полу кабины. Нормы вибронгруженности оператора превышены на 209,3-518,5 %, поэтому время допустимой работы этих тракторов находится в пределах 0,5-2,0 ч. (по графику зависимости коэффициента увеличения допускаемых ускорений δ при уменьшении продолжительности воздействия вибраций от 8-ми часов по стандарту ISO 2631-1:1997, представленному в [16]).

Экспериментальные данные вибронгруженности колесных тракторов при скорости движения 10...12 км/ч на одном агрофоне

Трактор	Место измерения вибрации	СКЗ ускорений, доли «g»	СКЗ ускорений, м/с ²	Превышение нормы	Коэффициент динамичности $K = \sigma_{сид} / \sigma_{ост}$
				$\Delta = \left(\frac{\sigma - \sigma_n}{\sigma_n} \right) \cdot 100\%$, %	
МТЗ-50	сиденье	0,34	3,34	518,5	1,21
	пол кабины	0,28	2,75	409,3	
МТЗ-52	сиденье	0,32	3,14	481,5	1,23
	пол кабины	0,26	2,55	372,2	
МТЗ-82	сиденье	0,26	2,55	372,2	1,13
	пол кабины	0,23	2,26	318,5	
Т-40	сиденье	0,25	2,45	353,7	1,25
	пол кабины	0,20	1,96	263,0	
Т-150К	сиденье	0,21	2,06	281,5	1,23
	пол кабины	0,17	1,67	209,3	

Для определения частот, на которых уровни вертикальных средних квадратичных виброускорений в 1/3 октавных полосах частот превышают норму, и нахождения величины превышения удобно использовать АЧХ тракторов, полученные в работе [21] (рис. 2).

При получении АЧХ (рис. 2 а-д) измерения вертикальных ускорений на серийном сиденье и на полу кабины тракторов проводились в процессе выполнения ими следующих основных технологических операций: посев озимых (скорость 12 км/ч); дискование (6...8 км/ч); пахота (8...10 км/ч); движение по асфальту (скорость 25 км/ч).

Анализ графиков рис. 2 показывает, что полученные экспериментальные характеристики вертикальных колебаний, как на сиденье, так и на раме, практически у всех тракторов имеет ярко выраженный пик, вызванный резонансом. У тракторов ЮМЗ, МТЗ-50 резонанс имеет место в диапазоне частот 2,5-3,0 Гц. У тракторов К-700 и Т-150К есть рессоры, поэтому резонанс находится в более низком диапазоне частот 1,8-2,0 Гц соответственно, трактор Т-40 имеет два резонансных пика на частотах 2,5 Гц и 5,0 Гц, вследствие наличия у него пружинной подвески на переднем мосту. Из рис. 2е следует, что интегральная норма вибронгруженности оператора трактора МТЗ-80 вертикальными колебаниями (0,54 м/с²) при выполнении транспортных работ на скоростях выше 7,5 км/ч также не соблюдается, а на скоростях выше 14-16 км/ч многократно превышаются.

На рис. 3 приведены средние квадратичные значения виброускорений на сиденье тракториста при движении

трактора Т-150К на различных передачах с полуприцепом 1-ПТС-9 по грунтовой дороге.

Анализ рис. 3 показывает, что сиденье ХТЗ имеет более высокие виброзащитные свойства, чем поддресоренные сидения других производителей, однако норма вибронгруженности оператора (прямая 5) и на этом сиденье в области низкочастотного резонанса не соблюдается, причем отклонение от нормы практически линейно увеличиваются с ростом скорости движения.

Экспериментальные и расчетные значения частот собственных колебаний передней и задней частей, колесных тракторов приведены (табл. 2) [19]. Анализ табл. 2 показывает, что расчетные значения частот меньше экспериментальных. Это объясняется нелинейностью упругой характеристики шины. Для анализа плавности хода рассмотренных колесных тракторов следует использовать экспериментальные значения частот собственных колебаний их задней части на шинах (поскольку в ней расположена кабина), которые находятся в пределах 2,89-3,43 Гц. Частота конца зоны резонанса находится умножением значения частот собственных колебаний на 1,41.

На основе данных о длинах неровностей в работе [22] были получены частоты возмущающего воздействия грунтовой дороги и различных полей при движении по ним КБМ с различной скоростью (табл. 3).

Для определения наличия и количества резонансных режимов движения тракторов в табл. 3, выделены (жирным шрифтом) значения частот возмущающего воздействия грунтовой дороги и различных полей, которые входят в зону резонанса задней подвески тракторов (табл. 2).

Таблица 2

Экспериментальные и расчетные значения частот собственных колебаний передней и задней частей отечественных колесных тракторов

Марка трактора	Жесткость рессор, кН/м	Передняя подвеска			Задняя подвеска		
		Частота, Гц					
		расчетная	экспериментальная	различие в %	расчетная	экспериментальная	различие в %
Т-40 выпуска 1962 г.	600	3,9	4,1	5,0	2,9	3,27/4,6	11,3
	∞	-	-	-	2,9	3,19/4,5	9,1
Т-40 выпуска 1963 г.	600	4,21	4,51	6,7	3,02	3,43/4,8	11,6
	МТЗ-7М	1500	3,24	3,43	5,6	-	-
МТЗ-50	580	2,74	2,9	5,5	2,6	3,02/4,3	13,9
МТЗ-50	395 (опытная)	2,48	2,65	6,4	2,6	2,89/4,1	10,0

Примечание: через дробь указана частота конца зоны резонанса.

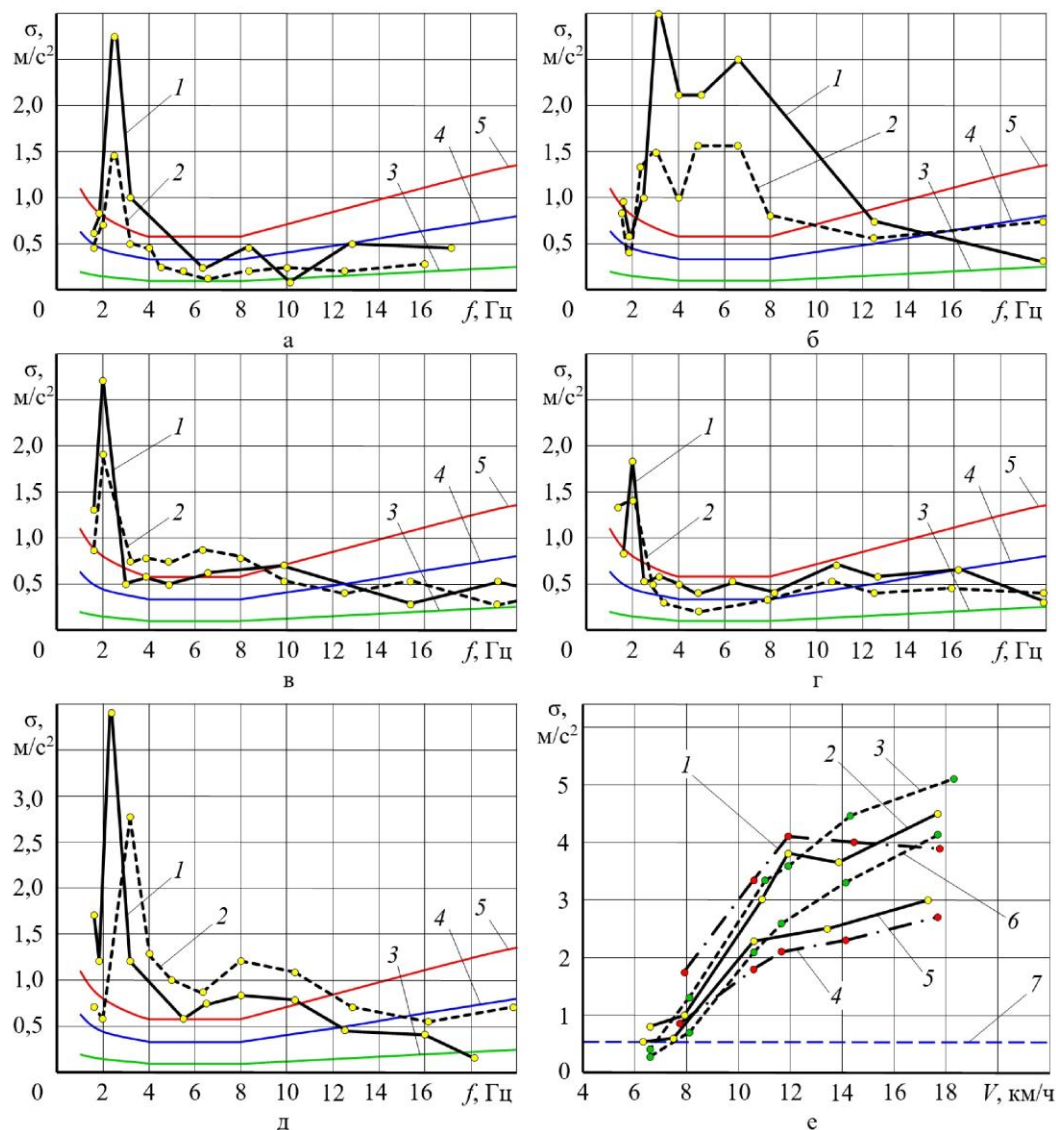


Рис. 2. Экспериментальные вертикальные виброускорения колёсных тракторов:
 а – ЮМЗ; б – Т-40; в – К-700; г – Т-150К; д – МТЗ-50 (1 – на раме; 2 – на сиденье; 3 – уровень комфорта; 4 – уровень допустимой утомляемости; 5 – уровень предельно допустимой утомляемости); е – МТЗ-80
 (1, 2, 3 – на сиденье; 4, 5, 6 – на полу кабины; 1, 4 – движение с полуприцепом И-ПТС-4; 2, 5 – движение с навесным плугом ПН-3-35; 3, 6 – транспортный режим; 7 – интегральная норма вибронегруженности оператора): $[\ddot{z}_c] = 0,54 \text{ м/с}^2$

Таблица 3

Частоты возмущающего воздействия грунтовой дороги и различных полей при движении тракторов с различной скоростью

Скорости движения КБМ, км/ч (м/с)	Частота возмущений, Гц						
	Почвенный фон						
	Грунтовая дорога	Поле из-под сахарной свеклы	Поле из-под подсолнуха	Поле из-под картофеля	Поле из-под кукурузы	Движение поперек пахотных борозд	Стерня колосовых
4 (1,1)	0,55-1,1	2,4	1,8	1,57	1,2	3,14-3,66	7,2
5 (1,4)	0,7-1,4	3,1	2,3	2	1,5	4-4,7	9,4
6 (1,66)	0,8-1,7	3,7	2,8	2,4	1,85	4,7-5,5	11
7 (1,94)	0,97-1,9	4,3	3,2	2,8	2,16	5,5-6,48	12,5
8 (2,2)	1,1-2,2	4,9	3,7	3,17	2,47	6,3-7,4	14,8
9 (2,5)	1,25-2,5	5,5	4,16	3,57	2,77	7,14-8,33	16,5
12 (3,3)	1,6-3,3	7,4	5,5	4,7	3,7	9,5-11,1	22
15 (4,2)	2-4	9,3	7	6	4,7	12-14	28
30 (8,4)	4-8	18,6	14	12	9,4	24-28	56
45 (12,6)	6-12	27,9	21	18	14,1	36-42	84

Примечание: жирным шрифтом выделены частоты возмущающего воздействия грунтовой дороги и различных полей, входящие в зону резонанса задней подвески тракторов.

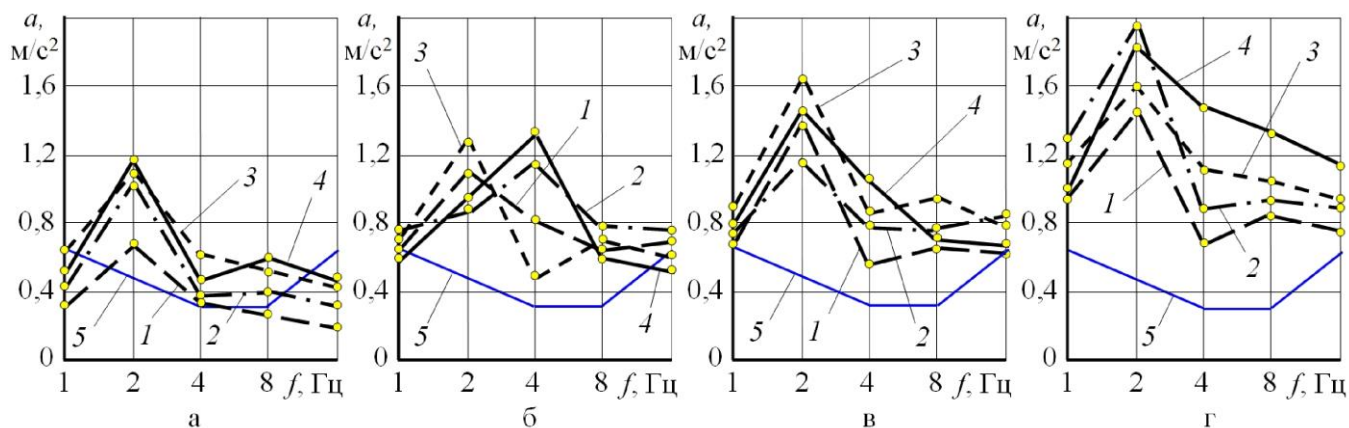


Рис. 3. Средние квадратичные значения вертикальных ускорений на сиденье водителя при движении трактора Т-150К на различных передачах с полуприцепом 1-ПТС-9 по грунтовой дороге: а – на 5-й передаче; б – на 6-й передаче; в – на 7-й передаче; г – на 8-й передаче; 1 – сиденье ХТЗ; 2 – сиденье фирмы Bustrem; 3 – сиденье серийное; 4 – сиденье фирмы Grammer; 5 – уровень допустимой утомляемости

В результате выявлено, что во всех рассмотренных условиях эксплуатации отечественные колесные тракторы ЮМЗ, МТЗ-50, МТЗ-7М, Т-40 могут совершать резонансные колебания на задних шинах при выполнении различных работ в следующих диапазонах скоростей движения:

12-30 км/ч – при выполнении транспортных работ на грунтовых дорогах;

5-7 км/ч – при выполнении сельскохозяйственных операций на поле из-под сахарной свеклы;

5-9 км/ч – при выполнении сельскохозяйственных операций на поле из-под подсолнечника;

6-12 км/ч – при выполнении сельскохозяйственных операций на поле из-под картофеля;

8-15 км/ч – при выполнении сельскохозяйственных операций на поле из-под кукурузы.

Тракторы К-700 и Т-150К не являются бесподвесочными машинами, поскольку имеют рессорную подвеску. Подвеска усложняет конструкцию, но делает их наиболее приспособленными для выполнения транспортных работ на грунтовых дорогах и сельскохозяйственных операций на полях, поскольку у них частота собственных колебаний ниже (находится в диапазоне 1,8-2,0 Гц). При выполнении транспортных работ они имеют резонансные колебания на грунтовых дорогах только при движении на малой скорости в диапазоне 9-12 км/ч. Поскольку транспортные работы выполняются на скоростях в 2-3 раза выше, то резонансные колебания будут маловероятны, причем, чем выше скорость, тем меньше вероятность резонанса. При выполнении сельскохозяйственных операций на полях резонансные колебания этих тракторов могут иметь место также только на скоростях ниже 7 км/ч, а на более высоких скоростях они также маловероятны. Однако опыт эксплуатации и исследования плавности хода различных машин на различных дорогах показывает, что, с ростом скорости движения, действующие на водителя ускорения, увеличиваются и могут превысить нормативные значения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

Анализ плавности хода колесных бесподвесочных машин (ЮМЗ, МТЗ-50, МТЗ-7М, Т-40, К-700 и Т-150К), проведенный на основе экспериментальных исследова-

ний, полученных НАТИ и другими научно-исследовательскими организациями, показал следующее:

1) виброзащитные свойства пневматических шин являются очень низкими из-за узкого по ширине зоны и очень крутого резонанса;

2) отечественные колесные тракторы ЮМЗ, МТЗ-50, МТЗ-7М, Т-40 во всех рассмотренных условиях эксплуатации могут совершать резонансные колебания на шинах;

3) плавность хода отечественных колесных тракторов ЮМЗ, МТЗ-50, МТЗ-7М, Т-40 неудовлетворительна, поскольку средние квадратичные значения вертикальных ускорений остовов до 4,5 раз выше допустимого уровня;

4) тракторы К-700 и Т-150К не являются бесподвесочными, поскольку имеют рессорную подвеску, которая усложняет конструкцию, но делает их наиболее приспособленными для выполнения транспортных работ на грунтовых дорогах и сельскохозяйственных операций на полях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рябов И.М. Виброзащитные свойства пневматических шин бесподвесочных машин и пути их повышения / И.М. Рябов, А.В. Поздеев, А.Ю. Соколов, Н.Н. Малинин // Автомобильная промышленность. – 2014. – № 8. – С. 20-22.

2. Соколов А.Ю. Повышение виброзащитных свойств шин за счет внутренней пневматической демпфирующей системы: дисс. ... канд. техн. наук. – Волгоград, 2014. – 149 с.

3. Рябов И.М. Результаты исследований виброзащитных свойств шины с внутренней пневматической демпфирующей системой / И.М. Рябов, А.В. Поздеев, К.В. Чернышов, Д.В. Гудков, М.М. Гасанов, М.М. Муртузов // Шина Плюс (Украина). – 2015. – № 3. – С. 8-10.

4. Pozdeev A.V. Theoretical research of impact of the changed elastic and damping parameters of vehicle tyres and loading on the wheels breakaway time from the cobblestone road/ A.V. Pozdeev, I.M. Ryabov, K.V. Chernyshov, V.V. Erontayev, V.V. Novikov, A.V. Pokhlebin, D.A. Chumakov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering. Irkutsk, Russia, 27 May – 1 June,

2019. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 632. doi:10.1088/1757-899X/632/1/012059.

5. Pozdeev A.V. Perspectives of increasing smooth ride of wheeled vehicles without suspension with pneumatic damping system/ A.V. Pozdeev, I.M. Ryabov, V.V. Novikov, E.V. Jdamirova, A.S. Diakov, K.B. Evseev// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.: Design Technologies for Wheeled and Tracked Vehicles (MMBC). Moscow, Russian Federation, 1-2 October, 2019. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 820. doi:10.1088/1757-899X/820/1/ 012036.

6. Брундза И.А. Исследование низкочастотных колебаний трактора Т-25 при выполнении с/х работ и разработка мероприятий по снижению воздействия колебаний на водителя: дис. ... канд. техн. наук. – Каунас, 1975. – 150 с.

7. Арутюнян В.С. Обоснование параметров и разработка конструкций типового трека для испытаний колесных сельскохозяйственных тракторов по оценке вибрации: автореф. дис ... канд. техн. наук. – М., 1983. – 24 с.

8. Библюк Н.И. Влияние параметров системы поддрессирования на плавность хода транспортной машины на базе трактора Т-150К / Н.И. Библюк, И.П. Ковтун, В.Г. Пузанова, О.А. Стыравинский и др. // Машины и орудия для механизации лесозаготовок и лесного хозяйства: Межвузовский сборник научных трудов. – Л.: ЛТА, 1986. – С. 23-28.

9. Кальченко Б.И. Комплексная оценка динамической устойчивости и плавности хода колесных тракторов / Б.И. Кальченко, Н.М. Кириенко, Н.А. Дорошенко, Е.Н. Резников // Тракторы и сельхозмашины. – 1987. – №7. – С. 6-10.

10. Коробейников А.Т. Испытания сельскохозяйственных тракторов / А.Т. Коробейников, В.С. Лихачев, В.Ф. Шолохов. – М.: Машиностроение, 1985. – 239 с.

11. Худорожков С.И. Пути повышения эффективности колесных тракторов малой мощности: дис. ... докт. техн. наук. – Курган, 1998. – 316 с.

12. Влияние вибраций на организм человека / АН СССР. Государственный научно-исследовательский институт машиноведения имени академика А.А. Благонравова. – М.: Наука, 1977. – 447 с.

13. К.В. Фролов. Вибрации в технике. Т. 6. Защита от вибраций и ударов / Под ред. К. В. Фролова. – М.: Машиностроение, 1981. – 456 с.

14. ГОСТ 31191.1-2004 (ИСО 2631-1:1997). Вибрация и удар. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Часть 1. Общие требования.

15. К.В. Фролов. Вибрации в технике. Т. 3. Защита от вибраций и ударов / Под ред. К.В. Фролова. – М.: Машиностроение, 1980. – 544 с.

16. Певзнер Я.М. Колебания автомобиля. Испытания и исследования / под ред. Я.М. Певзнера; Г.Г. Гридасов, А.Д. Конев, А.Е. Плетнев. – М.: Машиностроение, 1979. – 208 с.

17. Новиков В.В. Стенды для испытания подвесок наземных транспортных средств : учеб. пособ. (гриф). Доп. УМО вузов по университетскому политехническому образованию / В.В. Новиков, И.М. Рябов, А.С. Дьяков, А.В. Поздеев, А.В. Похлебин. – Волгоград: ВолгГТУ, 2013. – 114 с.

18. Novikov V.V. Research and testing complex for analysis of vehicle suspension units / V.V. Novikov, A.V. Pozdeev, A.S. Diyakov // Procedia Engineering: International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2015). – Elsevier publishing, 2015. – Vol. 129. – P. 465-470.

19. Попов Д.А. Системы поддрессирования современных тракторов / Д.А. Попов, Е.Г. Попов, Ю.Л. Волошин, Л.Н. Кутин, В.И. Субботин. М.: Машиностроение, 1974. – 176 с.

20. Заяц Я.И. Вибронагруженность рабочих мест трактористов колесных сельскохозяйственных машин при воздействии НСК/ Я.И. Заяц, В.А. Гидон, А.П. Орехов, Е.Я. Улицкий, Б.Д. Цвик // Влияние вибрации на организм человека и проблемы виброзащиты. – М.: Наука, 1974. – С. 37-43.

21. Чернышев В.И. Улучшение условий труда операторов транспортных средств путем разработки и реализации виброзащитных систем с импульсным управлением: дис. ... докт. техн. наук. – С. Петербург, 1994. – 458 с.

22. Победин А.В. Проектирование виброшумоизоляции тракторной кабины: учеб. пособие / А.В. Победин. ВолгГТУ, Волгоград, 1994. – 92 с.

Analysis of the Smooth Running of Wheeled Suspensionless Vehicles in Various Operating Conditions

Pozdeev A.V., Ryabov I.M., Timoshin N.V.

Volgograd State Technical University

Volgograd, Russian Federation

pozdeev.vstu@gmail.com, rjabov1603@mail.ru, titan_34rus@mail.ru

Abstract. This article is devoted to the analysis of the smooth running of wheeled suspensionless vehicles (WSV) in various operating conditions based on experimental studies obtained by Scientific Research Tractor Institute (NATI) and other research organizations. The graphs of the dependences of the root mean square (RMS) vertical and horizontal accelerations are given for three levels of norms according to the ISO 2631-1:1997 standard. It was revealed that the vibration-protective properties of pneumatic tires are very low due to a narrow frequency zone in width and a very steep resonance located in the low-frequency region. To analyze the smooth running of WSV, the RMS-levels of the vibration accelerations in 1/3 octave frequency bands for tractors

YuMZ, MTZ-50, K-700, T-150K, T-40 are given, as well as the experimental values of the natural frequencies of their vertical oscillations. It was revealed that domestic wheeled tractors in all considered operating conditions can perform resonant vibrations on pneumatic tires. Therefore, the smooth running of domestic wheeled tractors is unsatisfactory, RMS of the vertical accelerations of the skeletons of domestic tractors are up to 4.5 times higher than the permissible level.

Keywords: wheeled suspensionless vehicle, operating conditions, smooth running, vibration frequency.

Улучшение эксплуатационных свойств колеса с пневматической шиной за счет внутренней упругодемпфирующей системы

Рябов И.М., Поздеев А.В., Еронтаев В.В.

Волгоградский государственный технический университет

Волгоград, Российская Федерация

tjabov1603@mail.ru, pozdeev.vstu@gmail.com, akademia.avt@yandex.ru

Аннотация. Данная статья посвящена улучшению эксплуатационных свойств колеса с пневматической шиной за счет внутренней упругодемпфирующей системы. Пневматические шины имеют низкие виброзащитные свойства вследствие высокой жесткости и слабого демпфирования. Решение данной научной проблемы представляет большой интерес, особенно для бесподвесочных колесных машин. Рассмотрены пути повышения виброзащитных свойств пневматических шин. Представлено описание колеса с внутренней пневматической упругодемпфирующей системой. Раскрыт принцип работы колеса, имеющего механизм с отрицательной жесткостью, приведены его упругие характеристики, в том числе при повышенном давлении. Получена формула для расчета жесткости упругой характеристики. На основе расчетов доказано, что у предлагаемого пневматического колеса жесткость упругой характеристики снижается в 2,28 раза при повышении на 20 % давления.

Ключевые слова: колесо, пневматическая шина, коэффициент сопротивления качению, механизм с отрицательной жесткостью.

ВВЕДЕНИЕ

Пневматические шины бесподвесочных машин (БМ): колесных тракторов, комбайнов, сельскохозяйственных, строительно-дорожных и других специальных машин являются единственными элементами, которые осуществляют защиту остова от вибрации, возникающей в результате взаимодействия колес с неровностями поверхности полей и дорог. Однако пневматические шины имеют низкие виброзащитные свойства вследствие высокой жесткости и слабого демпфирования [1-5]. Опыт эксплуатации БМ [6-11] и проведенные исследования [12-20] показывают, что при выполнении транспортной работы и технологических операций они имеют недостаточную плавность хода, т.к. не обеспечивают соблюдение норм вибронормированности оператора, даже при движении по малоизношенным дорогам. Колебания сельскохозяйственных машин на полях увеличивают давление шин на почву, что снижает урожайность. Длительное воздействие вибрации на операторов машин вызывает профессиональные заболевания, что снижает качество их жизни и престижность профессии. Из-за низких виброзащитных свойств шин БМ перемещаются с малой скоростью и создают заторы на дорогах, что снижает их пропускную способность, приводит к повышению аварийности и ухудшению функционирования транспорта. В связи с этим, повышение виброзащитных свойств колеса с пневматической шиной для БМ

за счет внутренней упругодемпфирующей системы представляет большой интерес.

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ВИБРОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ШИН

Одним из путей повышения виброзащитных свойств колеса с пневматической шиной является снижение давления в шине для уменьшения ее жесткости [21-28].

На рис. 1. приведены зависимости резонансных амплитуд перемещений и ускорений задней части остова трактора Т-40 от жесткости шин ведущих колёс.

Анализ рис. 1 показывает, что снижение жесткости шин ведущих колёс трактора Т-40 приводит к уменьшению резонансных амплитуд перемещений (кривая 1) и ускорений (кривая 2). Однако диапазон изменения жесткости шин при допустимом изменении давления в шинах (заштрихованная область) весьма узок.

Таким образом, за счет снижения давления в шинах нельзя решить проблему повышения виброзащитных свойств колес с пневматической шиной. Поэтому авторами статьи был предложен другой путь ее решения.

На основе патента [29] было разработано колесо с внутренней упругодемпфирующей системой (ВУДС), содержащее механизм с отрицательной жесткостью (МОЖ) [30] (рис. 2). Колесо с ВУДС (рис. 2) содержит обод 1 и пневматическую шину 2, в полости которой установлена не вращающаяся относительно автомобиля эластичная оболочка 3, усеченная в нижней части 4.

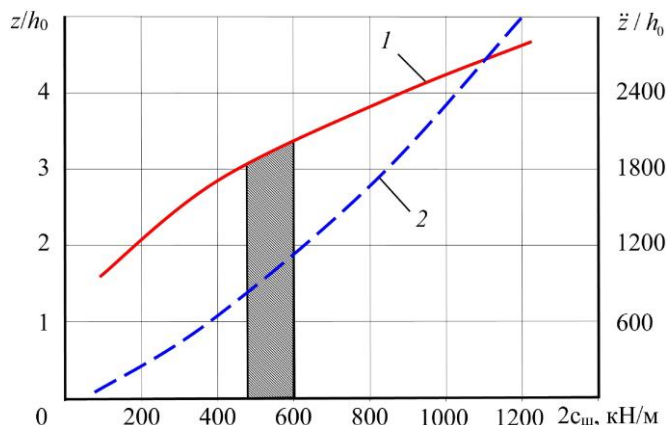


Рис. 1. Зависимости резонансных амплитуд перемещений (кривая 1) и ускорений (кривая 2) задней части остова трактора Т-40 от жесткости шин ведущих колёс (заштрихованная область – диапазон изменения жесткости шин при допустимом изменении давления в шинах)

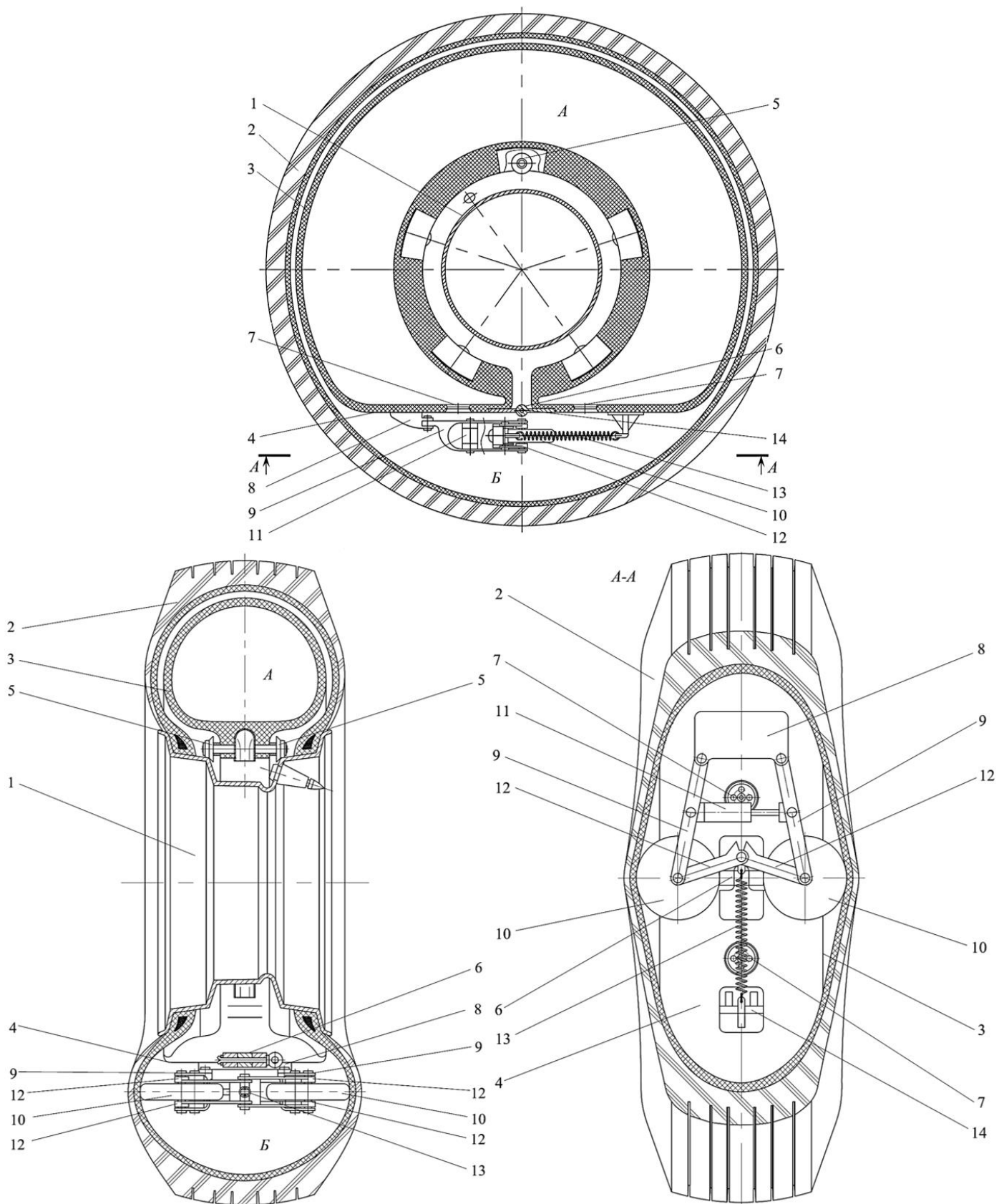


Рис. 2. Колесо с внутренней упругодемпфирующей системой (ВУДС), содержащее механизм с отрицательной жесткостью (патент РФ №179290): *A* – полость оболочки; *B* – кольцевая рабочая полость шины; 1 – обод; 2 – пневматическая шина; 3 – эластичная оболочка; 4 – усеченная часть эластичной оболочки; 5 – ролики; 6 – замок; 7 – дросселирующее отверстие; 8 – кронштейн; 9 – рычаг; 10 – ролик; 11 – гидравлический амортизатор; 12 – тяга; 13 – пружина растяжения; 14 – кронштейн

Оболочка 3 опирается на обод посредством закрепленных на ней роликов 5 и разделяет полость шины на две полости: *A* – полость оболочки 3 и *B* – кольцевая рабочая полость шины 2. В нижней части оболочка 4 имеет замок 6, что облегчает ее установку в шину. Эластичная оболочка представляет собой пневматическую демпфирующую систему, имеет клапаны с дросселирующими отверстиями 7, через которые сообщаются полости *A* и *B*. В нижней части эластичной оболочки закреплен кронштейн 8 с двумя рычагами 9, имеющими на концах ролики 10.

Между рычагами шарнирно установлены гидравлический амортизатор 11 и тяги 12, образующие с рычагами ромбический четырехзвенный механизм с отрицательной жесткостью (МОЖ). Он поджимает ролики 10 к боковым поверхностям шины посредством пружины растяжения 13, связывающей шарнир между тягами 12 с закрепленным на оболочке кронштейном 14. Для уменьшения напряжений в месте контакта роликов 10 и боковых стенок шины 2 рабочая поверхность роликов 10 выполнена в виде части тора и имеет покрытие с низким коэффициентом трения.

При приложении к колесу силы веса транспортного средства, боковины шины 2 деформируются, образуя внутри шины вогнутые поверхности. При качении колеса ролики 10, поджатые пружиной к боковым поверхностям шины, поворачивают оболочку вместе с шиной. Оказавшись внизу, ролики под действием пружины заходят в деформированные боковины шины и обеспечивают устойчивое удержание оболочки в положении усеченной частью 4 вниз при качении колеса, поскольку при отклонении от этого положения ролики 10 переходят в зону меньшей деформации боковин шины и стремятся вернуться в зону максимальной деформации.

Для расчета механизма с отрицательной жесткостью использовалась расчетная схема, приведенная на рис. 3.

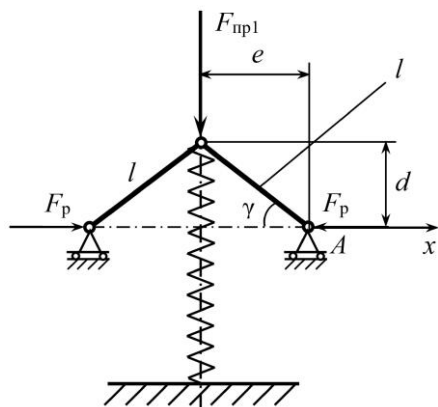


Рис. 3. Расчетная схема механизма с отрицательной жесткостью: *l* – длина рычага, на котором установлен ролик; γ – угол наклона рычага ролика длиной *l* относительно оси *x*; *x* – ось, вдоль которой разжимаются ролики; F_{np1} – это текущая сила разжатия роликов, вызываемая пружиной растяжения; F_p – это текущая сила от воздействия ролика на внутреннюю поверхность шины; *d* – вертикальная проекция расстояния от точки *A* действия ролика до точки соединения 2-х рычагов роликов в текущем положении; *e* – горизонтальная проекция расстояния от точки *A* действия ролика до точки соединения 2-х рычагов роликов в текущем положении

Из баланса сил на рис. 3 следует:

$$F_p \sin \gamma = F_{np1} \cos \gamma; \quad (1)$$

$$F_p d = F_{np1} e; \quad (2)$$

$$F_p (d_0 - z) = F_{np1} (e_0 + x); \quad (3)$$

$$F_p (d_0 - z) = (F_{np10} + k_{np1} z)(e_0 + x); \quad (4)$$

$$F_{p0} d_0 = F_{np10} e_0, \quad (5)$$

где *z* – ось, вдоль которой действует пружина растяжения; F_{np10} – это статическая сила разжатия роликов, вызываемая пружиной растяжения; F_{p0} – это статическая сила от воздействия ролика на внутреннюю поверхность шины; k_{np1} – жесткость пружины растяжения; d_0 – вертикальная проекция расстояния от точки *A* действия ролика до точки соединения 2-х рычагов роликов в статическом положении; e_0 – горизонтальная проекция расстояния от точки *A* действия ролика до точки соединения 2-х рычагов роликов в статическом положении.

Обозначим:

$$d_0 - z = \sqrt{l^2 - (e_0 + x)^2}, \quad (6)$$

$$z = d_0 - \sqrt{l^2 - (e_0 + x)^2}. \quad (7)$$

Тогда силу роликов можно определить по формуле:

$$F_p = \frac{(F_{np10} + k_{np1} z)(e_0 + x)}{d_0 - z}. \quad (8)$$

Расчетная схема шины представлена в виде вписанного в нее четырехзвенного шарнирного механизма (рис. 4).

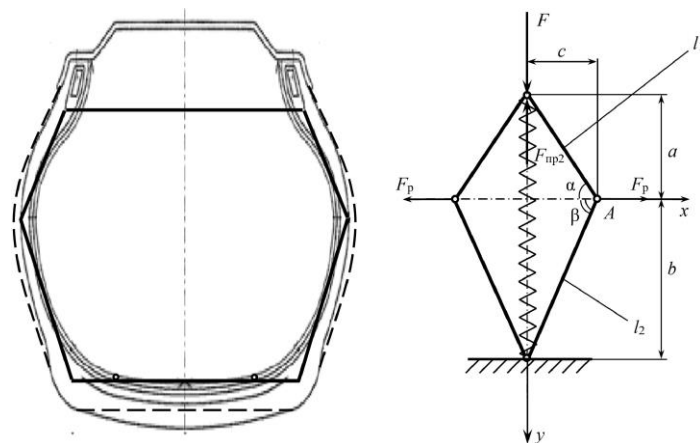


Рис. 4. Расчетная схема шины в виде вписанного в нее четырехзвенного шарнирного механизма: *a* – вертикальная проекция расстояния от точки *A* действия ролика до обода колеса в текущем положении; *b* – вертикальная проекция расстояния от точки *A* действия ролика до опорной поверхности (или до протектора) в текущем положении; *c* – горизонтальная проекция расстояния от точки *A* действия ролика до вертикальной оси в текущем положении; *y* – вертикальная ось, вдоль которой сжимается пневматическая шина; α , β – углы наклона сторон шестиугольника длиной l_1 и l_2 относительно оси *x*; l_1 , l_2 – длины сторон шестиугольника; F_{np2} – это текущая сила сжатия колеса, вызываемая давлением воздуха в шине под нагрузкой; *F* – это внешняя нагрузка на шину; F_p – это текущая сила от воздействия ролика на внутреннюю поверхность шины

Из баланса сил на рис. 4 следует:

$$F_p b = Fc; \quad (9)$$

$$F_p (a_0 - y_1) = (F_{np2} - F)(c_0 + x); \quad (10)$$

$$F_p (a_0 - y_1) = (F_{np20} + k_{np2} y - F)(c_0 + x); \quad (11)$$

$$y = a_0 + b_0 - \sqrt{l_1^2 - (c_0 + x)^2} - \sqrt{l_2^2 - (c_0 + x)^2}, \quad (12)$$

где a_0 – вертикальная проекция расстояния от точки A действия ролика до обода колеса в статическом положении; b_0 – вертикальная проекция расстояния от точки A действия ролика до опорной поверхности (или до протектора) в статическом положении; c_0 – горизонтальная проекция расстояния от точки A действия ролика до вертикальной оси в статическом положении; F_{np20} – это статическая сила сжатия колеса, вызываемая давлением воздуха в шине под нагрузкой; F_{p0} – это статическая сила от воздействия ролика на внутреннюю поверхность шины; k_{np2} – жесткость пневматической шины в текущем положении.

После преобразований получим:

$$F = F_{np20} + k_{np2} y - \frac{(F_{np10} + k_{np1} (d_0 - \sqrt{l^2 - (e_0 + x)^2}))(e_0 + x)}{(c_0 + x) \sqrt{l^2 - (e_0 + x)^2}} \cdot \left(a_0 - \frac{2b_0 y - y^2}{2(a_0 + b_0 - y)} \right) \quad (13)$$

$$F(y) = F_{np10} \frac{a_0 e_0}{c_0 d_0} + k_{np2} y - \frac{(F_{np10} + k_{np1} (d_0 - \sqrt{l^2 - (e_0 + x)^2}))(e_0 + x)}{(c_0 + x) \sqrt{l^2 - (e_0 + x)^2}} \cdot \left(a_0 - \frac{2b_0 y - y^2}{2(a_0 + b_0 - y)} \right), \quad (14)$$

где $x = \sqrt{l^2 - (a_0 - y)^2} - d_0$.

Упругие характеристики колеса с ВУДС и МОЖ приведены на рис. 5.

Упругая характеристика 1 соответствует давлению в шине 1,8 атм., а упругая характеристика 2 соответствует более высокому (на 20 %) давлению шине. Обе упругие характеристики (рис. 5) в зоне статической деформации шины имеют участок пониженной жесткости: 1' и 2' соответственно. Ниже оси абсцисс построена упругая характеристика МОЖ для нормативного давления в шине (3) и повышенного давления – (3').

Жесткость линейной упругой характеристики можно рассчитать по формуле:

$$c_{ш} = 10000\pi^2 / \lambda_{np}, \quad (15)$$

где $c_{ш}$ – жесткость шины; λ_{np} – приведенная статическая деформация шины.

Из формулы (15) следует, что отношение жесткостей линейных упругих характеристик обратно пропорционально отношению их приведенных статических прогибов. Тогда, выполнив измерения на рис. 5 приведенных прогибов упругой характеристики 2 с мягким участком и без него, получаем соотношение:

$$\lambda'_{np} / \lambda_{np} = 2,28.$$

Таким образом, ВУДС с МОЖ на мягком участке снижает жесткость упругой характеристики шины в 2,28 раз, причем этот результат получен для шины с повышенным на 20 % давлением, т.е. с меньшей статической деформацией и сопротивлением качению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

Таким образом, предложенное пневматическое колесо с ВУДС и МОЖ позволяет улучшить следующие эксплуатационные свойства шины и БМ:

1) повысить виброзащитные свойства шины за счет снижения жесткости и комбинированного воздушного и гидравлического демпфирования, что улучшает плавность хода БМ;

2) снизить сопротивление качению шины, за счет уменьшения ее статической деформации, что улучшает топливную экономичность БМ.

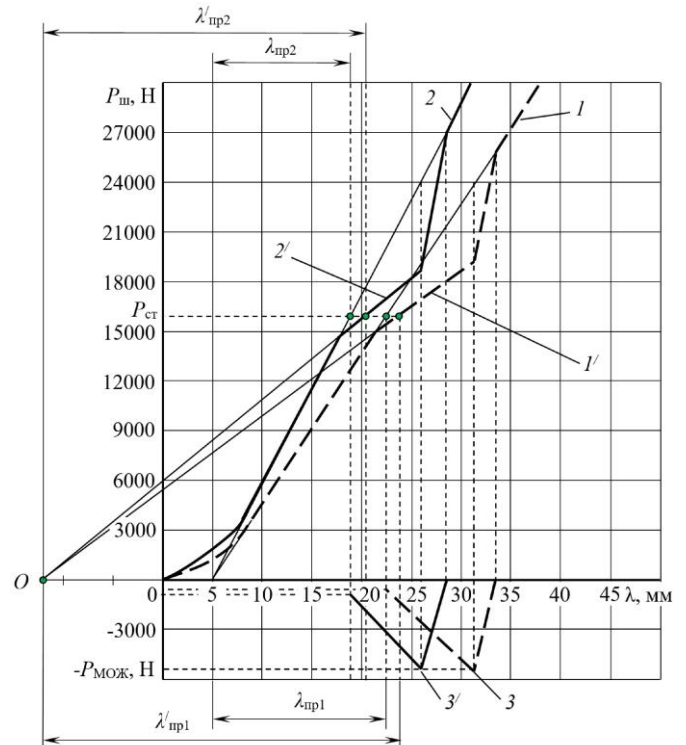


Рис. 5. Упругие характеристики заднего колеса трактора Т-40 с ВУДС и МОЖ: 1, 2 – упругие характеристики шины при нормативном (1,8 атм.) и повышенном на 20% (2,16 атм.) давлении; 1', 2' – участки пониженной жесткости; 3, 3' – упругие характеристики МОЖ; λ_{np1} и λ'_{np1} – приведенные статические деформации классической шины; λ_{np2} и λ'_{np2} – приведенные статические деформации шины с МОЖ; $P_{ст}$ – статическая нагрузка на шину

ЛИТЕРАТУРА

1. Яценко Н.Н. Плавность хода грузовых автомобилей / Н.Н. Яценко, О.К. Прутчиков. – М.: Машиностроение, 1969. – 219 с.
2. Ротенберг Р.В. Подвеска автомобиля / Р.В. Ротенберг. – М., Машиностроение, 1972. – 392 с.
3. Хачатуров А.А. Динамика системы дорога – шина – автомобиль – водитель / Под ред. А.А. Хачатурова; В.Л. Афанасьев, В.С. Васильев, Г.В. Гольдин, Б.М. Додонов, В.П. Жигарев, В.И. Кольцов, В.С. Юрик, Е.И. Яковлев. – М.: Машиностроение, 1976. – 535 с.
4. Яценко Н.Н. Поглощающая и сглаживающая способность шин / Н.Н. Яценко. – М.: Машиностроение, 1978. – 133 с.

5. Кнороз В.И. Работа автомобильной шины / Под ред. В. И. Кнороза; Е.В. Кленников, И.П. Петров, А.С. Шелухин, Ю.М. Юрьев. – М.: Транспорт, 1976. – 238 с.
6. Брундза И.А. Исследование низкочастотных колебаний трактора Т-25 при выполнении с/х работ и разработка мероприятий по снижению воздействия колебаний на водителя: дис. ... канд. техн. наук. – Каунас, 1975. – 150 с.
7. Арутюнян В.С. Обоснование параметров и разработка конструкций типового трека для испытаний колесных сельскохозяйственных тракторов по оценке вибрации: автореф. дис ... канд. техн. наук. – М., 1983. – 24 с.
8. Библюк Н.И. Влияние параметров системы поддрессирования на плавность хода транспортной машины на базе трактора Т-150К / Н.И. Библюк, И.П. Ковтун, В.Г. Пузанова, О.А. Стыравинский и др. // Машины и орудия для механизации лесозаготовок и лесного хозяйства. – Межвузовский сборник научных трудов. – Л.: ЛТА, 1986. – С. 23-28.
9. Кальченко Б.И. Комплексная оценка динамической устойчивости и плавности хода колесных тракторов / Б.И. Кальченко, Н.М. Кириенко, Н.А. Дорошенко, Е.Н. Резников // Тракторы и сельхозмашины. – 1987. – №7. – С. 6-10.
10. Коробейников А.Т. Испытания сельскохозяйственных тракторов / А.Т. Коробейников, В.С. Лихачев, В.Ф. Шолохов. – М.: Машиностроение, 1985. – 239 с.
11. Худорожков С.И. Пути повышения эффективности колесных тракторов малой мощности: дис. ... докт. техн. наук. – Курган, 1998. – 316 с.
12. Рябов И.М. Математическая модель колеса с пневматической демпфирующей системой для бесподвесочных машин / И.М. Рябов, К.В. Чернышов, А.Ю. Соколов // Изв. ВолгГТУ. Серия «Наземные транспортные системы»: межвуз. сб. науч. ст. – Волгоград: ВолгГТУ, 2007. – Вып. 2 №8. – С. 51-53.
13. Рябов И.М. Колесо с внутренней пневматической демпфирующей системой и исследование его динамического гасителя / И.М. Рябов, А.В. Поздеев, А.Ю. Соколов, Н.Н. Малинин // Изв. ВолгГТУ. Серия "Наземные транспортные системы". Вып. 8: межвуз. сб. науч. ст. – Волгоград: ВолгГТУ, 2014. – № 3 (130). – С. 37-41.
14. Рябов И.М. Эффективная площадь пневматической шины и методика определения закона ее изменения при вертикальной деформации / И.М. Рябов, А.В. Поздеев, А.Ю. Соколов, Н.Н. Малинин // Грузовик. – 2014. – № 6. – С. 29-33.
15. Рябов И.М. Виброзащитные свойства пневматических шин бесподвесочных машин и пути их повышения / И.М. Рябов, А.В. Поздеев, А.Ю. Соколов, Н.Н. Малинин // Автомобильная промышленность. – 2014. – № 8. – С. 20-22.
16. Соколов А.Ю. Повышение виброзащитных свойств шин за счет внутренней пневматической демпфирующей системы: дисс. канд. техн. наук. – Волгоград, 2014. – 149 с.
17. Рябов И.М. Результаты исследований виброзащитных свойств шины с внутренней пневматической демпфирующей системой / И.М. Рябов, А.В. Поздеев, К.В. Чернышов, Д.В. Гудков, М.М. Гасанов, М.М. Муртузов // Шина Плюс (Украина). – 2015. – № 3. – С. 8-10.
18. Рябов И.М. Разработка метода получения участка пониженной жесткости на упругой характеристике автомобильной шины / И.М. Рябов, А.В. Поздеев, В.А. Еронтаев, Е.В. Ждамирова // Тракторы и сельхозмашины. – 2019. – № 6. – С. 36-47.
19. Pozdeev A.V. Theoretical research of impact of the changed elastic and damping parameters of vehicle tyres and loading on the wheels breakaway time from the cobblestone road/ A.V. Pozdeev, I.M. Ryabov, K.V. Chernyshov, V.V. Erontaev, V.V. Novikov, A.V. Pokhlebin, D.A. Chumakov// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 632: International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering. – Irkutsk, Russia, 27 May – 1 June, 2019. – IOP Publishing, 2019. doi:10.1088/1757-899X/632/1/012059.
20. Pozdeev A.V. Perspectives of increasing smooth ride of wheeled vehicles without suspension with pneumatic damping system/ A.V. Pozdeev, I.M. Ryabov, V.V. Novikov, E.V. Jdamirova, A.S. Diakov, K.B. Evseev// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 820: Design Technologies for Wheeled and Tracked Vehicles (MMBC). – Moscow, Russian Federation, 1-2 October, 2019. – IOP Publishing, 2020. doi:10.1088/1757-899X/820/1/012036.
21. Балабин И.В. Влияние внутреннего давления воздуха в шинах на их нагрузочный режим / И.В. Балабин, И.С. Чабунин, А.С. Груздев // Журнал автомобильных инженеров. – 2014. – № 2 (85). – С. 32-35.
22. Евзович В.Е. Автомобильные шины, диски и ободья / В.Е. Евзович, П.Г. Райбман. – М.: Автополис-плюс, 2010. – 144 с.
23. Кленников Е.В. Шины легковых автомобилей / Е.В. Кленников. – М.: Транспорт, 1979. – 48 с.
24. Дамзен В.А. Повышение безопасности и ресурса автомобильных шин: дис. ... кандидата технических наук. – Саратов, 2009. – 152 с.
25. Бидерман В.Л. Автомобильные шины (конструкция, расчет, испытания, эксплуатация) / В.Л. Бидерман, Р.Л. Гуслицер. – М.: Госхимиздат, 1963. – 384 с.
26. Митянин П.И. Исследование поглощающей и сглаживающей способности шины при колебаниях грузовых автомобилей: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1974. – 154 с.
27. Попов Д.А. Системы поддрессирования современных тракторов / Д.А. Попов, Е.Г. Попов, Ю.Л. Волошин, Л.Н. Кутин, В.И. Субботин. – М.: Машиностроение, 1974. – 176 с.
28. Заяц Я.И. Вибронагруженность рабочих мест трактористов колесных сельскохозяйственных машин при воздействии НСК / Я.И. Заяц, В.А. Гидон, А.П. Орехов, Е.Я. Улицкий, Б.Д. Цвик // Влияние вибрации на организм человека и проблемы виброзащиты. – М.: Наука, 1974. – С. 37-43.
29. Рябов И.М. Колесо транспортного средства // Патент на изобретение России. 2108240 РФ, МКИ 6 В 60 С 17/00 / ВолгГТУ. – 1998.
30. Рябов И.М., Поздеев А.В. Колесо транспортного средства // П.м. 179290 Российская Федерация, МПК В 60 С 17/00, В 60 С 17/01. – ВолгГТУ. – 2018.

Improvement of the Performance Properties of the Wheel with a Pneumatic Tire due to the Internal Elastic Damping System

Ryabov I.M., Pozdeev A.V., ErontaeV V.V.

Volgograd State Technical University

Volgograd, Russian Federation

rjabov1603@mail.ru, pozdeev.vstu@gmail.com, akademiya.avt@yandex.ru

Abstract. This article is devoted to improving the performance of a wheel with a pneumatic tire due to the internal elastic damping system. Pneumatic tires have low vibration resistance due to high rigidity and low damping. The solution to this scientific problem is of great interest, especially for wheeled suspensionless vehicles. The ways of increasing the vibration-protective properties of pneumatic tires are considered. The description of a wheel with an internal pneumatic elastic damping system is presented. The principle of operation of a wheel with a mechanism with

negative stiffness is disclosed, its elastic characteristics are given, including at elevated pressure. A formula for calculating the stiffness of the elastic characteristic is obtained. On the basis of calculations, it has been proved that for the proposed pneumatic wheel, the rigidity of the elastic characteristic decreases 2.28 times at a pressure suspended by 20%.

Keywords: wheel, pneumatic tire, elastic characteristic, mechanism with negative stiffness.

Моделирование траектории укладки материала на поверхности технологической оправки, задаваемой нерегулярным набором пространственных точек

Устинова Е.С.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова
Новочеркасск, Российская Федерация
lascrella@yandex.ru

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы проектирования траектории укладки материала на поверхности технологической оправки и представление моделей поверхностей оправок сложной геометрической формы в автоматизированных системах подготовки управляющих программ намотки изделий из композиционных материалов. Одним из способов представления модели поверхности технологической оправки может быть представление в виде нерегулярного набора пространственных точек. Предлагается использовать подход, основанный на аппроксимации малых сегментов поверхности и модификации известной системы дифференциальных уравнений расчета траекторий укладки материала предназначенной для интегрирования по аналитически заданной поверхности. Разработанный математический аппарат конструирования кривых на поверхностях, заданных нерегулярным набором пространственных точек, позволяет строить кривые второго класса гладкости без необходимости предварительного получения соответствующей модели поверхности в целом. Адекватность предлагаемых решений подтверждают проведенные численные эксперименты по моделированию траектории укладки нити на различных сложнопрофильных оправках, заданных нерегулярным набором точек, а также результаты отработки на реальном многокоординатном оборудовании подготовленных управляющих программ намотки.

Ключевые слова: намотка, поверхность оправки, облако точек, изделия из композиционных материалов, намоточные станки с ЧПУ, траектория укладки материала.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее распространенным и одним из самых производительных способов изготовления изделий из композиционных материалов является метод непрерывной намотки. При намотке, пропитанные волокна материала под натяжением подаются и укладываются на поверхность технологической оснастки (оправки). Намотка производится на станках с числовым программным управлением (ЧПУ). Управление рабочими органами станков осуществляется по заранее составленным управляющим программам. Для подготовки управляющих программ используются системы автоматизированного программирования станков [1].

Одним из этапов подготовки управляющих программ намотки является проектирование траектории укладки материала на поверхности технологической оправки. Модель поверхности оправки в системах подготовки управ-

ляющих программ намотки, может быть представлена различными способами. Как правило, используется аналитическое описание поверхностей, для которого разработаны различные математические модели траекторий укладки материала [2–10]. Однако данный способ представления поверхностей, существенно затрудняет описание и построение моделей оправок сложной геометрической формы. Для таких поверхностей задача получения аналитического представления имеет высокую сложность, а порой и не выполнима.

Наличие в системах подготовки управляющих программ намотки представления поверхностей оправок сложной геометрической формы, не являющихся телами вращения, особенно важно. Это позволяет автоматизировать подготовку программ именно для сложнопрофильных поверхностей оправок, что существенно расширяет номенклатуру изготавливаемых методом намотки изделий из композиционных материалов.

Представление сложной поверхности возможно в виде совокупности более простых, с четко определенными границами и локальными координатами, и правилами перехода от координат одной простой поверхности к координатам другой [11]. При выборе подобного подхода для любой сложной поверхности придется определять множество простых поверхностей и описывать переходы между ними.

Альтернативным способом представления модели поверхности технологической оправки может быть представление в виде нерегулярного набора пространственных точек (облака точек). Подобные данные могут быть получены, например, в результате сканирования специальными устройствами реальных оправок, т.е. в процессе так называемого обратного проектирования (Reverse engineering) цифровой модели поверхности оправки. Или в результате импорта данных о поверхности оправки из различных современных САД-систем в виде триангулированной поверхности, задаваемой облаком точек через стандартный формат обмена данными - STL. Однако, в случае задания поверхности облаком точек, необходимо разработать математический аппарат позволяющий строить траекторию укладки на подобных поверхностях.

Для решения задачи построения траектории укладки материала на поверхности технологической оправки, задаваемой облаком трехмерных точек, предлагается ис-

пользовать подход, основанный на аппроксимации малых сегментов поверхности и модификации известной системы дифференциальных уравнений расчета траектории укладки материала предназначенной для интегрирования по аналитически заданной поверхности.

ПОСТРОЕНИЕ ТРАЕКТОРИИ УКЛАДКИ НИТИ НА ОБЛАКЕ ТОЧЕК

При моделировании траектории укладки на поверхности оправки, описываемой регулярной поверхностью в виде $\mathbf{r} = \mathbf{r}(u, v) = [x(u, v), y(u, v), z(u, v)]$ [12], где u и v - независимые параметры (криволинейные поверхностные координаты), может использоваться известная система дифференциальных уравнений [13]:

$$\begin{cases} \frac{ds}{du} = u' \\ \frac{ds}{dv} = v' \\ \frac{ds}{du'} = -\frac{N_d(\mathbf{r}_U \times \mathbf{m} - (\mathbf{r}_V) \tan \theta)}{mm} \\ \frac{ds}{dv'} = \frac{N_d(\mathbf{r}_U \times \mathbf{m} - (\mathbf{r}_V) \tan \theta)}{mm} \end{cases}, \quad (1)$$

где s - натуральный параметр линии укладки;

$$\begin{aligned} N_d &= \mathbf{r}_{UU} u'^2 + \mathbf{r}_{VV} v'^2 + 2\mathbf{r}_{UV} u'v'; \mathbf{r}_U = \frac{\partial \mathbf{r}(u,v)}{\partial u}; \\ \mathbf{r}_V &= \frac{\partial \mathbf{r}(u,v)}{\partial v}; \mathbf{r}_{UU} = \frac{\partial^2 \mathbf{r}(u,v)}{\partial u^2}; \mathbf{r}_{VV} = \frac{\partial^2 \mathbf{r}(u,v)}{\partial v^2}; \mathbf{r}_{UV} = \frac{\partial^2 \mathbf{r}(u,v)}{\partial u \partial v}; \\ \mathbf{m} &= [\mathbf{r}_U \times \mathbf{r}_V]; \boldsymbol{\tau} = \frac{d\mathbf{r}(u,v)}{ds} = \mathbf{r}_U u' + \mathbf{r}_V v'; \end{aligned}$$

$\tan \theta$ - тангенс угла геодезического отклонения.

Для использования данной системы в случае, когда поверхность оправки задана облаком точек, нужно привести описание фрагментов облака точек к виду $\mathbf{r} = \mathbf{r}(u, v)$ и модифицировать систему (1) соответствующим образом.

Облако точек поверхности представляется множеством радиус-векторов $\mathbf{r} = [x, y, z]$, которые лежат в некоторой глобальной системе координат (рис. 1). Определим множество точек \mathbf{r}' поверхности, соседствующих с начальной точкой $\mathbf{r}_0 = [x_0, y_0, z_0]$, располагающихся в окрестности сферы радиуса R_{sphere} и удовлетворяющих условию:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 \leq R_{sphere}^2.$$

В начальной точке \mathbf{r}_0 определена тройка векторов $\boldsymbol{\tau}$, \mathbf{b} и \mathbf{m} , таких что $\boldsymbol{\tau}$ и \mathbf{b} лежат в касательной плоскости поверхности в точке \mathbf{r}_0 , а вектор \mathbf{m} является нормальным вектором поверхности в той же точке. Вместе они представляют ортонормированную правую тройку векторов (рис. 1).

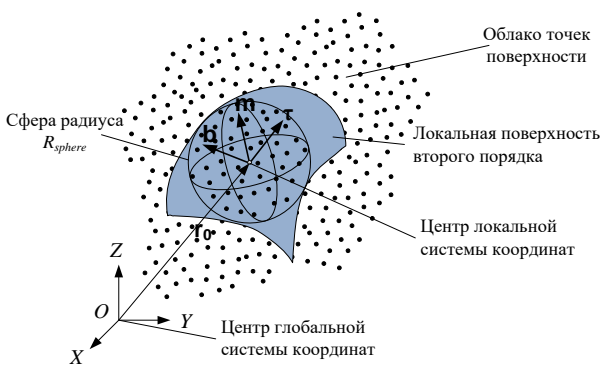


Рис. 1. Поверхность, заданная облаком точек

При малом значении радиуса сферы множество выбранных точек можно аппроксимировать поверхностью второго порядка [14]:

$$\begin{aligned} a_{xx}x^2 + a_{yy}y^2 + a_{zz}z^2 + 2a_{xy}xy + 2a_{xz}xz + \\ 2a_{yz}yz + 2b_x x + 2b_y y + 2b_z z + c = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнение (2) содержит 10 неизвестных коэффициентов. Уменьшим число неизвестных и перейдем к уравнению вида $z = f(x, y)$.

Определим центр новой локальной системы координат в точке \mathbf{r}_0 , через которую гарантированно проходит приближенный фрагмент поверхности, при этом коэффициент c будет равен 0.

Коэффициенты b_x, b_y, b_z уравнения (2) отвечают за направление нормального вектора $\mathbf{m} = [b_x, b_y, b_z]$ поверхности в точке $[0, 0, 0]$. Если произвести дополнительное преобразование координат так, что нормальный вектор поверхности в точке (в глобальной системе координат это вектор \mathbf{m}) совпадёт с направляющим вектором \mathbf{z} локальной системы координат, то коэффициенты b_x и b_y станут равны нулю. Коэффициент b_z при этом может быть равен любому положительному числу, для удобства примем b_z равным 1. Известные формулы преобразования выражают старые координаты радиус-вектора точки через новые:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + \mathbf{C} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad \text{или} \quad \begin{aligned} x &= x_0 + c_{11}x' + c_{12}y' + c_{13}z' \\ y &= y_0 + c_{21}x' + c_{22}y' + c_{23}z' \\ z &= z_0 + c_{31}x' + c_{32}y' + c_{33}z' \end{aligned}$$

где \mathbf{C} - матрица перехода от базиса глобальной системы координат к базису $\boldsymbol{\tau}$, \mathbf{b} и \mathbf{m} (рис. 2):

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \tau_x & \tau_y & \tau_z \\ b_x & b_y & b_z \\ m_x & m_y & m_z \end{bmatrix}.$$

Новые координаты можно получить через старые с помощью выражения:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \mathbf{C}^{-1} \left(\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \right).$$

Уравнение (2) для преобразованных радиус-векторов точек принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} a_{xx}x^2 + a_{yy}y^2 + a_{zz}z^2 + 2a_{xy}xy + 2a_{xz}xz + \\ 2a_{yz}yz + 2z = 0. \end{aligned}$$

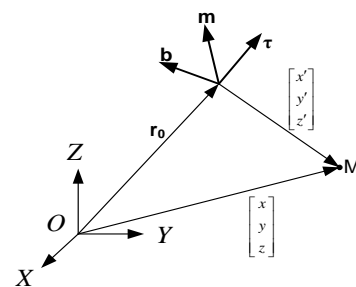


Рис. 2. Координаты радиус-вектора точки в разных системах координат

Для определения шести неизвестных коэффициентов поверхности, проходящей через заданное множество точек, воспользуемся методом наименьших квадратов [15].

В качестве минимизируемого функционала выберем функцию $f(x, y, z)^2$:

$$S = \sum_{i=1}^n \left(a_{xx}x_i^2 + a_{yy}y_i^2 + a_{zz}z_i^2 + 2a_{xy}x_iy_i + 2a_{xz}x_iz_i + 2a_{yz}y_iz_i + 2z_i \right).$$

Продифференцируем последнее уравнение по каждому неизвестному коэффициенту и соберём полученные уравнения в матрицу вида [A|B]. Слагаемые, относящиеся к b_z , переносятся в правую часть матрицы. Получим:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{16} & | & b_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & | & \vdots \\ a_{61} & \dots & a_{66} & | & b_6 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $a_{11} = \sum_{i=1}^n x_i^4$, $a_{12} = a_{21} = \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i^2$,
 $a_{13} = a_{31} = \sum_{i=1}^n x_i^2 z_i^2$, $a_{14} = 2 \sum_{i=1}^n x_i^3 y_i$,
 $a_{15} = 2 \sum_{i=1}^n x_i^3 z_i$, $a_{16} = a_{45} = a_{54} = 2 \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i z_i$,
 $b_1 = 2 \sum_{i=1}^n x_i^2 z_i$, $a_{22} = \sum_{i=1}^n y_i^4$, $a_{23} = a_{32} = \sum_{i=1}^n y_i^2 z_i^2$,
 $a_{24} = 2 \sum_{i=1}^n x_i y_i^3$, $a_{25} = a_{46} = a_{64} = 2 \sum_{i=1}^n x_i y_i^2 z_i$,
 $a_{26} = 2 \sum_{i=1}^n y_i^3 z_i$, $b_2 = 2 \sum_{i=1}^n y_i^2 z_i$, $a_{33} = \sum_{i=1}^n z_i^4$,
 $a_{34} = a_{56} = a_{65} = 2 \sum_{i=1}^n x_i y_i z_i^2$, $a_{35} = 2 \sum_{i=1}^n x_i z_i^3$,
 $a_{36} = 2 \sum_{i=1}^n y_i z_i^3$, $b_3 = -2 \sum_{i=1}^n z_i^3$, $a_{41} = \sum_{i=1}^n x_i^3 y_i$,
 $a_{42} = \sum_{i=1}^n x_i y_i^3$, $a_{43} = \sum_{i=1}^n x_i y_i z_i^2$, $a_{44} = 2 \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i^2$,
 $b_4 = -2 \sum_{i=1}^n x_i y_i z_i$, $a_{51} = \sum_{i=1}^n x_i^3 z_i$, $a_{52} = \sum_{i=1}^n x_i y_i^2 z_i$,
 $a_{53} = \sum_{i=1}^n x_i z_i^3$, $a_{55} = 2 \sum_{i=1}^n x_i^2 z_i^2$, $b_5 = -2 \sum_{i=1}^n x_i z_i^2$,
 $a_{61} = \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i z_i$, $a_{62} = \sum_{i=1}^n y_i^3 z_i$, $a_{63} = \sum_{i=1}^n y_i z_i^3$,
 $a_{66} = 2 \sum_{i=1}^n y_i^2 z_i^2$, $b_6 = -2 \sum_{i=1}^n y_i z_i^2$.

Уравнение локальной поверхности второго порядка приводится к виду $z = f(x, y)$:

$$z(x, y) = \frac{1}{a_{zz}} \left(\frac{-a_{xz}x - a_{yz}y - 1 \pm \sqrt{(a_{xz}x + a_{yz}y + 1)^2 - a_{zz}(a_{xx}x^2 + a_{yy}y^2 + 2a_{xy}xy)}}{a_{zz}} \right).$$

Переходя к представлению поверхности в виде вектор-функции двух скалярных аргументов, получим:

$$\mathbf{r}(x, y) = [x, y, f(x, y)].$$

Тогда систему (1) можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{dx}{ds} = x' \\ \frac{dx'}{ds} = -\frac{N_d(\mathbf{r}_X \times \mathbf{m} - (\mathbf{r}_X) \tan \vartheta \mathbf{m})}{mm} \\ \frac{dy}{ds} = y' \\ \frac{dy'}{ds} = \frac{N_d(\mathbf{r}_Y \times \mathbf{m} - (\mathbf{r}_Y) \tan \vartheta \mathbf{m})}{mm} \end{cases}, \quad (4)$$

где $N_d = \mathbf{r}_{XX}x'^2 + \mathbf{r}_{YY}y'^2 + 2\mathbf{r}_{XY}x'y'$.

Определим функции $\mathbf{r}(x, y)$, $\mathbf{r}_X(x, y)$, $\mathbf{r}_Y(x, y)$, $\mathbf{r}_{XX}(x, y)$, $\mathbf{r}_{YY}(x, y)$ и $\mathbf{r}_{XY}(x, y)$:

$$\mathbf{r}(x, y) = \left[x, y, \frac{-a_{xz}x - a_{yz}y - 1 \pm \sqrt{(a_{xz}x + a_{yz}y + 1)^2 - a_{zz}(a_{xx}x^2 + a_{yy}y^2 + 2a_{xy}xy)}}{a_{zz}} \right];$$

$$\mathbf{r}_X(x, y) = \left[1, 0, \frac{(a_{xz}x + a_{yz}y + 1)a_{xz} - a_{zz}(a_{xx}x + a_{xy}y)}{\sqrt{(a_{xz}x + a_{yz}y + 1)^2 - a_{zz}(a_{xx}x^2 + a_{yy}y^2 + 2a_{xy}xy)}} \right];$$

$$\mathbf{r}_Y(x, y) = \left[0, 1, \frac{(a_{xz}x + a_{yz}y + 1)a_{yz} - a_{zz}(a_{xy}x + a_{yy}y)}{\sqrt{(a_{xz}x + a_{yz}y + 1)^2 - a_{zz}(a_{xx}x^2 + a_{yy}y^2 + 2a_{xy}xy)}} \right];$$

$$\mathbf{r}_{XX}(x, y) = \left[0, 0, \frac{\pm(a_{xz}^2 - a_{zz}a_{xx}) \cdot \sqrt{(a_{xz}x + a_{yz}y + 1)^2 - a_{zz}(a_{xx}x^2 + a_{yy}y^2 + 2a_{xy}xy)}}{(a_{xz}x + a_{yz}y + 1)a_{xz} - a_{zz}(a_{xx}x + a_{xy}y)} \right];$$

$$\mathbf{r}_{YY}(x, y) = \left[0, 0, \frac{\pm(a_{yz}^2 - a_{zz}a_{yy}) \cdot \sqrt{(a_{xz}x + a_{yz}y + 1)^2 - a_{zz}(a_{xx}x^2 + a_{yy}y^2 + 2a_{xy}xy)}}{(a_{xz}x + a_{yz}y + 1)a_{yz} - a_{zz}(a_{xy}x + a_{yy}y)} \right];$$

$$\mathbf{r}_{XY}(x, y) = \left[0, 0, \frac{\pm(a_{yz}a_{xz} - a_{zz}a_{xy}) \cdot \sqrt{(a_{xz}x + a_{yz}y + 1)^2 - a_{zz}(a_{xx}x^2 + a_{yy}y^2 + 2a_{xy}xy)}}{(a_{xz}x + a_{yz}y + 1)a_{yz} - a_{zz}(a_{xy}x + a_{yy}y)} \right];$$

$$\mathbf{r}_{XX}(x, y) = \left[0, 0, \frac{\pm(a_{xz}^2 - a_{zz}a_{xx}) \cdot \sqrt{(a_{xz}x + a_{yz}y + 1)^2 - a_{zz}(a_{xx}x^2 + a_{yy}y^2 + 2a_{xy}xy)}}{(a_{xz}x + a_{yz}y + 1)a_{xz} - a_{zz}(a_{xx}x + a_{xy}y)} \right];$$

$$\mathbf{r}_{YY}(x, y) = \left[0, 0, \frac{\pm(a_{yz}^2 - a_{zz}a_{yy}) \cdot \sqrt{(a_{xz}x + a_{yz}y + 1)^2 - a_{zz}(a_{xx}x^2 + a_{yy}y^2 + 2a_{xy}xy)}}{(a_{xz}x + a_{yz}y + 1)a_{yz} - a_{zz}(a_{xy}x + a_{yy}y)} \right];$$

$$\mathbf{r}_{XY}(x, y) = \left[0, 0, \frac{\pm(a_{yz}a_{xz} - a_{zz}a_{xy}) \cdot \sqrt{(a_{xz}x + a_{yz}y + 1)^2 - a_{zz}(a_{xx}x^2 + a_{yy}y^2 + 2a_{xy}xy)}}{(a_{xz}x + a_{yz}y + 1)a_{yz} - a_{zz}(a_{xy}x + a_{yy}y)} \right];$$

Интегрирование новой точки траектории укладки происходит в направлении вектора \mathbf{t} , который в локальной системе координат представлен вектором \mathbf{x} . Приращения x' и y' определяются по формулам:

$$x' = \frac{(\mathbf{r}_X \mathbf{r}_Y) \mathbf{m}}{mm}; \quad y' = \frac{(\mathbf{r}_Y \mathbf{r}_X) \mathbf{m}}{mm}.$$

После интегрирования системы (3) получим значения x_0 и y_0 новой точки и новые направления x' и y' для следующего интегрирования.

Определим новую тройку ортонормированных векторов в этой точке:

$$\mathbf{t}_1 = \mathbf{r}_X(x_1, y_1)x' + \mathbf{r}_Y(x_1, y_1)y';$$

$$\mathbf{m}_1 = \frac{\mathbf{r}_X(x_1, y_1) \times \mathbf{r}_Y(x_1, y_1)}{\|\mathbf{r}_X(x_1, y_1) \times \mathbf{r}_Y(x_1, y_1)\|}; \quad \mathbf{b}_1 = \mathbf{m}_1 \times \mathbf{t}_1.$$

Преобразуем координаты радиус-вектора полученной новой точки и тройки векторов к глобальной системе координат:

$$\mathbf{r}_1^{GCS} = \mathbf{r}_0 + C \cdot \mathbf{r}(x_1, y_1); \quad \boldsymbol{\tau}_1^{GCS} = C \cdot \boldsymbol{\tau};$$

$$\mathbf{b}_1^{GCS} = C \cdot \mathbf{b}_1; \quad \mathbf{m}_1^{GCS} = C \cdot \mathbf{m}_1.$$

Далее, определяется новое множество точек в окрестностях сферы с центром в точке \mathbf{r}_1^{GCS} , строится новое приближение поверхности и проводится интегрирование следующей точки траектории укладки, по подходу, описанному выше.

Схематично конструирование траектории укладки на поверхности, заданной облаком точек, показано на рис. 3.

В ходе численных экспериментов описанный подход хорошо показал себя при шагах интегрирования, не превышающих радиус сферы. При использовании больших значений возникают проблемы, связанные с отклонением точек, полученных в результате интегрирования системы (4), от исходного множества нерегулярных точек.

Условие прохождения локальной поверхности через начало локальной системы координат в новой точке нарушается. В этом случае коэффициент c для новой локальной поверхности становится отличен от нуля. Следовательно, при переходе к большим значениям шага интегрирования, необходимо дополнительно определять значение коэффициента c . Таким образом, коэффициент c является показателем принадлежности новой точки к новой поверхности, определяемой в окрестности этой точки. Тогда будем использовать вместо системы из шести уравнений аналогичную систему, но из семи уравнений следующего вида:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{17} & | & b_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & | & \vdots \\ a_{71} & \dots & a_7 & | & b_7 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $a_{17} = a_{71} = \sum_{i=1}^n x_i^2$, $a_{27} = a_{72} = \sum_{i=1}^n y_i^2$,
 $a_{37} = a_{73} = \sum_{i=1}^n z_i^2$, $a_{47} = \sum_{i=1}^n x_i y_i$, $a_{57} = \sum_{i=1}^n x_i z_i$,
 $a_{67} = \sum_{i=1}^n y_i z_i$, $a_{74} = 2 \sum_{i=1}^n x_i y_i$, $a_{75} = 2 \sum_{i=1}^n x_i z_i$,
 $a_{76} = 2 \sum_{i=1}^n y_i z_i$, $a_{77} = n$, $b_7 = -2 \sum_{i=1}^n z_i$.

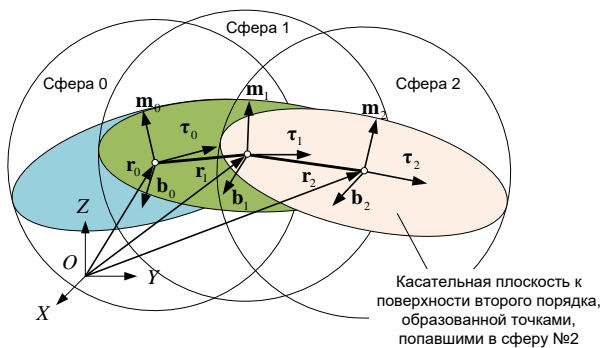


Рис. 3. Линия укладки

Если после решения последней системы уравнений (5) коэффициент c будет отличен от нуля, т.е. новая точка не принадлежит поверхности, следует принимать меры по возвращению новых точек траектории укладки на облако исходных точек. Рис. 4 иллюстрирует возникающее отклонение.

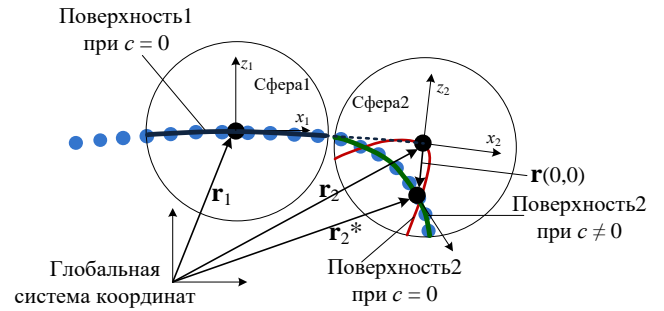


Рис. 4. Отрыв точки от поверхности

Поверхность1 построена на основании исходного множества нерегулярных точек, находящихся в Сфере1, и в пределах Сферы1 совпадает с исходной поверхностью. Из 1 точки выполняется интегрирование точки 2 в заданном направлении на расстояние, превышающее радиус сферы. Если точка 2 не принадлежит исходной поверхности, то Поверхность2, полученная в окрестности Сферы2 в результате решения системы (3), т.е. при $c=0$, будет сильно деформирована. При использовании системы (5) поверхность не будет искажаться, но не будет проходить через центр системы координат определенной в рассчитанной точке. Данные рассчитанной точки будут использованы для определения точки $\mathbf{r}(x, y)$, принадлежащей Поверхности2. В результате подстановки значений $[0;0]$ в вектор $\mathbf{r}(0,0) = [0,0, f(0,0)]$, рассчитанная точка будет спроецирована на Поверхность2.

Таким образом, в результате интегрирования системы (4) будут получены точки траектории укладки, принадлежащие исходному множеству нерегулярных точек.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 5 представлена траектория укладки, построенная на поверхности вращения (баллон и эллипсоид), заданной в виде облака точек. На рис. 6 показана рассчитанная траектория укладки, построенная на поверхностях, имеющих сложную геометрию (тройник с треугольным сечением, тройник с круглым сечением и крестовина с круглым сечением), также представленных облаком точек.

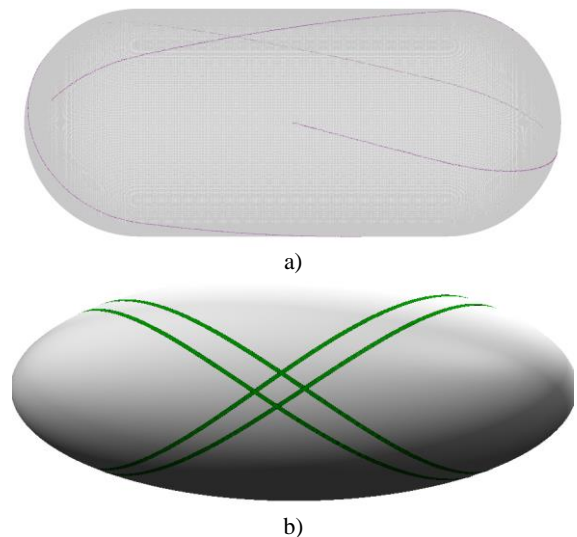
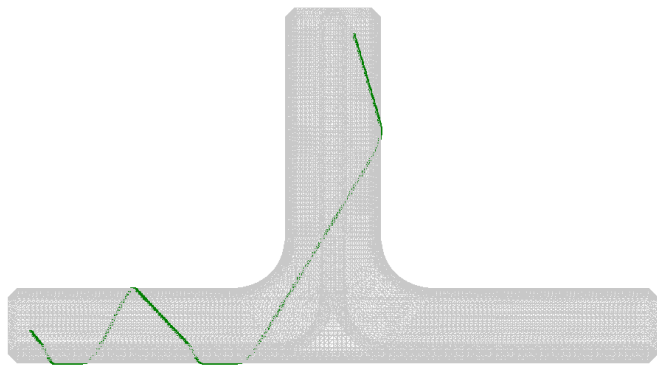
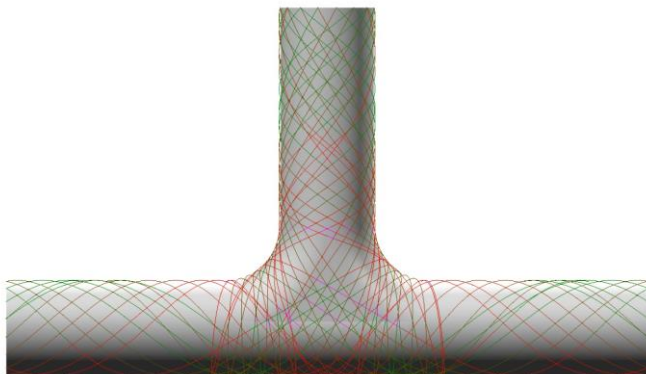


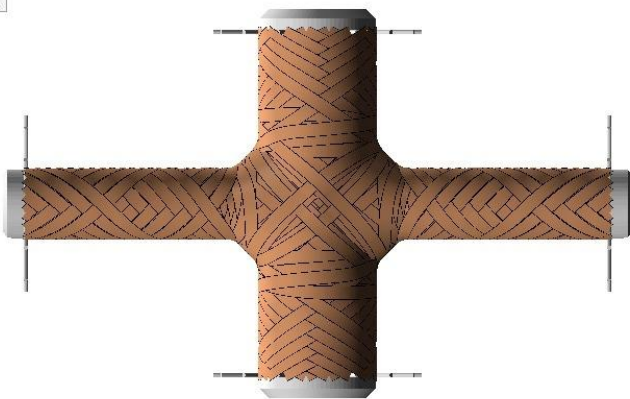
Рис. 5. Траектория укладки на поверхности вращения: а - баллон, б - эллипсоид



a)



b)



c)

Рис. 6. Траектория укладки на поверхности сложной геометрической формы:

- a - тройник с треугольным сечением,
- b - тройник с круглым сечением,
- c - крестовина с круглым сечением

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный математический аппарат конструирования кривых на поверхностях, заданных нерегулярным набором пространственных точек, позволяет строить кривые класса гладкости 2 без необходимости предварительного получения соответствующей модели поверхности в целом.

Описанный подход универсален и применим к обширному классу поверхностей, которые могут быть представлены нерегулярным набором точек.

Проведенные численные эксперименты по моделированию траектории укладки нити на различных сложно-

профильных оправках заданных нерегулярным набором точек (рис. 6), а также результаты обработки (рис. 7) на реальном многокоординатном оборудовании управляющих программ намотки, для которых в ходе их подготовки использовались разработанные математические модели, позволяют говорить об адекватности предлагаемых решений.

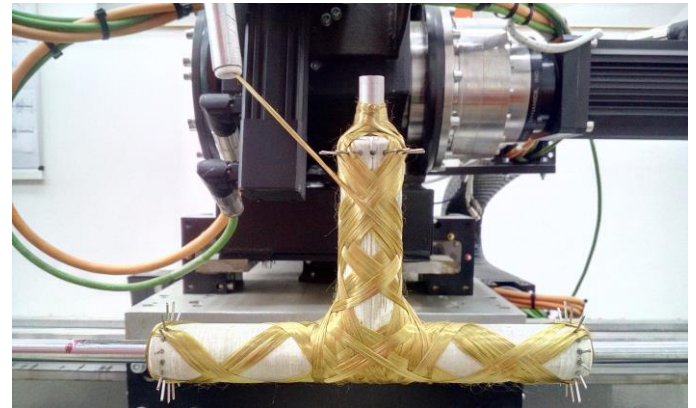


Рис. 7. Результат намотки изделия на станке с ЧПУ по рассчитанным траекториям укладки на поверхности тройника с круглым сечением

ЛИТЕРАТУРА

1. Савин А.Г. Математическое и программное обеспечение моделирования кинематики оборудования и процесса формирования изделий методом намотки и выкладки в автоматизированной системе технологической подготовки производства: дис. ... канд. техн. наук. – Новочеркасск, 2017. – 181 с.
2. Scholliers J. Robotic filament winding of asymmetric composite parts: PhD. Thesis. Faculty of applied sciences. Department of Mechanical Engineering. Leuven University. – Leuven, December, 1992.
3. Sotiris K. Filament winding. A unified approach / K. Sotiris // DUP Science. – 2004. – 400 с.
4. Алексейчик В.В. Оптимальное армирование и выбор рациональных форм конструкций из композиционных материалов / В.В. Алексейчик, В.К. Ершов, Я.Я. Чикильдин // В кн.: Системы управления технологическими процессами. – Новочеркасск, 1979. – С. 44-50.

5. Аюшеев Т.В. Методы трехмерного моделирования и контроля процессов изготовления деталей из композиционных материалов способом намотки: дис. ... докт. техн. наук. – Улан-Удэ, 2006. – 319 с.

6. Битюков Ю.И. Геометрическое моделирование технологических процессов намотки и выкладки конструкций из волоконистых композиционных материалов: дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 2010. – 333 с.

7. Васильев В.В. Оптимальное проектирование баллонов давления в форме оболочек вращения, образованных из композиционных материалов методом намотки / В.В. Васильев, А.Б. Миткевич, В.Д. Протасов. – М.: ВИМИ, 1981. – 65с.

8. Иванченко А.Н. Задача конструирования кривой на поверхности // Изв. вузов. Сев. Кавк. регион. Техн. Науки. – Новочеркасск, 2000. – № 4. – С. 28-31.

9. Калинин В.А. Теоретические основы геометрического моделирования процессов намотки и выкладки конструкций из волоконистых композиционных материалов: дис. ... докт. техн. наук. – Москва, 1997 – 463 с.

10. Маринин В.И. Построение траектории намотки нити на поверхности произвольной формы / В.И. Маринин,

А.Б. Шварц // Изв. вузов. Северо-Кавказкий регион. Техн. Науки. – Новочеркасск, 2001. – № 3. – С. 34-38.

11. Оноприйко М.Д. Реконструкция поверхностей геометрических моделей, представленных дискретным множеством цифровых данных: автореф. дис. канд. техн. наук. – Нижний Новгород, 2003. – 28 с.

12. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Корн Г., Корн Т. – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1978. – 832 с.

13. Шварц А.Б. Математическое и программное обеспечение геометрического моделирования процессов намотки изделий из композиционных материалов: дис. ... канд. техн. наук. – Новочеркасск, 2002 – 184 с.

14. Ильин В.А. Линейная алгебра и аналитическая геометрия: учеб / В.А. Ильин, Г.Д. Ким. – М.: ТК Велби, Изд-во Проспект, 2008. – 400 с.

15. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления. Т.1. – М.: Наука, 1978. – 456 с.

Modeling the Laying Material Trajectory on the Technological Mandrel Surface Specified by an Irregular Spatial Points Set

Ustinova E.S.

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)
Novocherkassk, Russian Federation
lascrella@yandex.ru

Abstract. The paper deals with the design of the material laying trajectory on the technological mandrel surface and the complex geometric shapes mandrels surfaces models representation in automated systems for preparing control programs for winding composite materials products. The technological mandrel surface model can be represented as an irregular spatial points set. It is proposed to use an approach based on small surface segments approximation and modification of the differential equations system intended for integration laying material trajectories over an analytically given surface. The developed mathematical apparatus for constructing curves on surfaces given by a irregular spatial points set makes it possible to construct smooth-

ness class second curves without the need to first obtain the complete surface model. The proposed solutions adequacy is confirmed by the numerical experiments carried out on modeling the filament laying trajectory on various complex-profile mandrels given by an irregular points set and by the results of winding control programs running out on a real multiaxis machine.

Keywords: winding, mandrel surface, pointcloud, composite material product, CNC winding machine, laying material trajectory.

Проектирование вспомогательного технологического оборудования на эффекте ультразвука

Булавин В.Ф., Булавина Т.Г., Яхричев В.В.

Вологодский государственный университет

Вологда, Российская Федерация

bulavin.vyach@yandex.ru, tamarabulavina53@gmail.com, yahrichev@yandex.ru

Аннотация. Повышение уровня автоматизации вспомогательных операций в технологическом процессе предприятий обеспечивается ускоренной разработкой и выпуском новых типов узкопрофильного оборудования. Одним из востребованных процессов этого класса является очистка поверхности деталей от различных производственных загрязнений. Цифровое проектирование и изготовление в малых сериях установок этого класса технологического обеспечения является приоритетом малого бизнеса машиностроительного направления. Факторы гибкости управления за счет короткого административного плеча и быстрых переналаживаний при смене номенклатуры выпускаемой продукции выступают определяющими в повышении конкурентных преимуществ и ускоренного вывода продукции на рынок. Наличие цифрового отображения позволяет говорить о формировании виртуального типа производства, звеньями которого являются малые предприятия. Цифровые платформы объединяют в общее информационное пространство по единым правилам весь набор технической документации, техпроцессы и вспомогательную атрибутику по компонентам проектов, являясь условием работы в команде. Рост культуры производства обеспечивает привлекательность труда, повышает его производительность и профессиональные компетенции.

Ключевые слова: малые предприятия, цифровые технологии, CAD платформы, 3D-модель, ультразвуковая очистка.

ВВЕДЕНИЕ

Экономика современной технологической трансформации предусматривает интеграцию средних и малых машиностроительных предприятий в единое поле виртуальных предприятий на основе стратегии перехода к цифровому производству в рамках нацпроектов и инициативы «Технет» [1-5]. Дивергентное мышление рассматривается в качестве движущего фактора в сфере производства и управления, а также влияет на все стороны социально-экономической деятельности. Конвергентное применение идеологий CAD/CAM/CAPP/CAE находится на этапе становления, но отдельные компоненты процесса нашли широкое применение на предприятиях всех уровней. Накопленный опыт и рост компетенций позволяют проектировать на уровне малых предприятий как относительно простые, так и реализовывать сложные высокотехнологичные проекты [6-11]. Новый подход для измерения реального воздействия цифровой экономики рассмотрен в докладе Huawei и Oxford Economics, который, по мнению авторов, «отражает ценность сопутствующих эффектов цифрови-

зации» и «вытекающую из них прямую и косвенную ценность» [3, стр.8].

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Программа импортозамещения предусматривает создание новых видов отечественного оборудования во всех отраслях промышленности, отвечающего качествам конкурентоспособности энергоэффективности.

На этапе изготовления продукции одной из технологических операций является очистка поверхностей деталей от промышленных загрязнений для дальнейшего нанесения покрытий. Снижение трудоемкости, затрат средств и времени при подготовке к последующим технологическим этапам требует автоматизации этой фазы производства. Технологическая мойка деталей является неотъемлемой частью жизненного цикла изделий.

Одним из прогрессивных и дешевых методов очистки считается ультразвуковое воздействие на поверхность посредством передачи волн через жидкость или, так называемым, «прямым контактом». Использование ультразвуковых колебаний в моющих растворах приводит не только к ускорению процесса, но и позволяют получить более высокую степень очистки поверхности деталей. Эффект кавитации не влияет на свойства материала, а взаимодействует только с его поверхностью и очищает ее от загрязнений, ржавчины, смазок и окислов. После очистки металл не теряет своих механических свойств, что ставит ультразвуковую очистку выше прочих методов, таких как химический, электрохимический и механический. В то же время, применение ультразвука не несет в себе крупных затрат в отличие от таких методов, как лазерная и плазменная очистка [12, 13].

CAD СОПРОВОЖДЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА

Техническое задание на проектирование специализированного вспомогательного оборудования определяет его состав и основные узлы. В цифровой среде последующие действия предусматривают классификацию и кодирование деталей с дальнейшим поиском прототипов в базах данных [6-11]. На этапе конструкторской подготовки производства создаются 3D модели элементов и сборок, уточняется общая компоновка и конфигурация будущего изделия из условия унификации и максимального использования стандартных узлов. На рис.1 представлен цифровой двойник установки по очистке поверхности проволоки с целью достижения требуемого уровня адгезии плакирующего слоя. Отдельные модули встраиваются в линию и

обеспечивают полный комплекс подготовительных операций. Состав оборудования включает ультразвуковую ванну очистки в технических моющих средствах (ТМС) и ультразвуковую ванну ополаскивания водой. Установка оснащается системой фильтрации моющего раствора,

фильтром грубой очистки, сепаратором, скиммером для снятия масляной пленки с поверхности ТМС и воды, маслоконцентратором для отделения масел от жидкости, одноступенчатым насосом для осуществления циркуляции жидкости и фильтрами тонкой очистки.

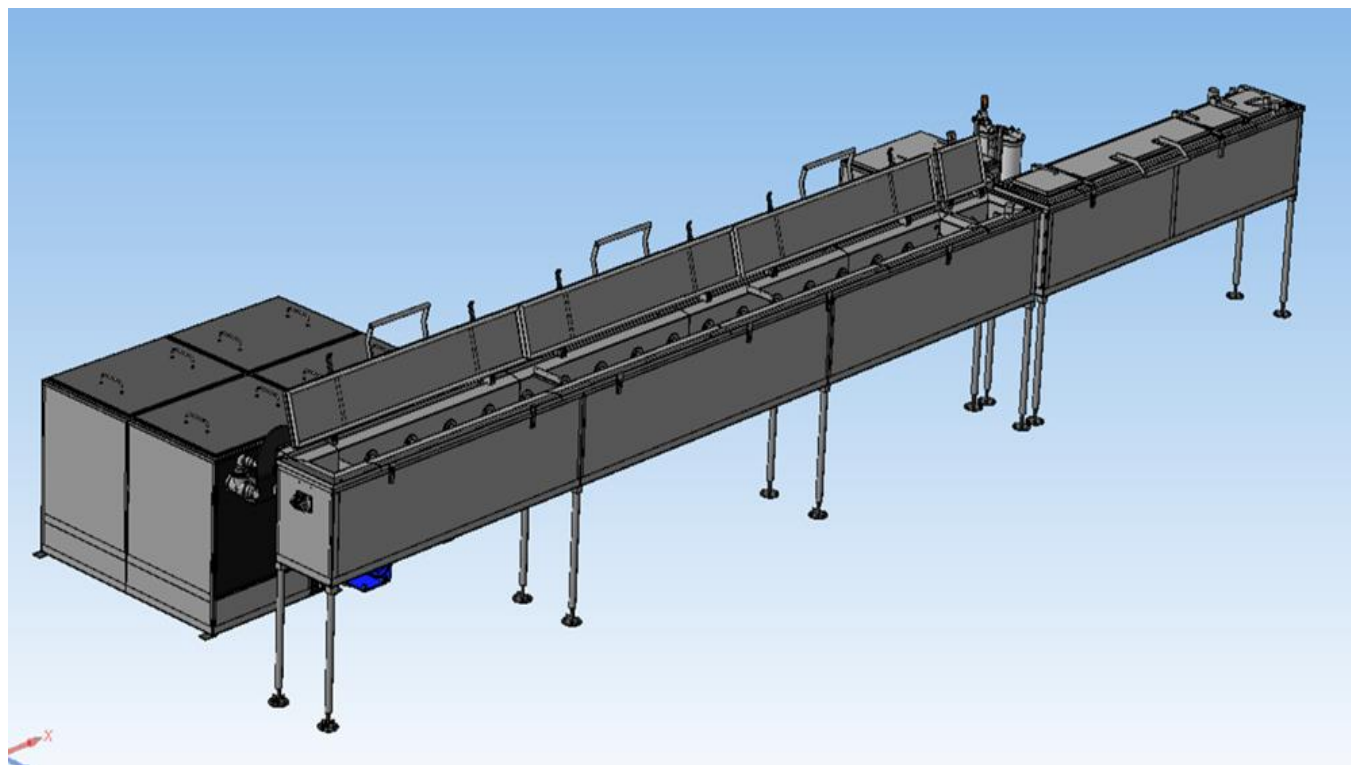


Рис. 1. Цифровая модель линии ультразвуковой очистки проволоки от волоочильной смазки и технологических загрязнений в технических растворах

Ультразвуковое оборудование проектируется в соответствии с условиями экологичности и санитарных норм производства и отвечает требованиям международной системы менеджмента качества ISO 9000:2000.

Техника параметризации и ассоциативность моделей с чертежами в CAD платформе позволяет, используя единжды спроектированный прототип, получать конфигурации схожих деталей и изделий. Формообразующие элементы выступают средством наполнения конструкторских и технологических баз данных для следующих проектов [6-11].

На рис.2 представлен цифровой макет конструкции ультразвуковой установки по очистке поверхности деталей с рабочим объемом ванны ~150 дм³ в среде с ТМС при рабочей температуре раствора до ~ 70⁰С. Программный функционал CAD приложения позволяет увидеть будущее изделие в объеме и различных проекциях, придать ему фотореалистичное изображение в соответствии с заданным материалом для предварительной оценки конструкторских, эргономических и дизайнерских решений. Электронные прототипы сборочных единиц и всей автоматизированной линии позволяют устранить коллизии и исключить ошибки проектирования, провести проверку размерных цепей, установить допуски из принципа взаимозаменяемости деталей в конструкции.

САЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА

Конструкторский этап подготовки производства включает моделирование в рабочем режиме элементов изделия и сборок в САЕ приложениях для их проверки на работоспособность. Одним из основных компонентов спроектированных установок является ультразвуковой излучатель (рис.3). Неправильно спроектированная конструкция излучателя может привести к следующим последствиям: появление опасных статических напряжений, нагрев концентратора и, как результат, смещение резонансных частот, совпадению рабочей частоты с частотой собственных колебания конструкции. Все эти причины приведут к разрушению концентратора и керамических пластин, что негативно отражается на срок службы изделия. Для подтверждения правильного проектирования как геометрии и конструкции преобразователя, так и его надежной работы необходимо выполнить несколько видов симуляции.

Статический анализ напряженно-деформированного состояния позволяет обнаружить опасные области, сечения и максимальные деформации исследуемого конструктива, возникающие при сборке узла и дать рекомендации по технологии сборки. Конечно-элементная дискретизация показана на рис.4. В ходе эксперимента к конструкции прикладывалась сила, имитирующая затягивания шпильки. Усилие затяжки определено опытным путем и принято равным 12 кН. Результат анализа представлен на

рис.5.

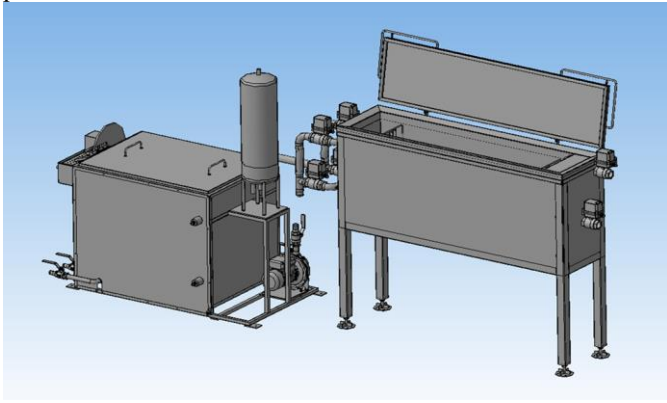


Рис. 2. Цифровой двойник оборудования ультразвуковой очистки от технологических загрязнений в технических растворах

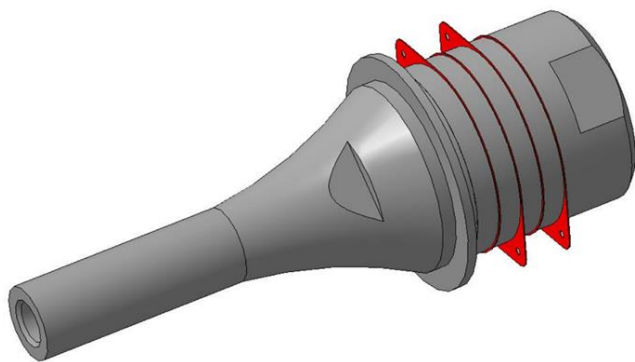


Рис. 3. Трехмерный цифровой макет ультразвукового излучателя

При анализе результата максимальное напряжения возникает в основании резьбы и равно 92 МПа. Полученное значение, намного меньше максимально допустимых напряжений при сжатии материалов, использованных в конструкции. Цветовая легенда визуализирует результаты моделирования [14, 15].

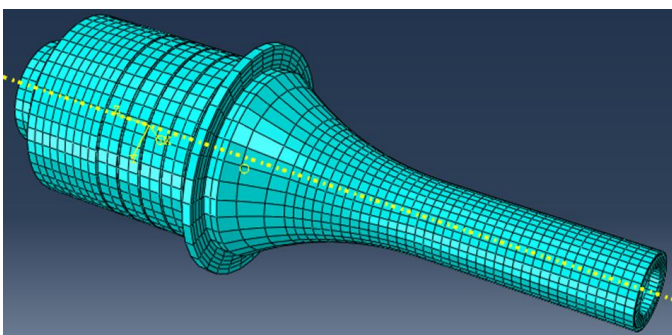


Рис. 4. Конечно-элементная модель ультразвукового излучателя

Следующий вид эксперимента – модальный анализ. Симуляция позволяет выявить 38 мод собственных частот колебаний преобразователя в пределах от 10 кГц до 30 кГц, из которых только две ($f_1=13242$ Гц и $f_2=19679$ Гц), отвечающих продольным колебаниям, близким к рекомендованным [12, 13]. Перемещения излучателя на частоте f_2 зафиксированы на рис.6.

Для определения амплитуды колебаний излучателя, необходимо выполнить гармонический анализ. В качестве возбуждения волновой системы выступает обратный пьезоэлектрический эффект, возникающий при приложении переменного электрического напряжения к пьезокерамическим кольцам.

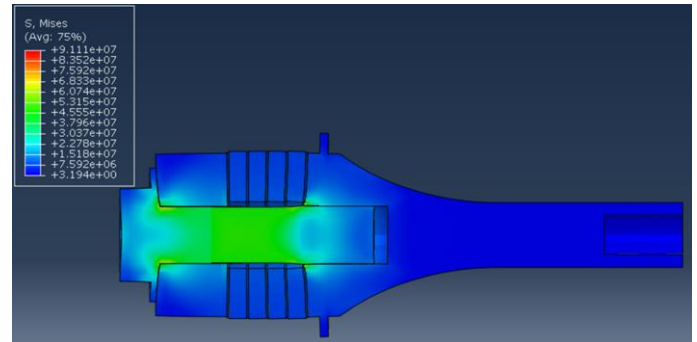


Рис. 5. Визуализация статического анализа ультразвукового излучателя

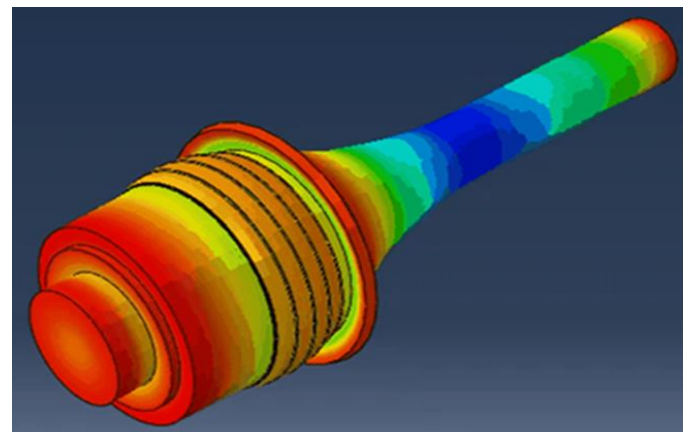


Рис. 6. Результаты модального анализа ультразвукового излучателя на частоте 19679 Гц

После выполнения моделирования для выбранных участков $f_1 \pm \Delta f_1$ Гц и $f_2 \pm \Delta f_2$ Гц и строятся амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) ультразвукового преобразователя. В обоих случаях рассмотрению подлежат амплитуды прямой и обратной волн. Результат анализа первой АЧХ показывает, что двойная амплитуда колебаний равна 800 мкм, что не входит в рекомендованный диапазон (5-50 мкм). Работа излучателя на данной частоте значительно сокращает срок его службы. Для частоты f_2 Гц значение удвоенной амплитуды колебаний на порядок меньше, чем предыдущий и составляет 40 мкм (рис.7).

CAE исследование позволяет выбрать оптимальную конструкцию изделия, исключив этап макетирования и уменьшить число стадий создания прототипов [14]. Моделирование дает возможность для спроектированной геометрии излучателя экспериментально определить его рабочую частоту, лежащую в предпочтительном диапазоне, рекомендованную для очистки поверхностей деталей с помощью ультразвука [12, 13]. Максимальная двойная амплитуда колебания торца излучающей поверхности преобразователя удовлетворяет техническим требованиям эксплуатации.

Сложность конструкторских разработок в машино-

строении, с одной стороны, и стремление повысить качество и скорость проектирования, с другой стороны, определяют необходимость цифрового проектирования, что позволяет реализовать гибкость в стратегии развития компании. Сетевое взаимодействие и электронный документооборот в сочетании с инновационными технологиями в управлении удовлетворяют этим условиям в полной мере. Выполнение проекта в общем информационном пространстве технологических и конструкторских служб является одним из условий цифрового предприятия [15].

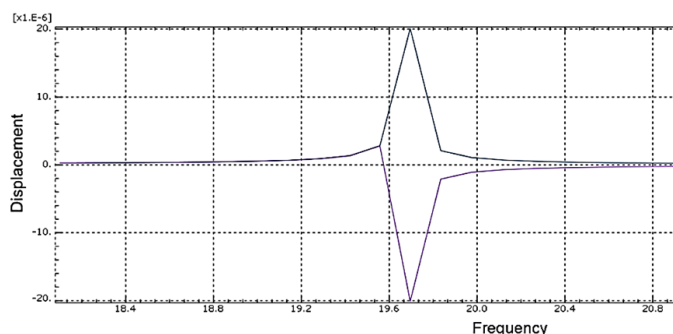


Рис. 7. АЧХ ультразвукового излучателя в диапазоне $f_2 \pm \Delta f_2$ Гц ($f_2=19679$ Гц)

Непосредственно в сфере проектирования и производства ядром информационного пространства является комплекс программных средств на базе PLM платформы. Здесь формируется дерево изделия как объектная структура, связанная со всеми компонентами конструкции и техпроцессами их изготовления. Совместное использование всех приложений из этого поля позволяет реализовать прямое взаимодействие в цепи производство – потребитель [5-11]. Цифровое сопровождение дает возможность кастомизации и модификации конструкции с помощью опций управления конфигурациями изделия. Платформы CAD, CAE, базирующиеся на протоколах 3D проектирования, с поддержкой банков справочных данных, экспертных и прогноз-корректирующих аналитик служат звеном в реализации виртуального производства [15].

В комплексном использовании CAD, CAPP, CAM, CAE, CAO технологий в обеспечении производства центральным звеном выступает 3D-модель детали, являясь средством навигации всего технологического процесса, формируя сквозную интегрированную программно-информационную среду [15-17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цифровое проектирование и моделирование отражают процесс формирования виртуального типа производства с участием предприятий малого бизнеса на основе инновационных решений и формирования единого информационного поля товаропроизводителей. Комплексный подход при реализации этой стратегии предполагает интеграцию исследований как технических и организационных, так и экономических, социальных и психологических аспектов.

Результатом этого процесса является повышение уровня технологического обеспечения в сфере организационных и управленческих принципов подготовки производства и роста уровня кастомизации продукции.

Формирование новых компетенций выступает драйвером для наукоемких производств. Эти факторы имеют

тенденцию к расширению поля охвата деятельности в рамках соответствия международным стандартам системы менеджмента качества. Концепция виртуального предприятия строится в среде ERP, MES и PLM идеологий. Степень реализации инновационных технологий в условиях малого бизнеса определяет их уровень конкурентоспособности и перспективы развития при переходе к цифровому производству.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цифровое производство. Методы, экосистемы, технологии. Рабочий доклад Департамента Корпоративного обучения Московской школы управления СКОЛКОВО Ноябрь 2017 – URL: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11_november/17/tsifrovoe_proizvodstvo_112017.pdf (дата обращения 07.12.2020).
2. Schuh G., Anderl R., Gausemeier J., ten Hompel M., Wahlster W. The National Academy of Science and Engineering of Germany. Industrie 4.0 Maturity Index — Managing the Digital Transformation of Companies – URL: https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/03/acatech_STUDIE_Maturity_Index_eng_WEB.pdf (дата обращения 07.12.2020).
3. Сопутствующий эффект цифровизации. Измерение реального воздействия цифровой экономики. Доклад Huawei и Oxford Economics – URL: <https://www.huawei.com/minisite/russia/digital-spillover/> (дата обращения 07.12.2020).
4. О дорожной карте «Технет» (передовые производственные технологии) национальной технологической инициативы. А. Боровков, Ю. Рябов / Двигатели для гражданской авиации, 2017, №10, с.8-11 – URL: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/04_april/13/Korporativnyy_jurnal_Tramplin_k_uspehu_10_2017_O_Technet_Nti.pdf (дата обращения 07.12.2020).
5. Паспорт национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» – URL: <http://static.government.ru/media/files/urKHm0gTPPnzJlaKw3M5cNLobgczMkPF.pdf> (дата обращения 07.12.2020).
6. Булавин В.Ф. Цифровые технологии в малом бизнесе машиностроительной отрасли / В.Ф. Булавин, В.В. Яхричев // САПР и графика. – 2018. – № 6. – С. 52-55.
7. Булавин В.Ф. Политика цифровых технологий на малых машиностроительных предприятиях / В.Ф. Булавин, В.В. Яхричев, А.С. Степанов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2019. – № 9. – С. 35-45. doi: 10.18698/0536-1044-2019-9-35-45.
8. Булавин В.Ф. PLM-стратегия в мелкосерийном производстве машиностроительной отрасли / В.Ф. Булавин, В.В. Яхричев, В.А. Глазков // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2018. – №8. – С. 37-49. doi: 10.18698/0536-1044-2018-8-37-49.
9. Булавин В.Ф. Цифровой формат подготовки приборостроительного производства. Ч. I. Конструкторский этап / В.Ф. Булавин, Т.Г. Булавина, В.В. Яхричев, А.С. Степанов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – № 3. – С. 1-8. doi: 10.17586/0021-3454-2020-63-3-157-166.
10. Булавин В.Ф. Цифровой формат подготовки приборостроительного производства. Ч. II. Технологический

этап / В.Ф. Булавин, Т.Г. Булавина, В.В. Яхричев, А.С. Степанов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – № 3. – С. 9-15. doi: 10.17586/0021-3454-2020-63-3-167-172.

11. Булавин В.Ф. Валидация САД–продуктов в малых предприятиях машиностроительного сектора / В.Ф. Булавин, Т.Г. Булавина, В.В. Яхричев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2017. – № 5(325). – С. 64-72.

12. Хмелев В.Н. Ультразвук. Аппараты и технологии: монография. / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, С.С. Хмелев, С.Н. Цыганок. – Бийск: Изд-во Алтайского гос. технич. ун-та, 2015. – 688 с.

13. Голых Р.Н. Ультразвук. Воздействие на системы с несущей жидкой фазой: монография / Р.Н. Голых, В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, С.Н. Цыганок. – Бийск: Изд-во Алтайского гос. технич. ун-та, 2018. – 276 с.

14. Алямовский А.А. Инженерные расчеты в SolidWorksSimulation / А.А. Алямовский. – Москва: ДМК-Пресс, 2010. – 464 с.

15. Bulavin V.F. Digital support of production small business preparation in engineering / V.F. Bulavin, T.G. Bulavina, S.A. Stepanov, A.A. Frolov, V.V. Yahrchev // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1399 – 033045.

16. Цифровая экономика и сквозные технологии: теория и практика / под редакцией А.В. Бабкина. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – 623 с.

17. Bulavin V.F. Digital design and technological innovation in the small machine building sector / V.F. Bulavin, T.G. Bulavina, V.V. Yahrchev, A.S. Stepanov, N.S. Grigoriev // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. – 2020. – V. 939. – 012016.

Design of Auxiliary Technological Equipment on the Effect of Ultrasonic

Bulavin V.F., Bulavina T.G., Yahrchev V.V.

Institute of Mechanical Engineering, Energy and Transport Vologda State University
Vologda, Russian Federation

bulavin.vyach@yandex.ru, tamarabulavina53@gmail.com, yahrchev@yandex.ru

Abstract. The increase in the level of automation of auxiliary operations in the technological process of enterprises is ensured by the accelerated development and release of new types of narrow-profile equipment. One of the demanded processes of this class is cleaning the surface of parts from various industrial contaminants. Digital design and manufacture in small series of installations of this class of technological support is the priority of small business in the machine-building direction. The factors of control flexibility due to a short administrative leverage and quick readjustment when changing the range of products are decisive in increasing competitive advantages and accelerating product launch to the market. The presence of digital display allows us to talk about the formation of a virtual type of produc-

tion, the links of which are small enterprises. Digital platforms unite in a common information space according to uniform rules the entire set of technical documentation, technical processes and auxiliary attributes for project components, being a condition for teamwork. The growth of production culture ensures the attractiveness of labor, increases its productivity and professional competence.

Keywords: small businesses, digital technologies, CAD platforms, 3D models, ultrasonic cleaning.

Разработка алгоритма формирования гладкого профиля пера заготовки компрессорной лопатки в системе автоматизированного проектирования

Морозова К.С, Хаймович И.Н.

Самарский университет
Самара, Российская Федерация
kseniamorozova01@gmail.com, kovalek68@mail.ru

Аннотация. Основная задача авиастроения связана с сокращением времени технологической подготовки заготовительного производства и повышением качества готовой продукции. Статья посвящена автоматизации проектирования кузнечно-штамповочного производства (КШП) компрессорных лопаток (КЛ). Рассмотрены существующие методы формирования деталей сложной геометрии, основанные на использовании математических моделей (ММ), полученных способами аппроксимации и сплайн-интерполяции. Исследование направлено на разработку алгоритма формирования гладкого профиля пера заготовки КЛ с использованием кубических сглаживающих сплайнов. На основании описанного алгоритма написана программа формирования модели в системе автоматизированного проектирования (САПР) AutoCAD. Применение алгоритма сглаживания поверхности кубическими интерполяционными сплайнами позволяют получить модель штампованной поковки с гладкой поверхностью, и равномерным припуском по перу в зоне наибольшей изнашиваемости штампов, что способствует значительному повышению их стойкости. Модель заготовки может быть использована для разработки штампованной поковки и элементов штампа.

Ключевые слова: система автоматизированного проектирования, кубические сплайны, компрессорная лопатка, заготовка, перо лопатки, заготовительное производство, гладкий профиль.

ВВЕДЕНИЕ

В области авиастроения при разработке и совершенствовании существующих способов изготовления деталей главными критериями являются сокращение энерго-временных ресурсов и повышение качества готового изделия с минимальным коэффициентом использования материалов (КИМ) [1]. Особый интерес представляет производство компрессорных лопаток (КЛ) газотурбинных двигателей (ГТД), где особое внимание уделяется процессу технологической подготовки получения заготовки будущей детали. Заготовка КЛ служит базой для проектирования штампованной поковки, элементов штампа и объектов контроля штамповой оснастки. Необходимо определить рациональный технологический процесс получения заготовки с учетом механических и физических свойств используемого материала детали, предъявляемых требований к точности изготовления, технических условий и особенностей эксплуатации. Среди большого разнообразия необходимо выбрать тот, который позволит решить ос-

новную задачу технологической подготовки заготовительного производства (ТПЗП) - приближение геометрических параметров заготовки к размерам и форме готовой детали [2-4]. Такой подход позволит сформировать заготовку под дальнейшую механическую обработку с высоким качеством поверхности и минимальным припуском по перу КЛ.

Подготовка производства сложнофасонных деталей является серьезным этапом, требующим больших материальных, временных и трудовых затрат. Изготовление технологической оснастки - штампов, приспособлений, измерительных инструментов и т.д. - занимает до 75% затрат всего времени подготовки производств.

Вопросы автоматизации проектирования заготовительного производства в области обработки металлов давлением рассмотрены в работах М.В. Мальцева, И.П. Медведева, Б.М. Позднеева, А.М. Золотова, Б.Г. Каплунова. Отмечается, что использование ручных способов формирования проекта изготовления деталей ракетно-космического комплекса не является эффективным. При изготовлении шаблонов деталей сложной формы требуется выполнение нескольких копий, чтобы сформировать формообразующую поверхность. В случае проектирования технологической оснастки для штамповки лопатки срок проектирования составляет не менее двух с половиной месяцев, а изготовление - до трех месяцев [5]. Таким образом срок изготовления оснастки составляет около полугода, при этом мастерство слесаря не всегда позволяет получить высокое качество поверхности и обеспечить плавность перехода по сечениям по всему перу детали.

Использование систем автоматизированного проектирования позволяет сократить трудоемкость изготовления деталей заготовительного производства [6, 7].

Использование средств систем автоматизированного проектирования позволяет сократить трудоемкость и время ТПЗП. Решение задачи получения гладкого профиля пера заготовки КЛ возможно при использовании кубических сглаживающих сплайнов [8].

В области машиностроения чертёж является основным источником информации для изготавливаемой детали. В нём содержится вся технологическая и конструкторская информация. В то же время, применение традиционного чертежа для изготовления изделий сложной геометрии не допускается, поскольку велика вероятность получения

ошибки. Особенно сильно это сказывается на производстве деталей летательных аппаратов. В авиастроении применяются особые методы производства, отличающиеся от стандартов общего машиностроения. К ним относят плазово-шаблонный, расчётно-плазовый и бесплазовый методы, которые позволяют формировать сложнофасонную геометрию оснастки [9, 10, 11]. Основным критерием применимости методов является трудоёмкость и точность изготовления сборочной единицы.

Развитие производства требует поиска принципиально новых решений, которые позволят автоматизировать процесс заготовительного производства. В настоящее время, решение задачи автоматизации заготовительного производства основано на использовании математических моделей, которые содержат необходимую информацию об изделии с конструкторско-технологической точки зрения. Использование математических моделей (ММ) подразумевает отказ от традиционных методов хранения информации на бумажном носителе (в виде чертежей, схем, плазов, шаблонов) и переход на машинные автоматизированные системы.

При построении математической модели реальный процесс или явление описывается с помощью математического аппарата. Среди известных методов создания ММ особое внимание следует уделить моделям, построенным на базе аппроксимации и сплайн-функций.

Примером применимости математических методов для формирования сложных поверхностей является изготовление стенки и корыта КЛ и направляющих лопаток ГТД путём аппроксимации. Сущность метода состоит в том, что для улучшения качества готового изделия за счёт обеспечения стабильности его механических свойств, выпуклую поверхность заготовки в продольном направлении выполняют в виде двух цилиндрических или конических поверхностей, линии сопряжения которых, являются общей образующей этих поверхностей, расположенной в пределах поля допуска по толщине. Аналогично строится и внутренняя (вогнутая) поверхность лопатки [12].

Метод использования сплайн-функций рассмотрен в исследовании М. Беньона, где с помощью сплайн-интерполяции по имеющимся координатам лопатки ГТД строится скорректированный профиль поковки для объёмной штамповки [9]. Результатом является модель оснастки нижней части штампа, представленная на рис. 1.

Научная новизна работы заключается в создании алгоритма формирования профиля пера заготовки компрессионной лопатки с использованием кубических сплайнов.

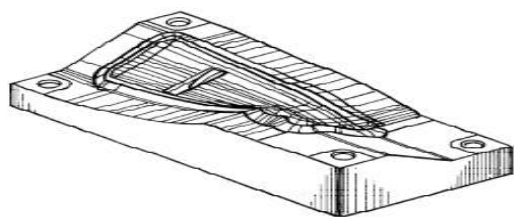


Рис. 1. Применение сплайн-функций для изготовления оснастки лопатки ГТД

Использование сплайн-функций для создания ММ получили широкое распространение, поскольку они не связаны с физикой моделируемых процессов, обладают хорошей обрабатываемостью на ЭВМ и исключают возможность получения случайных ошибок при построении профиля поковки КЛ. Сплайн представляет собой функцию, область определения которой разбита на конечное число отрезков, на каждом из которых она совпадает с некоторым алгебраическим многочленом. Иными словами - это кусочно-заданная функция.

В настоящее время прикладной сферой использования сплайн-функций является САПР, поскольку алгоритмы построения сплайнов совпадают с алгоритмом метода конечных элементов - основой промышленного прочностного анализа [13, 14-16].

Наибольшее распространение в системах автоматизированного проектирования получили кубические интерполяционные сплайны, позволяющие определить промежуточное значение функции по уже имеющимся значениям. Основная задача интерполяции состоит в восстановлении с определённой точностью функции f на заданном отрезке $[a; b]$ по таблице чисел $(x_i; f_i), i = 1, 2, \dots, n$, где $f_i = f(x_i)$ и точки x_i образуют упорядоченную последовательность $\Delta: a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$.

Естественный кубический сплайн удовлетворяет условиям:

1) функция $S(x)$ дважды непрерывно дифференцируемая функция на $[a; b]$ ($S(x) \in C^2[a; b]$);

2) на каждом из отрезков $[x_i; x_{i+1}]$ функция $S(x)$ является полиномом третьей степени вида:

$$S(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3, i = 1, 2, \dots, n - 1$$

3) функция $S(x)$ - интерполяционная функция, т.е. $S(x_i) = f(x_i), i = 1, 2, \dots, n$;

4) краевым условиям $S''(a) = S''(b) = 0$.

Существует несколько алгоритмов, позволяющих проводить процедуру сглаживания табличных данных. Алгоритм Кирхгофа-Лява подразумевает использование условия минимизации функционала при сравнении производных, дающих чистый изгиб [17-20]. В качестве оптимального решения разработан алгоритм сглаживания интерполяционными кубическими сплайнами, которыми описывается массив узловых точек. Математическая модель интерполяционного сплайна подробно описана в работе. Здесь последовательно корректируется положение каждой точки массива, кроме крайних, вдоль одной из осей (рис. 2).

Пусть сначала корректируется положение точки А. На первом этапе эта точка исключается из общего массива, в результате чего образуется 1-й пробел. Интерполяционный сплайн 1, построенный по оставшимся узловым точкам, показывает величину ее коррекции. На следующих этапах пробел увеличивается за счет включения в него нарастающего числа точек. Возникающие при этом новые сплайны (2, 3 ... 1) позволяют рассчитать поэтапную коррекцию. Значение этой величины принимается равной

среднеарифметическому ее поэтапных величин. Выбор длины максимального пробела зависит от кривизны профиля и шага базовых точек.

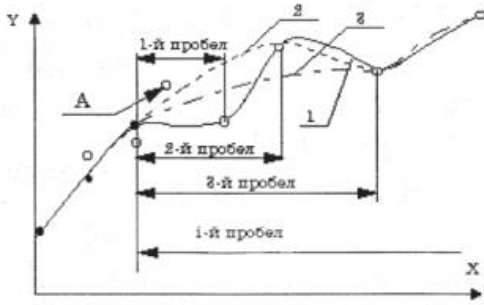


Рис. 2. Графическая модель сплайна

Модель кубического сплайна взята из работ [10, 11]:

$$Spl(x) = y_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3 \quad (1)$$

где $x_i \leq x \leq x_{i+1}$ на каждом подынтервале $[x_i; x_{i+1}]$, $i = 1, 2, \dots, n - 1$.

Методика расчёта коэффициентов сглаживающего сплайна взята из работы [10].

Коэффициенты b_i , c_i , d_i находим из условия непрерывности, т.е. производная на последующем интервале равна производной на предыдущем в той же точке, включая производные второго порядка. Тогда коэффициенты можно выразить следующими формулами:

$$b_i = \frac{y_{i+1} + y_i}{h_i} - h_i(\sigma_{i+1} + 2\sigma_i);$$

$$c_i = 3\sigma_i;$$

$$d_i = \frac{\sigma_{i+1} + \sigma_i}{h_i}; i = 1, 2, \dots, n - 1.$$

Из системы найдём значения σ_n :

$$\begin{pmatrix} \alpha_1 & h_1 & & & & \\ & \alpha_2 & h_2 & & & \\ & & \alpha_3 & h_3 & & \\ & & & \dots & & \\ & & & & \alpha_n & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \dots \\ \sigma_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \dots \\ \beta_n \end{pmatrix}$$

Элементы α_i вычисляются по формулам:

$$\alpha_1 = -h_1; \alpha_i = 2(h_{i-1} + h_i) - \frac{h_{i-1}^2}{\alpha_{i-1}};$$

$$\alpha_n = -h_{i-1} - \frac{h_{n-1}^2}{\alpha_{n-1}}; i = 2, 3, \dots, n - 1,$$

а правые части системы β_i по формулам:

$$\beta_1 = h_1 \Delta_1; \beta_i = (\Delta_i - \Delta_{i-1}) - \frac{h_{i-1} \beta_{i-1}}{\alpha_{i-1}};$$

$$\beta_n = -h_{n-1} \Delta_{n-3} - \frac{h_{i-1} \beta_{i-1}}{\alpha_{i-1}}; i = 2, 3, \dots, n - 1$$

Коэффициенты σ_i находятся методом обратной подстановки:

$$\sigma_i = \frac{\beta_i - h_i \sigma_{i+1}}{\alpha_i}, i = n - 1;$$

$$\sigma_i = \frac{\beta_n}{\alpha_n}, n = 2, \dots, 1$$

Систему уравнений, состоящую из n уравнений можно решить методом исключения. Также можно использовать существующие программы для вычисления σ_i .

На каждом шаге итерации оставшиеся точки аппроксимируются кубическим сплайном, что позволяет рассчитывать, n новых скорректированных значений рассматриваемой точки: $y_{ki,1}; y_{ki,2}; \dots; y_{ki,n}$. Отклонения новых координат точки от исходных определяются из отношений:

$$\Delta y_{ki,1} = y_{ki,1} - y_{ki}^i;$$

$$\Delta y_{ki,2} = y_{ki,2} - y_{ki}^i; \dots;$$

$$\Delta y_{ki,n} = y_{ki,n} - y_{ki}^i,$$

где y_{ki} - исходная координата рассматриваемой точки в i -ой операции.

Координата рассматриваемой точки находится из выражения:

$$y_{ki,n} = y_{ki,n} - \Delta y_{ki,sp}$$

в котором $\Delta y_{ki,sp} = (\Delta y_{ki,1} + \Delta y_{ki,2} + \dots + \Delta y_{ki,m})/m$ - среднее отклонение.

В результате корректировки любая точка массива не должна выходить за пределы ранее установленного промежутка, т.е. $|y_{k0} - y_{kj}| < \epsilon$. Если условие не выполняется, то точка смещается на допустимое значение ϵ .

После нахождения всех "выпадающих" точек из заданного коридора необходимо выполнить проверку плавности сечений пера поковки (рис.3). В табл. 1 представлены исходные и скорректированные координаты десяти точек пера лопатки по одному из сечений.

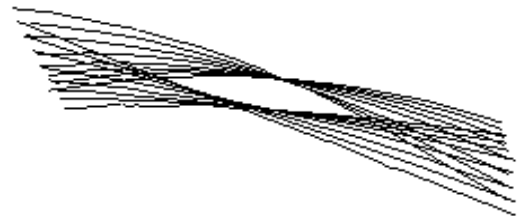


Рис. 3. Проверка плавности сечений пера

Таблица 1
Исходные и скорректированные координаты лопатки

Исходные значения		Новые значения
X	Y	Y _{скор.}
-33,16	-13,74	-13,72
-30,16	-12,02	-11,95
-28,17	-10,86	-10,54
-26,18	-9,68	-9,31
-24,59	-8,75	-8,55
-23,00	-7,83	-7,65
-22,36	-7,47	-7,47
-21,73	-7,12	-7,08
-20,44	-6,41	-6,21
-19,15	-5,73	-5,58

Из табл. 1 и рис.3 видно, что новые координаты отличаются от предыдущих на некоторую величину, а построенные по ним сечения пера позволяют получить гладкий профиль поковки компрессорной лопатки.

Описанный метод формирования гладкого профиля пера КЛ можно представить в виде следующего алгоритма (рис.4).

Формирование модели пера заготовки КЛ является основной задачей для дальнейшего использования в каче-

стве базы для конструкторско-технологической документации. Методику решения этой задачи можно представить следующим образом:

1. сглаживание исходных координат лопатки компрессора по всем сечениям с использованием кубических интерполяционных сплайнов;
2. назначение технологических припусков по перу компрессорной лопатки;
3. построение профиля пера заготовки в системах автоматизированного проектирования.

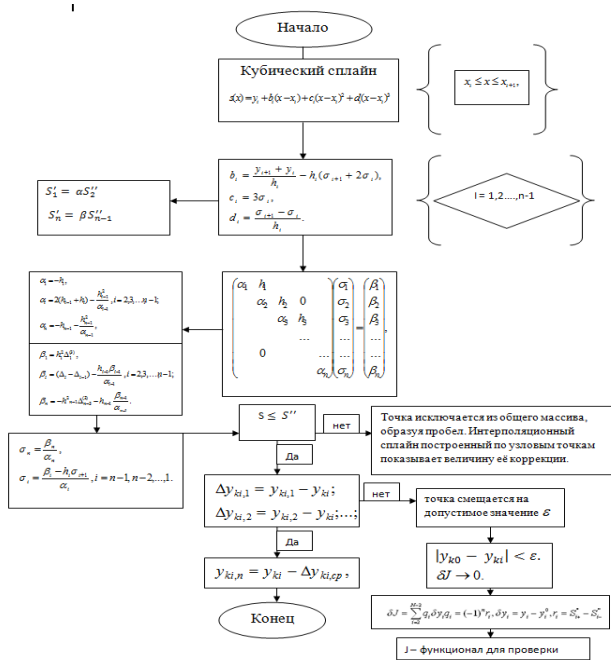


Рис. 4. Алгоритм формирования гладкого профиля пера КЛ

Сглаживание координат пера лопатки ведется по описанному выше алгоритму перебора узловых точек сетки поверхности пера.

Главная задача при формировании профиля пера заготовки лопатки компрессора основана на построении гладкого профиля пера лопатки и назначении припусков. Ранее было сказано, что сложная геометрия пера КЛ требует особого подхода в назначении припусков для формирования штампованной поковки (рис. 5).



Рис. 5. Назначение припусков по перу лопатки

Назначаются следующие припуски: по спинке (ZBX), по корыту (ZBY), по кромкам (ZKP). Следует учитывать, что величина припусков может изменяться в широких

диапазонах: от 0 до 15 мм. Также учитывается технологический напуск (ТЕХ), обеспечивающий правильное продолжение пера в штампе, значение которого варьируется от 0 до 20 мм.

ЭТАП РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММЫ

Результатом использования системы автоматизированного проектирования AutoCAD для формирования заготовки лопатки компрессора является модель заготовки. По описанному выше алгоритму осуществлена реализация программы построения поверхности корыта заготовки пера КЛ (рис. 6). Видно, что программа обеспечивает плавность перехода по поверхности заготовки от сечения к сечению, что подтверждает гипотезу об эффективном использовании теоретического алгоритма формирования поверхности пера заготовки для систем автоматизированного проектирования.

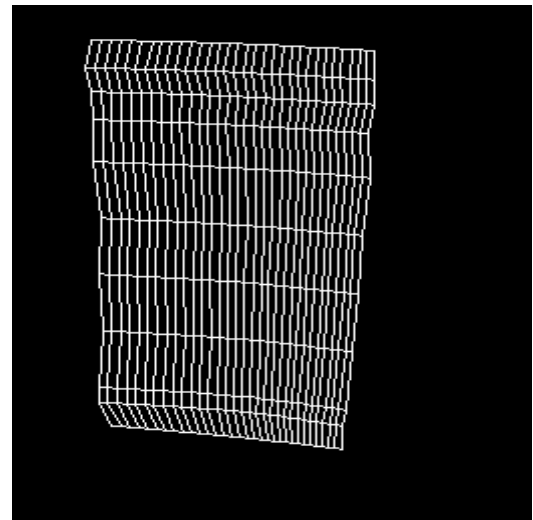


Рис. 6. Нижний вкладыш штампа

Использование полученной модели для формирования обобщенной структурной модели штампованной поковки возможно при совместной интеграции отдельных объектов [21, 22]. В качестве объектов, необходимых для формирования полной заготовки компрессорной лопатки выступают: перо, хвостовик и бобышка. Отдельными этапами формируются три структурные части:

- строится сглаженное перо заготовки по предложенной выше методике;
- формируется хвостовик, путем расчета необходимых параметров, представленных на рис.7;
- определяются параметры технологической бобышки.

Интеграция отдельных конструктивных элементов в системе автоматизированного проектирования приведет к формированию модели заготовки лопатки, по которой могут быть получены чертежи штамповой оснастки.

Таким образом, использование систем автоматизированного проектирования позволяет сократить трудоёмкость технологической подготовки производства, за счет автоматизированного выпуска чертежей заготовки лопатки и штамповой оснастки. Применение алгоритма сглаживания поверхности кубическими интерполяционными сплайнами позволяют получить модель штампованной поковки с гладкой поверхностью, и равномерным припуском по перу в зоне наибольшей изнашиваемости штампов,

что способствует значительному повышению их стойкости.

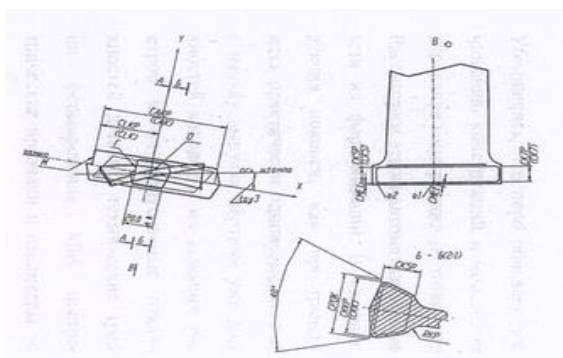


Рис. 7. Схема обобщенного чертежа заготовки лопатки компрессора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

Проведенный анализ общего состояния вопроса применимости систем автоматизированного проектирования в области ракетно- и самолетостроения и оценки применимости математических методов для формирования гладкого профиля пера КЛ показал, что использование кубических интерполяционных сплайнов позволяет получить наиболее точные и качественные результаты.

Разработан алгоритм для теоретического расчета профиля пера заготовок лопаток компрессора газотурбинных двигателей. Полученные результаты позволяют получить гладкий профиль пера, что особенно важно для процесса формирования штампованной поковки. Использование гладкого профиля заготовок КЛ в штампе позволяет повысить стойкость штамповой оснастки.

Программа для формирования пера заготовки компрессорной лопатки в системе автоматизированного проектирования AutoCAD позволяет получить модель заготовки, которая может быть в дальнейшем использована для создания штампов.

Описанный способ построения пера заготовок компрессорных лопаток может быть использован на предприятиях авиационной промышленности для проектирования штампованной поковки и при создании элементов штампа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Khaimovich I.N. Autimatisation of calculation method of technological parameters of wiredrawing with account of speed factor and material properties / I.N. Khaimovich, A.I. Khaimovich, E.A. Kovalkova // *Solid State Phenomena*. – 2020. – Vol. 299. – P. 552-558.
2. Frolov M.A. Improvement of technological process of multiproduct production on the bases of simulation modeling of production unit / M.A. Frolov, I.N. Haimovich // *Key Engineering Materials*. – 2016. – Vol. 684. – P. 487-507.
3. Mikheev V.A. Mathematical modeling of the processes of dynamic recrystallization of polycrystalline materials under conditions of intense plastic deformation / V.A. Mikheev, A.I. Khaimovich // *Forging and Stamping Production*. – 2011. – Vol. 7. – P. 37-44.
4. Zvonov S.Y. Features of the process of shaping hollow conical parts from a circular billet / S.Y. Zvonov, I.P. Popov,

A.G. Shlyapugin // *News of Higher Educational Institutions, Aircraft Engineering*. – Vol. 3. – P. 75-76.

5. Korolev A.V. Probability nature of solid bodies destruction / A.V. Korolev, A.A. Korolev, A.F. Balayev, B. M. Iznaïrov, O.V. Zakharov and A.N.Vasin, // *International Journal of Applied Engineering Research*. – Vol. 10 (21). – P. 42692-42695.

6. Dubovska R. The quality control of machining process with CAD/CAM system support // *Annals of 8th International DAAAM Baltic Conference-Industrial Engineering*. – Tallin, Estonia, 2012. – P. 27-32.

7. Dubovska R. Implementation of CAD/CAM system CATIA V5 in simulation of CNC machining process / R. Dubovska, J. Jambor, J. Majerik // *Procedia Engineering*. – Vol. 69. – 2014. – P. 638-645.

8. Khaimovich I.N. Computer-aided design of blank forging production facilities for aircraft engine compressor blades / I.N. Khaimovich // *Russian Aeronautics*. – 2014. – Vol. 57(2). – P. 169-174.

9. Khaimovich I.N. Computer-aided engineering of the process of injection molding articles made of composite materials / I.N. Khaimovich, A.I. Khaimovich // *Key Engineering Materials*. – 2017. – Vol. 746. – P. 269-274.

10. Khaimovich A.I. Methods and algorithms for computer-aided engineering of die tooling of compressor blades from titanium alloy / I.N. Khaimovich, A.I. Khaimovich // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 302(1). – 012062.

11. Khaimovich, I.N. CAD system of design and engineering provision of die forming of compressor blades for aircraft engines / I.N. Khaimovich // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2017. – V. 87. – P. 082024.

12. Smelov V.G. Study of structures and mechanical properties of products manufactured via selective laser sintering of 316L steel powder / V.G. Smelov, A.V.Sotov, A.V. Agapovichev // *Chernye Metally*. – 2016. – Vol. 9. – P. 61-65.

13. Agapovichev A.V. Study of the structure and mechanical characteristics of samples obtained by selective laser melting technology from VT6 alloy metal powder / A.V. Agapovichev, A.V. Sotov, V.V. Kokareva, V.G. Smelov, R.R. Kyarimov // *International Journal of Nanomechanics Science and Technology*. – 2017. – Vol. 8 (4). – P. 323-330.

14. Grechnikov F.V. Effect of anisotropic yield criterion on the springback in plane strain pure bending / F.V. Grechnikov, Ya.A. Erisov, S.E. Alexandrov // *CEUR Workshop Proceedings*. – 2016. – Vol. 1638. – P. 569-577.

15. Grechnikov F.V. Theoretical and experimental study of plastic anisotropy of Al-1Mn alloy taking into account the crystallographic orientation of the structure / F.V. Grechnikov, Ya.A. Erisov, S.V. Surudin, V.V. Tereshchenko // *Materials Physics and Mechanics*. – 2018. – Vol.40 (2). – P. 274-284.

16. Grechnikov F.V. Virtual material model with the given crystallographic orientation of the structure / F.V. Grechnikov, Ya.A. Erisov // *Key Engineering Materials*. – 2016. – Vol.684. – P. 134-142.

17. Demyanenko E.G. Limits of flanging process feasibility to create thin-wall conical shells / E.G. Demyanenko, I.P. Popov // *Russian Aeronautics*. – 2012. – Vol. 55(4). – P. 408-412.

18. Sotov A.V. Investigation of the IN-738 superalloy microstructure and mechanical properties for the manufacturing of gas turbine engine nozzle guide vane by selective laser melting / A.V. Sotov, A.V. Agapovichev, V.G. Smelov, V.V. Kokareva, M.O. Dmitrieva, A.A. Melnikov, S.P. Golanov, Y.M. Anurov // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020). – Vol. 107 (5-6). – P. 2525-2535. doi: 10.1007/s00170-020-05197-x.

19. Demyanenko E.G. Research of the process of axisymmetric forming of thin-walled flat blanks into the conical parts with minimal thickness variation / E.G. Demyanenko, I.P. Popov, V.S. Menshikov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 177(1). – P. 012122.

20. Demyanenko E.G. Investigation of forming method based on flanging process / E.G. Demyanenko, I.P. Popov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 87(8). – P. 082010.

21. Bogdanov A. Big Data as the future of information technology / A. Bogdanov, A. Degtyarev, V. Korkhov, T.K. Lwin, N. Shchegoleva // CEUR Workshop Proceedings. – 2018. – Vol. 2267. – P. 26-31.

22. Khaimovich A. Research study of residual stress during Ni-Co-Cr alloy selective laser melting process / A. Khaimovich, A. Agapovichev, A. Sotov, V. Kokareva, V. Smelov, E. Zhuchenko // Materials Today: Proceedings. – 2019. – Vol. 19. – P. 2454-2457. doi: 10.1016/j.matpr.2019.08.063.

Development of Algorithm for Forming Streamline Blank Compressor Blade Profile in Computer-Aided Design

Morozova K.S., Khaimovich I.N.

Samara National Research University named after academician S.P. Korolev (Samara University)
Samara, Russia

kseniamorozova01@gmail.com, kovalek68@mail.ru

Abstract. The main task of the aircraft industry is the reduce the time for technological preparation of blank production and improve the quality of finished products. The article is devoted to the design of forging and stamping production compressor blades (CB). Methods of forming parts of complex geometry based on the of mathematical models (MM), obtained methods of approximation and spline interpolation are considered. The study is aimed at the application of the formation of a smooth profile of the feather of the CB blank using cubic smoothing splines. The program for model forming in the computer-aided design (CAD) system AutoCAD based on the described algorithm.. The applica-

tion of the surface smoothing algorithm by cubic interpolation splines makes it possible to obtain a modeled forging with a smooth surface, a uniform allowance along the pen in the region of the greatest wear of the dies, which contributes to a significant increase in durability. The workpiece model can be used to design stamped forgings and die elements

Keywords: computer-aided design, cubic splines, compressor blade, blank, blade airfoil, blank production, streamline profile.

Экспериментальное определение минимального осевого натяга комплекта упругих элементов в виброгасящей оправке для закрепления тонкостенных оболочек

Ямников А.С., Богомолов М.Н.
Тульский государственный университет
Тула, Российская Федерация
yamnikovas@mail.ru, bogomolovmn@mail.ru

Аннотация. Отмечен факт снижения виброустойчивости процесса фрезерования оболочковых конструкций из высокопрочных материалов, вследствие их недостаточной жесткости. Проанализированы известные способы и устройства для повышения жесткости закрепленных оболочек. Приведен пример снижения качества обработанной поверхности фасонной втулки при неэффективном способе её закрепления. Теоретически определена частота собственных колебаний изготавливаемой втулки и показано, что эта частота на два порядка превышает частоту вынужденных колебаний. Показано, что наибольшая амплитуда колебаний на резонансной частоте соответствует среднему сечению втулки. Рассмотрены недостатки известных конструкций зажимных оправок для тонкостенных втулок. Предложена новая запатентованная конструкция оправки с упруго-пластическим демпфирующим элементом в виде комплекта резиновых шайб, одетых на корпус оправки, которые при осевом сдавливании увеличиваются в диаметре и приходят в соприкосновение с внутренней цилиндрической поверхностью втулки с небольшим гарантированным натягом. Для определения необходимого осевого натяга комплекта резиновых прокладок был поставлен специальный эксперимент на упрощенной модели оправки, состоящей из стальной втулки уменьшенного диаметра и толщины, в которую вставлены аналогичные резиновые шайбы. Внутри втулки на комплект резиновых шайб воздействуют два пуансона: подвижный и неподвижный. Перемещения подвижного пуансона, а также изменения диаметра стальной втулки в среднем сечении измеряли индикатором часового типа. Установлена величина минимально необходимого осевого натяга для плотного прилегания резиновых прокладок к внутренней поверхности стальной втулки. Показано, что значительное превышение натяга может вызвать дополнительные погрешности в осевом сечении обрабатываемой втулки.

Ключевые слова: оболочка, вибрация, собственная частота колебаний, фрезерование, демпфирование, деформация резины.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности некоторых изделий требует повышенной прочности при снижении массы. Такое требование приводит к появлению оболочковых конструкций из высокопрочных материалов, при обработке которых резанием увеличиваются силы резания [1,2] и, соответственно, упругие деформации оболочек под действием сил зажима в приспособлении [3,4]. Сочетание невысокой

жесткости технологической системы, включающей оболочковые конструкции, с повышенными силами резания и упругими деформациями оболочки приводят к появлению колебаний и ухудшению качества обработанной поверхности [5-10]. Установлено, что для борьбы с резонансными колебаниями необходимо обеспечить разность в порядке собственных и вынужденных колебаний системы [5-10].

Для повышения жесткости используют различные способы [11-13] и устройства [14,15], в том числе и разработанные авторами [16-18].

Процесс колебаний простейших устройств, например, маятников, поддается аналитическому описанию, но для изучения сложных механических систем применяют методы моделирования [19-27] или экспериментальные исследования [28, 29].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В нашем случае рассмотрена колебательная система операции фрезерования сферической корпусной фрезой RBH VCF3028S32-160 со сменными пластинами ZCET 150CE на 4-х координатном станке с ЧПУ “Akira seiki performa V4 XP” выступов на тонкостенной втулке из высокопрочного материала – стали СП28 (рис. 1).

В настоящее время на предприятии фрезерование галтелей на втулке производится с помощью центрирующей оправки (рис. 2).

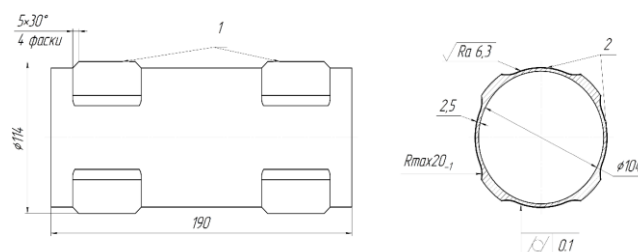


Рис. 1. Операционный эскиз фрезерования фасонной втулки

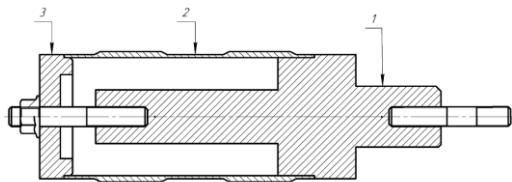


Рис. 2. Установка втулки в центрирующей оправке в действующем производстве

Втулка 2 базируется крайними сечениями по цилиндрическим поясам оправки, причем один из них выполнен непосредственно на корпусе оправки 1, а второй не имеет жесткой связи с корпусом, поэтому является ненадежной базой, положение которой в радиальном направлении зависит от точности выполнения крепежной шпильки и зазора между шпилькой и базирующей крышкой 3. Из рисунка 2 видно, что средняя часть втулки не имеет опоры, что приводит к местным упругим прогибам стенки втулки под действием сил резания при фрезеровании.

Действие указанного фактора приводит к значительным колебаниям при фрезеровании, и соответственно к ухудшению качества обработанной поверхности, что наглядно показано на фотографии обработанной нежесткой втулки (рис. 3).

На фото видны ярко выраженные следы обработки, вызванные вибрациями инструмента и заготовки, вследствие чего не удается достичь удовлетворительных параметров качества: максимальное значение Ra составляет 11,9 мкм, что превышает допустимое значение Ra 6,3.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

При обработке фрезерованием важно, чтобы собственная частота колебаний не совпадала с частотой резонанса зубьев фрезы. Для проверки отсутствия причин появления резонансных явлений было проведено определение частоты собственных колебаний оболочки [22]. В соответствии с методом конечных элементов оболочка разбивалась на отдельные элементы, в совокупности, составляющие конечно-элементную (КЭ) модель.

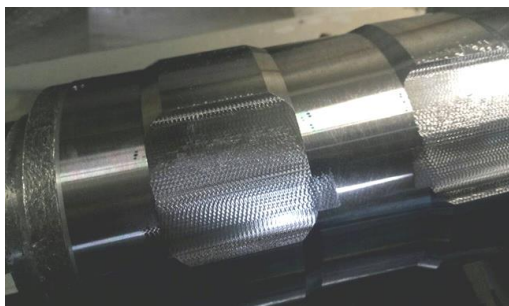


Рис. 3. Внешний вид втулки после фрезерования

Основным уравнением движения конечного элемента, записанным в матричном виде, является [26, 28]:

$$m^e \ddot{q}_e + c^e \dot{q}_e + k^e q_e = f^e \quad (1)$$

где $m^e = \int_V [N]^T \rho [N] dv$ – матрица масс конечного элемента; $c^e = \int_V [N]^T c [N] dv$ – матрица демпфирования конечного элемента; k^e – матрица жесткости конечного элемента;

f^e – вектор узловых усилий конечного элемента; q_e – вектор узловых перемещений; $[N]$ – функции формы конечного элемента; ρ – плотность; c – относительный коэффициент демпфирования (damping ratio).

Наиболее эффективные результаты анализа приведены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты массового участия в глобальных направлениях

Режим No.	Частота, (Герц)	Направление X, %	Направление Y, %	Направление Z, %
3	1 963,4	0	19	52
4	1 963,6	0	52	19
Суммарная эффективная масса, %		0	71	71

Из выходных данных видно, что наиболее опасными для детали в направлении оси Z, в котором на деталь действует формообразующая режущая кромка фрезы, является 3 режим с частотой 1 963,4 Гц, где задействовано 52% массы оболочки (рис. 4).

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ, ПРЕДЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЙ

При обработке фреза вращается с частотой $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$, т.е. 60 Гц, что на два порядка ниже собственной частоты колебаний оболочки. Поэтому ожидать резонанса не следует. Остаются вынужденные колебания, для борьбы с которыми повышают жесткость установки оболочки на операции и демпфирующую способность технологической системы.

Известные способы отличаются сущностью. Так по способу закрепления тонкостенных деталей [11] с целью уменьшения деформации и обеспечения закрепления деталей с начальными искажениями формы поперечного сечения, деталь закрепляют с локальным принудительным деформированием на менее жестком участке. Толщина стенки, длина и механические свойства участка выбираются из условия исключения передачи деформации на обрабатываемую поверхность.

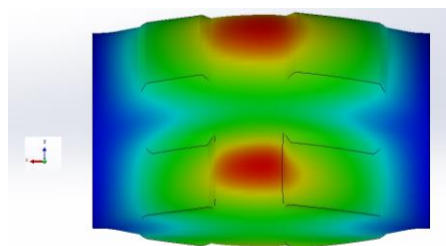


Рис. 4. Эпюра распределения напряжений 3-го режима

Этот способ не повышает жесткость обрабатываемого участка, а, следовательно, не повышает виброустойчивость процесса резания.

Способ закрепления тонкостенной детали, имеющей ребра [12], предусматривает заливку в зазор между деталью и оправкой жидкости с последующим её замораживанием. Способ имеет ограниченное применение из-за необходимости поддержания отрицательных температур при обработке.

Оправка для центрирования и закрепления тонкостенной детали [14] «содержит шток, расположенные на нем контактирующие между собой тонкостенные разжимные элементы, выполненных цилиндрическими со скошенными поверхностями на цапгообразных концах». Применение оправки повышает изгибную жесткость детали.

На оправке [15] тонкостенная деталь зажимается внутри разжимными элементами и распорной вставкой. После сдавливания зажимным элементом разжимных до контакта с внутренней поверхностью обрабатываемой детали осуществляется разжим оболочки в местах контакта зажимных элементов. Недостатком конструкций [14, 15] является концентрированное приложение радиальной нагрузки к стенкам детали, приводящее к искажениям продольного сечения обработанной детали.

Для повышения точности обработки тонкостенных заготовок нами предложен новый способ закрепления тонкостенных цилиндрических заготовок [13]. Реализация предложенного способа достигается тем, что используется разработанная оправка [16-18], конструкция которой поясняется чертежами на рис. 5.

Закрепление тонкостенных цилиндрических заготовок осуществляется следующим образом. Тонкостенную цилиндрическую заготовку 3 устанавливают на корпус оправки 1, снабженный комплектом резиновых прокладок 2. Комплект 2 располагают между цилиндрическими поясками, наиболее удаленными друг от друга и принадлежащими корпусу оправки 1 и фиксирующей планшайбе 5.

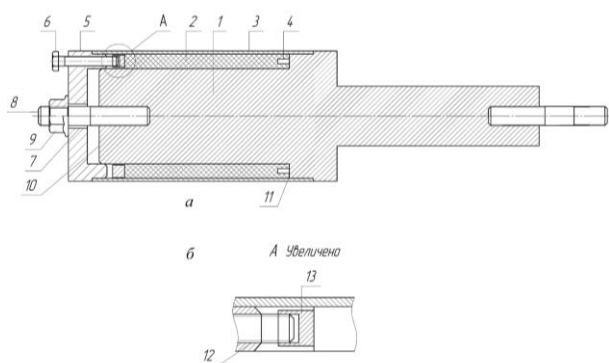


Рис. 5. Оправка для закрепления тонкостенных заготовок: а: 1 – корпус оправки, 2 – комплект резиновых прокладок, 3 – заготовка тонкостенной фасонной втулки, 4 – фиксирующие элементы, 5 – фиксирующая планшайба, 6, 7, 8, 9 – крепежные элементы, 10 – торцовая поверхность корпуса, 11 – базирующий цилиндрический пояс; б: 12 - резьбовые отверстия, 13 - распорная шайба

Затем осевым сжатием комплекта резиновых прокладок 2, состоящего из 17 прокладок из резины 1Н-1ТМКШ-С-10 ГОСТ 7338-90, создают изотропные радиально направленные силы, распирающие заготовку изнутри и повышающие тем самым её жесткость и виброустойчивость.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для определения необходимого осевого натяга комплекта резиновых прокладок был поставлен специальный эксперимент на упрощенной модели оправки. Изготовили

стальную втулку в масштабе $M=114/21,73=5,25$ (с фактическим диаметром 21,73 мм и толщиной стенки 0,46 мм). Внутри втулки вставили 3 шайбы из резины 1Н-1ТМКШ-С-10 ГОСТ 7338-90. На комплект шайб воздействовали двумя пуансонами: левым с центровым отверстием, на который воздействовали подвижной пинолью с центром, и правым, неподвижно закрепленным в патроне станка (рис. 6). Пуансоны были изготовлены с минимальным зазором относительно внутренней поверхности стальной втулки.

При поджиге центром комплект шайб начнет сжиматься в осевом направлении, что измеряется по отклонению стрелки индикатора 2. При этом шайбы должны увеличиваться в диаметре, доходя до внутренней поверхности стальной втулки. Предварительные испытания показали, что наибольшие упругие деформации втулки происходят в месте минимальной жесткости – посередине комплекта резиновых шайб. Так при деформации у торцов втулки 0,06 мм, деформация в середине втулки составила 0,35 мм, то есть примерно в 6 раз выше. Поэтому для определения разумных величин деформаций комплекта резиновых шайб приняли решение измерять деформацию стальной втулки индикатором 1 посередине длины (рис. 7). Результаты эксперимента занесены в табл. 2.

Таблица 2

Данные измерений

№ опыта	Показание Индикатора 1, мм.	Показание Индикатора 2, мм.	Размер центральной части втулки, мм
1	0,01	0,44	21,75
2	0,03	0,56	21,78
3	0,07	0,7	21,8
4	0,1	0,9	21,85
5	0,13	0,98	21,89
6	0,18	1,12	21,98
7	0,2	1,23	22,05

Из анализа таблицы, можно сделать вывод, что при сжатии резиновой втулки в осевом направлении на 0,44 мм, происходит ее сдавливание и увеличение диаметра до контакта с внутренней поверхностью цилиндра.

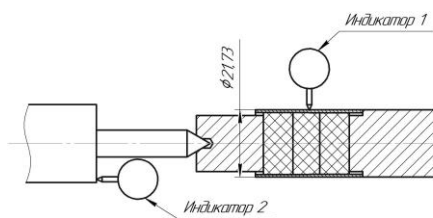


Рис. 6. Схема закрепления втулки

Следовательно, для повышения виброустойчивости заготовки, закрепляемой в оправке (см. рис. 5) достаточно сжатия комплекта прокладок на $(0,44:3) \times 17 \times M = 2,5 \times 5,25 \approx 13$ мм. Как показано в работе [16] этого достаточно, чтобы шероховатость обработанной поверхности уменьшилась в 2 раза и стала удовлетворять требованиям чертежа.



Рис. 7. Фото экспериментальной установки

При дальнейшем перемещении центра стальная втулка начнет упруго деформироваться, что может привести к дополнительным погрешностям формы в продольном сечении.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Аналитический обзор литературных источников показал, что проблема возникновения вибраций при фрезеровании тонкостенных фасонных втулок является общей для машиностроения.

Существующие способы и устройства для повышения жесткости стенок втулок в процессе обработки создают дополнительную погрешность в виде упругих деформаций втулки в месте поджима. Предложенная и исследуемая авторами оправка с упругими поджимными элементами лишена указанного недостатка, так как воздействует на всю длину втулки. Экспериментально установленные авторами параметры осевого натяга для оправки с упругими поджимными элементами позволяют достичь желаемого эффекта виброустойчивости, а также возможности повышения точности путем устранения местных упругих деформаций стенок втулки в местах поджима.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

1. При фрезеровании тонкостенных фасонных втулок частота вынужденных колебаний составляет 60 Гц, что на два порядка ниже собственной частоты колебаний оболочки - 1963,4 Гц, поэтому вынужденные колебания не вызывают резонансных явлений.

2. Экспериментально доказано, что для повышения виброустойчивости заготовки, закрепляемой в оправке достаточно сжатия комплекта прокладок на 13 мм. Этого достаточно, чтобы шероховатость обработанной поверхности уменьшилась в 2 раза и стала удовлетворять требованиям чертежа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abushawashi Y. A novel approach for determining material constitutive parameters for a wide range of triaxiality under plane strain loading conditions / Y. Abushawashi, X. Xiao, V.P. Astakhov // *International Journal of Mechanical Science*. – 2013. – Vol. 74. – P. 133-142.
2. Astakhov V.P. Machinability: existing and advanced concepts / V.P. Astakhov, J.P. Davim // *Machinability of Advanced Materials*. – London: Waley, 2014. – P. 1-56.
3. Yamnikov A.S. Chucks for thin-walled blanks / A.S. Yamnikov, A.O. Chuprikov // *Russian Engineering Research*. – 2015. – Т. 35, № 11. – P. 838-840.

4. Ямников А.С. Технологическое наследование свойств исходной заготовки в параметрах точности протяженных осесимметричных деталей / А.С. Ямников, О.И. Борискин, О.А. Ямникова, И.А. Матвеев // *Черные металлы*. – 2017. – №12. – С. 50-56.

5. Bykov G.T. Vibrational stability in turning thin-walled pipe by multicutter heads / G.T. Bykov, A.S. Yamnikov, O.A. Yamnikova, N.B. Dorokhin // *Russian Engineering Research*. – 2010. – Т. 30, № 3. – P. 296-299.

6. Kalinski K.J. Optimal spindle speed determination for vibration reduction during ball-end milling of flexible details International / K.J. Kalinski, M.A. Galewski // *Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2015. – Volume 92. – P. 19-30.

7. Yusoff A.R. Identifying bifurcation behavior during machining process for an irregular milling tool geometry / A.R. Yusoff // *Measurement*. – Vol. 93. – 2016. – P. 57-66.

8. Асташев В.К. Термомеханическая модель возбуждения автоколебаний при обработке металлов резанием / В.К. Асташев, Г.К. Корендясев, В.И. Ерофеев // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. – 2013. – № 1 (3). – С. 29-35.

9. Богомолов М.Н. Причины возникновения автоколебаний при резании / М.Н. Богомолов // *Научный альманах*. – Тамбов. – 2017. – № 1-3(27). – С. 25-30.

10. Кузнецов В.П. Устойчивость технологической системы при нарезании резьбы многолезцовыми головками / В.П. Кузнецов, О.А. Ямникова // *СТИН*. – 2004. – № 2. – С. 12-14.

11. Кобылин Р.А., Сенькин Е.С., Бойченко А.Е., Ганопольский Ф.Б., Ганов В.К. Способ закрепления тонкостенных деталей // Патент России №663495, В 23 В 31/40. 1979. Оpubл. 25.05.79, бюл. №19.

12. Дубинова И.Д., Дубинов А.Е. Нижегородцев Ю.Б. Способ закрепления тонкостенной детали // Патент России №2134629 В23Q 3/00. 1999. Оpubл. 20.08.1999.

13. Yamnikov A. Reducing the dynamic loads impact on themilled thin-wall sleeve surface quality / A. Yamnikov, M. Bogomolov, O. Yamnikova // *AIP Conference Proceedings*. – 2019. – Vol. 2188. – 050012. – doi:10.1063/1.5138439.

14. Смирнов В.Г., Егоров Б.А., Смирнов Г.В., Федоров А.А., Сафьянов А.В. Оправка для центрирования и закрепления тонкостенной детали // Патент России №2134182, D 23 D 31/40. 1999.

15. Тимофеев А.П. Оправка для обработки тонкостенной детали // Патент России №2 291 760 С2 В23 В31/40. 2007.

16. Ямников А.С. Центрирующая оправка повышенной виброустойчивости для фрезерования тонкостенных втулок / А.С. Ямников, М.Н. Богомолов // *Черные металлы*. – 2019. – № 5. – С. 52-57.

17. Богомолов М.Н., Чуприков А.О., Ямников А.С. Оправка для закрепления тонкостенных цилиндрических заготовок // Патент России № 2688019, В23В31/40. Оpubл. 17 мая 2019 г. Бюл. №14.

18. Ямников А.С. Фрезерная базирующе - зажимная оправка / А.С. Ямников, М.Н. Богомолов, А.О. Чуприков // *Технология машиностроения*. – 2019. – № 12. – С. 13-17.

19. Abushawashi Y. FEM simulation of metal cutting using a new approach to model chip formation / Y. Abush-

washi, X. Xiao, V.P. Astakhov // International Journal of Advances in Machining and Forming Operations. – 2011. – Vol. 3. – P. 71-92.

20. Astakhov V.P. Authentication of FEM in metal cutting. Finite element method in manufacturing processes// V.P. Astakhov, J.P. Davim. – New York: Wiley, 2011. – P. 1-43.

21. Comak A. Modeling dynamics and stability of variable pitch and helix milling tools for development of a design method to maximize chatter stability / A. Comak, E. Budak // Precision Engineerin. – 2017. – № 47. – P. 459-468.

22. Yamnikov A.S. Simulation of oscillation frequency effects on complex shape part milling / A.S. Yamnikov, M.N. Bogomolov // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1029. – 012006. doi:10.1088/1757-899X/1029/1/012006.

23. Zagórski I. Artificial neural network modelling of vibration in the milling of AZ91D alloy / I. Zagórski, M. Kulisz, A. Semeniuk, A. Malec // Advances in Science and Technology Research Journal. – 2017. – Vol. 11, iss. 3. – P. 261-269.

24. Богомолов М.Н. Моделирование динамики фрезерования сложнопольных деталей / М.Н. Богомолов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2017. – №5. – С. 371-376.

25. Киселев И.А. Моделирование динамики процесса фрезерования тонкостенных сложнопольных деталей: дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 2013. – 243 с.

26. Зенкевич. О. Метод конечных элементов в технике. / О. Зенкевич. – Москва: МИР, 1975. – 541 с.

27. Ямникова О.А. Построение математической модели колебаний нежесткого вала при обработке резанием / О.А. Ямникова // СТИН. – 2003. – № 1. – С. 18-21.

28. Wu S. Experimental study of thin wall milling chatter stability nonlinear criterion / S. Wu, R. Li, X. Liu, L. Yang, M. Zhu // Procedia CIRP. – 2016. – Vol. 56. – P. 422-427.

29. Yang Y. Chatter prediction for the peripheral milling of thin-walled workpieces with curved surfaces / Y. Yang, H. Zhang, Y. Ma, M. Wan // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2016. – Vol. 109. – P. 36-48.

Experimental Determination of the Minimum Axial Tightness of a Set of Elastic Elements in a Vibration-Damping Mandrel for Securing Thin-Walled Shells

Yamnikov A.S., Bogomolov M.N.

Tula State University

Tula, Russian Federation

yamnikovas@mail.ru, bogomolovmn@mail.ru

Abstract. The fact of a decrease in the vibration resistance of the milling process of shell structures made of high-strength materials due to their insufficient stiffness is noted. Known methods and devices for increasing the stiffness of fixed shells are analyzed. An example of a decrease in the quality of the processed surface of a shaped sleeve with an ineffective method of fixing is given. The frequency of natural oscillations of the produced sleeve is theoretically determined and it is shown that this frequency is two orders of magnitude higher than the frequency of forced oscillations. It is shown that the largest oscillation amplitude at the resonant frequency corresponds to the sleeve midsection. The disadvantages of known designs of clamping mandrels for thin-walled sleeves are considered. A new patented design of the mandrel with an elastic-plastic damping element in the form of a set of rubber washers, put on the mandrel body, which, when axially compressed, increase in diameter and come into contact with the inner cylindrical sur-

face of the sleeve with a small guaranteed tension, is suggested. In order to determine the necessary axial tension of the set of rubber gaskets, a special experiment was carried out on a simplified model of the mandrel, consisting of a steel sleeve of reduced diameter and thickness, into which the similar rubber washers are inserted. Inside the sleeve, two punches act on the set of rubber washers: movable and fixed ones. The movements of the movable punch, as well as changes in the diameter of the steel sleeve in the midsection, were measured with a dial test indicator. The value of the minimum necessary axial tension is established for the tight fit of the rubber gaskets to the inner surface of the steel sleeve. It is shown that a significant excess of the tension can cause additional errors in the axial section of the sleeve being processed.

Keywords: shell, vibration, natural oscillation frequency, milling, damping, rubber deformation.

Обоснование рациональных конструкторско-технологических параметров операции хонингования цилиндра дизеля

Сафарова Л.Л., Маликов А.А., Ямников А.С.
Тульский Государственный университет
Тула, Российская Федерация
yamnikovas@mail.ru

Аннотация. Проведен краткий анализ требований к точности и качеству поверхности зеркала цилиндра дизелей. Отмечено, что наличие неоднородной структуры в литой чугунной заготовке цилиндра приводит в течение времени к изменениям достигнутых точности размеров и формы обработанных поверхностей. Предложено к операциям термического старения добавить естественное старение после черновой механической обработки в виде пролеживания на складе в течение 6 месяцев, что существенно стабилизирует размеры и форму готовой детали. Описано изменение технологического процесса, позволяющего операцию хонингования производить на одном станке с ЧПУ с помощью сменных хонеров. Показано, что применение алмазных хонинговальных брусков на металлической связке не позволяет полностью удовлетворить требованиям диаграммы Аббота. Установлено, что двухпозиционная хонинговальная головка конструкции стерлитамакского станкостроительного завода имеет на каждой позиции недостаточный охват площади хонингуемой поверхности. Это вынуждает увеличивать количество рабочих ходов, что приводит к избыточному нагреву заготовки. Рассчитаны параметры головки, соответствующие оптимальным условиям хонингования.

Ключевые слова: зеркало цилиндра, точность размеров и формы, диаграмма Аббота, хонингование, температура заготовки.

ВВЕДЕНИЕ

Конструктивно цилиндр дизеля ТМЗ 450 с воздушным охлаждением близок к мотоциклетным бензиновым двигателям, так как оснащен развитыми ребрами охлаждения, отлитыми непосредственно на нем [1]. Однако, особенности работы дизеля, в частности повышенная степень сжатия, требуют более высокой прочности и точности изготовления рабочей поверхности зеркала цилиндра [2]. Заготовку цилиндра отливают из специального чугуна [3]. Материал заготовки имеет неоднородную структуру, что вызывает перераспределение остаточных напряжений и влияет на размеры и форму обработанных поверхностей уже готовой детали [3-5]. К рабочей поверхности зеркала цилиндра дизелей предъявляются высокие требования по геометрической точности и качеству поверхности [1-3]. Существующая на производстве технология не позволяет в полной мере выполнить заданные требования при приемлемой конкурентоспособности, поэтому нуждается в анализе возможностей повышения ее эффективности.

При разработке технологических операций по достижению заданного качества деталей уделяют внимание проявлению технологической наследственности, прояв-

ляющейся в переносе дефектов заготовки на промежуточных операциях на готовую деталь [3-6]. Так, в работе авторов [3] рекомендовано применять естественное старение отливок в течение 6 месяцев, что обеспечивает снижение разброса размеров зеркала цилиндра после окончательной обработки с $3 \div 10$ мкм до $0 \div 5$ мкм.

Решению задач стабилизации размеров чугунных деталей посвящены работы авторов [3, 4]. В них отмечается важность выполнения основных технологических требований по стадийности обработки заготовок, особенно литых. Специфические свойства чугунных отливок анализируются в работах [7-13]. Отмечается, что для достижения размерной стабильности следует применять старение [3, 4]. В действующем производстве ограничиваются термическим старением после каждого цикла операций механической обработки. Наши исследования доказали необходимость длительного – в течение 6 месяцев, естественного старения после первой черновой операции [3, 4].

Традиционно для достижения высокого качества поверхности зеркала цилиндра применяют хонингование [14-19]. Для достижения заданной точности в исходном технологическом процессе предусмотрены 6 хонинговальных операций, выполняемых последовательно на вертикально-хонинговальном станке модели 3822ОП40 и вертикально-хонинговальном станке модели СС-6062. Черновое хонингование удаляет основную часть припуска. На последующих операциях достигают нужного размера, точности формы и требований к качеству поверхности в соответствии с заданной диаграммой Аббота [14]. При этом не всегда удается избежать получения бракованных деталей. Так по отклонению от цилиндричности бракуют до 10 % обработанных заготовок от партии в количестве 100 штук. По соответствию заданной диаграмме Аббота бракуется 30 % обработанных заготовок, а именно несоответствие по трем точкам $t_p = 20 \div 40\%$.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В отличие от ранее применяемого метода обработки внутренней поверхности детали «Цилиндр», на АО «АК «Туламашзавод» во вновь разработанном технологическом процессе операцию хонингования решено выполнять за одну операцию. Для осуществления данного метода обработки зеркала детали «Цилиндр» был проведен анализ технологической наследственности размеров внутренней поверхности, полученных на операциях от предварительного растачивания до окончательного растачивания и

хонингования [13]. Анализ показал, что достичь сокращения операций хонингования можно только путем повышения точности отделочного растачивания цилиндра, которое получено при совмещении на одной операции при неизменных установках предварительного и отделочного растачивания [3, 4]. Для достижения заданного качества поверхности необходимо обосновать параметры прогрессивного технологического процесса хонингования внутреннего отверстия детали.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Хонингование осуществляют на вертикально-хонинговальном станке с ЧПУ СС740В2. Обработка начинают с хонингования отверстия в размер $\varnothing 84,99^{+0,03}$ мм до шероховатости Ra 1,25 (технологический параметр) предварительно. В ходе предварительного хонингования выдерживают допуск цилиндричности отверстия с торца А – 0,01 мм на размере Y, допуск цилиндричности отверстия с торца В – 0,01 мм на длине 13 мм, допуск цилиндричности отверстия – 0,005 мм на длине 107 мм «рис. 1».

В качестве режущей части инструмента для чернового хонингования назначен алмазный хонинговальный брусок 6×4×100 АС6 125/100 М2-01 100, зернистость которого позволяет получить заданный технологией параметр шероховатости. Далее хонингуют отверстие в размер $\varnothing 85^{+0,03}$ мм, обеспечивая шероховатость Ra 0,5...Ra 0,2. Выдерживают допуск цилиндричности отверстия с торца А – 0,01 мм на размере Y, допуск цилиндричности отверстия с торца В – 0,01 мм на длине 13 мм, допуск цилиндричности отверстия – 0,005 мм на длине 107 мм. На следующем переходе наносится сетка, выдерживая $\angle 60^\circ$. Замеры производят с $t_p = 20\%$ в трех плоскостях на расстояниях: 17 мм, 63 мм, 116 мм от верхнего торца цилиндра.

В качестве режущей части инструмента для чистового хонингования подобран брусок алмазный хонинговальный 6×4×100 АСМ 28/20 М2-01 100.

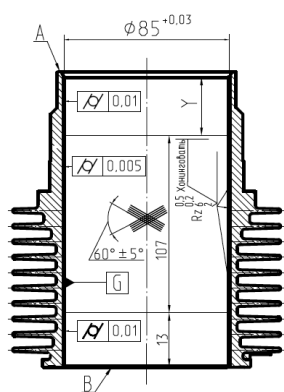


Рис. 1. Эскиз обработки на хонинговальной операции

Сетка наносится бруском 6×4×100 АСМ 40/28 М2-01 100, глубина врезания зерен которого позволяет нанести смазочные карманы, удовлетворяющие заданной диаграмме Аббота [14].

На окончательном переходе выполняют плосковершинное хонингование, а именно хонингуют отверстие, выдерживая размер $\varnothing 85^{+0,03}$ мм до шероховатости $Rz 6 \div Rz 2$; Ra 0,5÷Ra 0,2. Выдерживают допуск цилиндричности

отверстия с торца А – 0,01 мм на размере Y, допуск цилиндричности отверстия с торца В – 0,01 мм на длине 13 мм, допуск цилиндричности отверстия – 0,005 мм на длине 107 мм. В качестве режущей части инструмента для плосковершинного хонингования принимают алмазный хонинговальный брусок 6×4×100 АСМ 20/14 В2-01 100 на органической связке, структура которой позволяет выполнить функцию сглаживания.

Далее заготовку раскрепляют, снимают и промывают в комплексе для обезжиривания МСП-100-2 в специальном антикоррозионном растворе. Перед окончательным контролем размеров заготовку выдерживают в термоконстантной комнате при температуре $20 \pm 1^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха $58 \pm 5\%$. Для проверки эффективности разработанного технологического процесса была произведена партия деталей в количестве 100 шт. Полученная диаграмма Аббота представлена на «рис. 2».

Как видно из графика при относительной опорной длине профиля $t_p < 40\%$, диаграмма находится ниже заданной области.

Так как на АО «АК «Туламашзавод» производят цилиндры с внутренним диаметром $\varnothing 85^{+0,03}$ мм для серии дизелей ТМЗ-450, ТМЗ-520 и $\varnothing 95^{+0,03}$ для дизелей ТМЗ-650, - то, в связи с этим, заводом-изготовителем вертикально-хонинговального станка с ЧПУ СС740В2, г. Стерлитамак [20], были спроектированы две хонинговальные головки для двух типоразмеров деталей «Цилиндр» дизелей серии ТМЗ.

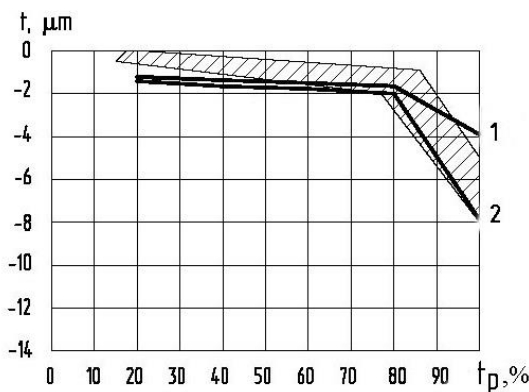


Рис. 2. Диаграмма Аббота, полученная новым методом хонингования: р - уровень сечения профиля, t_p – относительная опорная длина профиля, заштрихованный участок – поле допуска на положение диаграммы Аббота; 1 – диаграмма для расстояния от торца цилиндра 17 и 63 мм, 2 – для расстояния 116 мм

Хонинговальная головка имеет 12 ячеек под бруски шириной 6 мм. В зависимости от выполняемого операционного перехода одновременно могут работать только 6 брусков одного вида (чистовые или черновые).

Данная конструкция не полностью удовлетворяет условию – суммарная ширина комплекта брусков zB должна составлять $25 \div 35\%$ длины окружности πD обрабатываемого отверстия [14, 15]:

$$zB \in (0,25; \dots; 0,35)\pi D, \quad (1)$$

где D – диаметр обрабатываемого отверстия, мм.

По формуле (1), произведен расчет суммарной ширины комплекта брусков хонинговальной головки

СС740В2.07.000СБ для обрабатываемого зеркала «Цилиндра» $\varnothing 85$: $12 \cdot 6 \in (0,25 \div 0,35)\pi \cdot 85$, отсюда должны получить $72 \in (66,725; \dots, 93,415)$. То есть расчетная суммарная ширина комплекта брусков хонинговальной головки укладывается в заданный интервал.

По формуле (1) также произведен расчет суммарной ширины комплекта брусков хонинговальной головки СС740В2.07.000СБ для обрабатываемого зеркала «Цилиндра» $\varnothing 95$: $12 \cdot 6 \notin (0,25 \div 0,35)\pi \cdot 95$ или $72 \notin (74,575 \dots 104,405)$.

Из вышеприведенного расчета видно, что рабочая поверхность брусков хонинговальной головки СС740В2.07.000СБ является недостаточной для обработки зеркала «Цилиндра» $\varnothing 95$. Указанный недостаток можно исправить путем увеличения количества ходов при обработке, что в свою очередь вызывает повышение температуры заготовки, и как следствие, изменение размеров.

Для подтверждения данного факта в двигателном производстве АО «АК «Туламашзавод» проведено исследование, которое заключалось в точечном измерении температуры заготовки детали «Цилиндр» до и после хонингования, а также в процессе охлаждения заготовки. Измерение производилось пирометром ПИТОН - 106. Зависимость температуры от времени обработки и охлаждения заготовки приведены на «рис. 3».

В результате сделан вывод, что дополнительное время на обработку, вызванное добавлением числа проходов дает нагревание чугуновой заготовки детали «Цилиндр» и, как следствие, изменение размера после охлаждения.

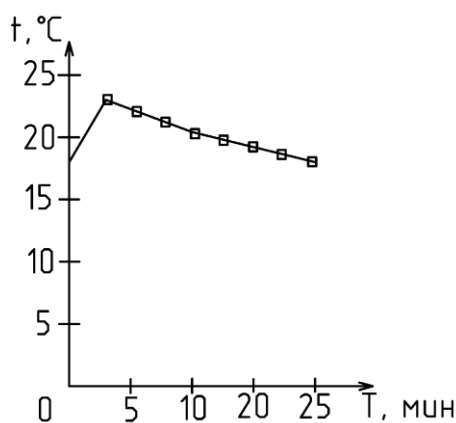


Рис. 3. График зависимости температуры от времени обработки и охлаждения заготовки

Для получения заданной точности размеров увеличение числа ходов хонинговальной головки недопустимо. Поэтому, произвели корректировочный расчет опытной хонинговальной головки.

Преобразовали формулу (1) для определения требуемого количества брусков:

$$z \in (0,25 \div 0,35) \frac{\pi D}{B}, \quad (2)$$

где D – диаметр обрабатываемого отверстия, мм; B – ширина брусков.

По формуле (2) определили возможные сочетания необходимых параметров и количества брусков для хонингования «Цилиндров» $\varnothing 85$ мм и $\varnothing 95$ мм «табл. 1».

Таблица 1

Расчетное количество брусков в хонголке в зависимости от диаметра отверстия и доли суммарной ширины комплекта брусков zB от длины окружности πD

Суммарная ширина комплекта брусков zB	Расчетное количество брусков шириной $B = 8$ мм		Расчетное количество брусков шириной $B = 10$ мм	
	$0,25 \pi D$	$0,35 \pi D$	$0,25 \pi D$	$0,35 \pi D$
$D=85$ мм	8	12	7,225	8
$D=95$ мм	9	13	9,3415	10,4405

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ, ПРЕДЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЙ, РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

До принятия решения о закупке нового оборудования опытное хонингование новой головкой было проведено на оборудовании российского филиала американской фирмы SUNNEN AG [21], являющейся ведущим производителем хонинговального оборудования. Так как заготовки пробной партии цилиндров были отлиты на ПК «ТУЛАМАШЗАВОД» с припуском более миллиметра, то они были предварительно расточены на универсальном оборудовании. Средний размер составил $D_{med} = 94,9$ мм, предельно допустимые размеры: $D_{max} = 94,9^{+0,05}$, $D_{min} = 94,9_{-0,05}$. Финишная обработка производилась на хонинговальной станке SV20. Были заданы предельно допустимые размеры: $D_{max} = 95^{+0,03}$, $D_{min} = 95$. Точность обработки была замерена на КИМ Ares 10.7.5 «табл. 2».

Таблица 2

Размеры зеркала до и после хонингования

№ детали	Размеры после растачивания			Размеры после хонингования			
	$D_{min},$ мм	$D_{max},$ мм	Некруглость, мм	$D_{min},$ мм	$D_{max},$ мм	Некруглость, мкм	Непрямолинейность, мкм
1	94,85	94,94	0,09	95,016	95,020	5,64	3,00
2	94,85	94,87	0,02	95,016	95,020	2,58	1,99
3	94,85	94,93	0,08	95,016	95,024	5,48	1,49
4	94,89	94,91	0,2	95,018	95,026	2,49	2,83

Графическое представление экспериментальных данных из таблицы показано на «рис. 4 и 5».

Замеры шероховатости проводили на профилографе-профилометре «Сейтроник ПШ 8-4», который автоматически на ЭВМ строит профилограмму измеряемой поверхности. Полученный результат представлен на «рис. 6», из которого видно, что шероховатость соответствует требованиям.

Из графиков видно, что разброс размеров на деталь после предварительного растачивания можно исправить хонингованием, увеличив число проходов хонинговальной головки, однако это приводит к повышению температуры нагрева чугуна при хонинговании и, как следствие, к изменению размера детали после остывания. Отклонение от цилиндричности после операции хонингования уменьшается пропорционально отклонению, полученному на предварительном растачивании, что говорит о технологической наследственности параметров. Следовательно, технологически необходимо ужесточить параметры обработки на предварительном растачивании.

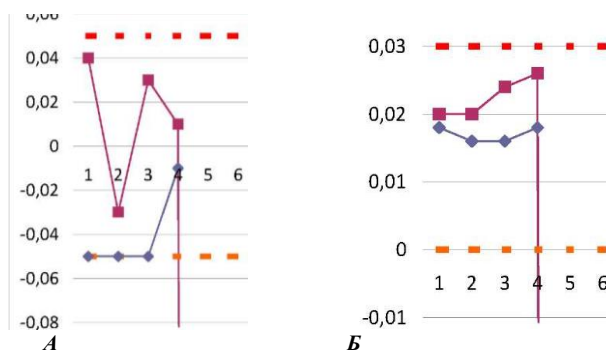


Рис. 4. Размеры цилиндра до (А) и после хонингования (Б)
 —◆— Dmin, —■— Dmax,
 - - - (Max. Tolerance, Min. Tolerance)

По результатам расчета видно, что предпочтение следует отдавать четным значениям z , так как при этом геометрическая форма обрабатываемых отверстий будет исправляться более интенсивно, чем при нечетных значениях [21]. Поэтому принимали следующие параметры брусков для новой хонинговальной головки: - количество брусков $z = 8$, ширина брусков $B = 10$ мм.

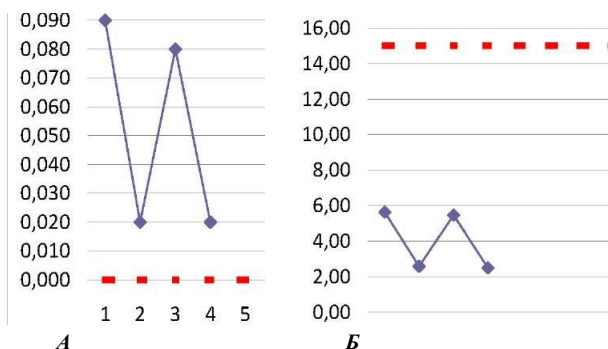


Рис. 5. Отклонения от цилиндричности до (А) и после хонингования (Б): —◆— Некруглость,
 - - - Tolerance (Допуск)

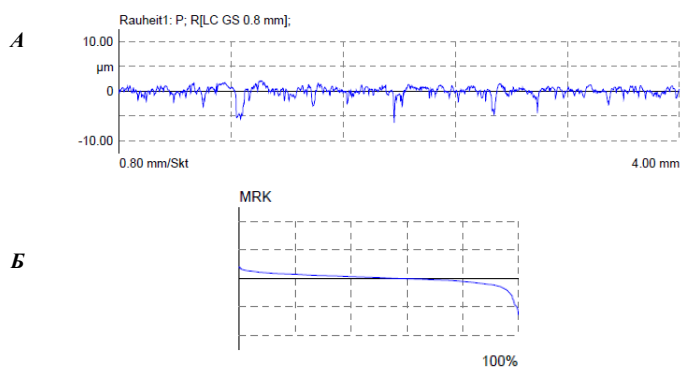


Рис. 6. Профилограмма (А) и диаграмма Аббота (Б)

Данные значения удовлетворяют условию хонингования зеркала «Цилиндра» дизеля серии ТМЗ как для $\varnothing 85$ мм, так и для $\varnothing 95$ мм.

На основании вышеприведенных расчетов была спроектирована опытная хонинговальная головка «рис. 7». Опытная хонинговальная головка представляет собой нормализованную конструкцию для обработки отверстий $\varnothing 85$ мм и $\varnothing 95$ мм.

Головка жестко закрепляется в шпинделе станка. Рабочая часть хонинговальной головки состоит из двух основных деталей – корпуса 3 с пазами для размещения колодок 1 и штока 2 с конусом для радиальной подачи брусков. В связи с небольшой толщиной изнашиваемого слоя алмазных брусков (1-3 мм), медленным износом и малыми величинами радиальной подачи брусков, рабочая часть штока 2 выполнена со сравнительно небольшим углом при вершине конуса 10° .

Конструкция головки обеспечивает настройку на размер путем выдвигания и сближения колодок 1 подъемом или опусканием штока 2.

Хонингование осуществляют на вертикально-хонинговальном станке с ЧПУ СС740В2, приспособление для установки заготовки на котором показано на «рис. 8».

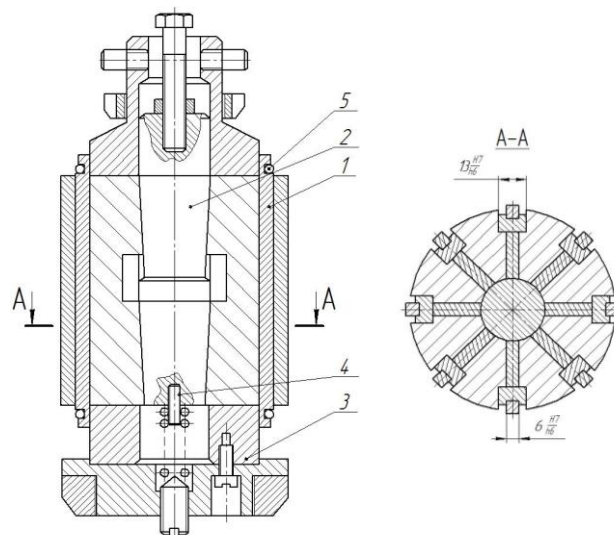


Рис. 7. Опытная хонинговальная головка: 1 – колодка; 2 – шток; 3 – корпус; 4 – упор; 5 – пружина

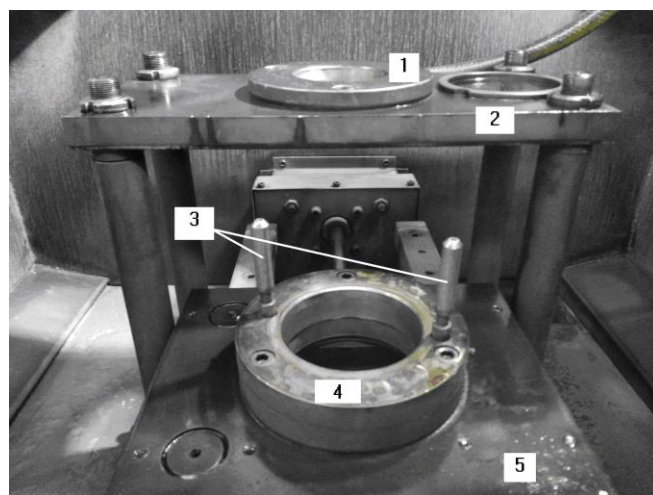


Рис. 8. Схема позиции хонингования

Заготовку цилиндра устанавливают и закрепляют в специальном приспособлении, которое представляет собой выкатной столик 5 с пневмоприводом.

На столике 5 крепятся сменные базовые фланцы 4, на которые в загрузочной позиции устанавливаются заготовки. В рабочей позиции столик с заготовкой закатывается

под неподвижную плиту 2, в которой закреплена сменная кондукторная втулка 1.

Заготовка во время обработки удерживается от проворота пальцами 3, входящими в углубления ребер, а в осевом положении «плавает» с зазором $0,1 \pm 0,2$ мм между базовым фланцем и кондукторной втулкой, что позволяет ей самоустанавливаться относительно хона.

Описанная конструкция приспособления позволяет снизить вспомогательное время на установку заготовки и улучшить условия труда рабочего.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В статье критически проанализирован и обобщен опыт технологий предприятия с учетом известных литературных данных.

Отмечено, что на точность окончательных размеров детали значительное влияние оказывает проявление технологической наследственности, для компенсации которой предложены технологии естественного и искусственного старения заготовки.

Полученные в работе результаты показывают, что найденный авторами путь совершенствования технологической операции хонингования цилиндра дизеля открывает перспективы для дальнейшего применения на машиностроительных предприятиях.

ВЫВОДЫ

1. Разброс размеров детали после предварительного растачивания можно исправить хонингованием, увеличив число проходов хонинговальной головки. Однако это приводит к повышению температуры нагрева заготовки при хонинговании и, как следствие, к изменению размера детали после остывания.

2. Отклонение от цилиндричности после операции хонингования уменьшается пропорционально отклонению, полученному на предварительном растачивании, что говорит о технологической наследственности параметров. Следовательно, технологически необходимо ужесточить параметры обработки на предварительном растачивании.

3. Применение опытной головки в сочетании с брусками на органической связке на финишном переходе обеспечило выполнение заданных требований по шероховатости поверхности зеркала цилиндра.

4. В результате проведенных исследований и работ разработан новый технологический процесс обработки детали «Цилиндр», включающий в себя принципиально новый метод хонингования внутреннего отверстия детали.

5. Приведенные рекомендации позволят выполнять качественную обработку деталей «Цилиндр» дизеля серии ТМЗ с выполнением заданной конструкторской документацией диаграммой Аббота.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дизели ТМЗ. Технические условия ТУ 4561-005-07514340-2003. – Тула, 2003. – 55 с.

2. Холдерман Д.Д. Автомобильные двигатели: теория и техническое обслуживание / Д.Д. Холдерман, Ч.Д. Митчелл. Пер. с англ. С.А. Добродеева. - 4-е изд. - Москва: Издательский дом Вильямс. - 2006. - 660 с.

3. Ямников А.С. Снижение влияния технологической наследственности на точность хонингованных заготовок цилиндров применением естественного старения / А.С. Ямников, Л.Л. Сафарова // Черные металлы. - 2019. - № 11. - С. 47-51.

4. Васильев А.С. Влияние наследственных технологических погрешностей изготовления базовой трубы на параметры собранного реактивного двигателя / А.С. Васильев, А.С. Ямников, О.А. Ямникова, И.А. Матвеев // Черные металлы. – 2019. - №1. - С. 67-71.

5. Ямников А.С. Технологическое наследование свойств исходной заготовки в параметрах точности протяженных осесимметричных деталей / А.С. Ямников, О.И. Борискин, О.А. Ямникова и И.А. Матвеев // Черные металлы. – 2017. - №12. - С. 50-56.

6. Yamnikov A.S. Relationship of the method of obtaining the original billet with the accuracy of manufacturing of the extended axisymmetric bodies / A.S. Yamnikov, E.N. Rodionova and I.A. Matveev // CIS Iron and Steel Review. – 2020. - Vol. 20. - P. 25-28.

7. Biswas S. Use of published experimental results to validate approaches to gray and ductile iron mechanical properties prediction / S. Biswas, C. Monroe, T. Prucha // International Journal of Metalcasting. – 2017. - Vol. 11, is. 4. - P. 656-674.

8. Gromczyk M. Stereological analysis of carbides in hypoeutectic chromium cast iron / M. Gromczyk, M. Kondracki, A. Studnicki, L. Szajnar // Archives of Foundry Engineering. – 2015. - Vol. 15, is. 2. - P. 17-22.

9. Richards V. Age strengthening of gray iron — kinetics study / V. Richards, T.V. Anish, S. Lekakh // International Journal of Metalcasting. – 2008. - Vol. 2, is. 1. - P. 7-16.

10. Teague J.A. Age Strengthening and machinability interactions in gray cast iron / J.A. Teague, V.L. Richards, S.N. Lekakh, K.D. Peaslee // International Journal of Metalcasting. – 2010. - Vol. 4, is. 2. - P. 45-57.

11. Zhenting W. Investigation on microstructure and wear resistance of the new Cr-W-Mo-V high-alloy wear resistant cast iron / W. Zhenting, G. Hongming // Advanced Materials Research. – 2015. - Vol. 1061-1062. - P. 670-673.

12. Yamnikov A.S. Ensuring precision for small arms lock assembly with consideration for interface contact stiffness / A.S. Yamnikov, A.A. Malikov, O.S. Kashmin, D.I. Troitsky // CIS Iron and Steel Review. – 2018. - Vol. 15. - P. 40-44.

13. Ямников А.С. Повышение производительности обработки зеркала цилиндра двигателя / А.С. Ямников, Л.Л. Сафарова // Черные металлы. - 2020. - № 9. - С. 68-72.

14. Ямников А.С. Синтез диаграммы Аббота / А.С. Ямников, Л.Л. Сафарова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2018. - № 8. - С. 30-34.

15. Бабичев А.П. Хонингование: монография / А.П. Бабичев, Ю.Н. Полянчиков, А.В. Славин, В.М. Шумячер, М.Ю. Полянчикова, Л.В. Гусакова; под ред. А.П. Бабичева. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2013. – 245 с.

16. Moos U. Analysis of process forces for the precision honing of small bores / U. Moos, D. Bahre // Procedia CIRP. – 2015. - Vol. 31. - P. 387-392.

17. Joliet R. A process model for force-controlled honing simulations / R. Joliet, M. Kansteiner, P. Kersting // Procedia CIRP. - 2015. - Vol. 28. - P. 46-51.

18. Rosenberger R. Zusammenfassung verschiedener forschung und versuchsarbeiten uber das honen / R. Rosenberger // Werkstattstechnik. – 1962. - Vol. 52, is 2. - P. 55-62.

19. Сафарова Л.Л. Выбор СОЖ для хонингования цилиндров дизелей ТМЗ-450, ТМЗ-520, ТМЗ-650 / Л.Л. Сафарова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2020. - № 4. - С. 257-261.

20. <http://www.metalstanki.com.ua/proizvoditeli-stankov/sterlitamaksiy-stankostroytelnyi-zavod> (дата обращения 25.04.2020).

21. <http://antey.ltd/proizvoditeli/sunnen-ag> (дата обращения 01.09.2020).

Justification of Rational Design and Process Parameters of a Diesel Cylinder Honing

Safarova L.L., Malikov A.A., Yamnikov A.S.

Tula State University
Tula, Russian Federation
yamnikovas@mail.ru

Abstract. A brief analysis of the requirements for accuracy and quality of the surface of the cylinder mirror in diesel engine was carried out. It was noted that the presence of an inhomogeneous structure in a cast iron blank of the cylinder after some time leads to changes in the achieved dimensional accuracy and shape of the machined surfaces. It was proposed to add natural aging to the thermal aging operations after rough machining in the form of lying in the warehouse for 6 months, which significantly stabilizes the size and shape of the finished part. The paper describes a change in the technological process, which allows the honing operation to be performed on one CNC machine using replaceable honing tools. It was shown that the

use of metal-bonded diamond honing stones does not fully satisfy the requirements of the Abbott diagram. It was found that the two-position honing head of the Sterlitamak machine-tool plant design has insufficient coverage of the honed surface area at each position. This forces an increase in the number of working strokes, which leads to excessive heating of the blank. The head parameters, corresponding to the optimal conditions of honing, were calculated.

Keywords: cylinder mirror, dimensional and shape accuracy, Abbot diagram, honing, blank temperature.

Анализ методов и средств оценки качества поверхностного слоя изделий, получаемых SLM-методом из жаропрочных сплавов

Левина Т.А., Сафонов Е.В., То Мань Хунг
ФГБОУ ВО "Московский политехнический университет",
Москва, Российская Федерация
t-levina@internet.ru

Аннотация. В статье рассмотрены методы необходимые для измерения качества поверхности металлических изделий характерных для технологии селективного лазерного сплавления (SLM-метод) из жаропрочных сплавов, как наиболее перспективной для применения в авиастроительной промышленности. Легкая конструкция становится все более интересной для предприятий машиностроения, поскольку стоимость одного компонента снижаются за счет использования меньшего количества материала, а более легкие компоненты экономят вес и, следовательно, в основном расход энергии при дальнейшем использовании. Но, не смотря на явные преимущества данного метода, также очень трудно спрогнозировать свойства детали, выполненной по методу SLM, так как в технологический процесс вовлечено много переменных факторов, а безотказность работы и срок службы изделия определяется точностью его размеров и формы. По мнению авторов решающее влияние на эксплуатационные свойства деталей оказывают характеристики поверхностного слоя материалов изделия. В работе определена взаимосвязь между эксплуатационными свойствами и качеством поверхностного слоя, обозначены основные критерии контроля качества поверхности. Рассмотрены и проанализированы как традиционные, так и современные методы измерения выбранных параметров качества поверхностного слоя.

Ключевые слова: аддитивные технологии, SLM-метод, качество поверхностного слоя.

ВВЕДЕНИЕ

Аддитивные технологии и их внедрение в ключевые сферы жизнедеятельности неразрывно связаны с развитием наукоемких и высокотехнологичных отраслей, в частности 3D-печать способна производить уникальные изделия путём управляемого качества получаемого слоя материала.

SLM-метод делает возможным изготовление деталей сложной геометрической формы, получение которых традиционными методами невозможно. Производство деталей может быть развернуто, как только изделие будет спроектировано.

Существующий спектр материалов позволяет получить детали SLM-методом с требуемым комплексом механических свойств и стойкостью к воздействию окружающей среды.

Особое место в авиации и ракетной технике занимают жаропрочные сплавы, детали из которых работают под нагрузками при температуре выше 1000°C и несомненным достоинством жаропрочных сплавов является высокое сопротивление пластической деформации.

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

В процессе эксплуатации поверхность изделий, в том числе в летательных аппаратах, подвергается интенсивному износу и именно с нее в большинстве случаев начинается потеря служебного назначения детали. Применение SLM-метода в производстве позволяет существенно снизить сегрегационную неоднородность материала изделий из жаропрочных сплавов.

В последние годы появилось большое количество работ посвященных [1,2] физическим основам процесса послойного селективного лазерного плавления и синтеза функциональных мезоструктур. В статье [3] описаны области применения быстрого прототипирования в производстве. В диссертации [4] рассмотрены вопросы производительности селективного лазерного спекания. В статьях [5,6,7] изучены вопросы точности изготовления изделий SLM-методом.

Структура и как следствие свойства деталей, полученных данным способом, зависят от множества параметров технологического процесса: характеристик лазера, скорости, шага и направления сканирования, состава и размера порошка и т.п. [8,9] Известен целый ряд работ, [10,11,12,13] посвященных исследованию материалов и изделий, полученных с использованием SLM подходов, однако в настоящее время, много вопросов остаётся неисследованными.

Одним из недостатков указанных работ является отсутствие глубокого понимания качества поверхностного слоя изделий из жаропрочных сплавов, получаемых SLM - методом.

В процессе эксплуатации в составе авиационного двигателя детали испытывают ряд негативных факторов, что приводит к образованию трещин, забоин. [14,15,16] Одним из основных факторов, который влияет на преждевременный износ деталей, является качество поверхностного слоя готового изделия. Свойства поверхности определяются технологическим процессом жаропрочных сплавов.

Известно, что SLM-технология представляет собой процесс аддитивного производства, имеющего заданную трехмерную форму детали на основе CAD – модели, избирательного плавления поверхности порошкового слоя. Таким образом, в процессе формирования SLM - слоёв изделия необходимо контролировать развитие остаточного напряжения, как на поверхности, так и в объеме детали. [17,18]

С помощью 3D-печати детали изготавливаются послойно, то есть слои прилипают друг к другу, это также

означает, что они могут расслаиваться между собой при определенных напряжениях или ориентациях структуры слоя. Более того, при затвердевании поверхностного слоя, детали склонны давать сильную усадку, вызывая значительные остаточные напряжения в изготовленных изделиях. Эти остаточные напряжения могут приводить к деформациям и даже к разрушению поверхности. Поэтому мы должны понимать, как для разных SLM изделий, разных размеров можно оценить качество поверхностного слоя и какие критерии являются наиболее решающими с точки зрения обеспечения эксплуатационных свойств готовой детали.

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ И КАЧЕСТВОМ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ

Известно, что шероховатость и волнистость поверхности, структура, фазовый и химический состав поверхностного слоя по-разному влияют на эксплуатационные свойства деталей. Знание закономерностей комплексного и раздельного влияния параметров поверхностного слоя деталей на их эксплуатационные свойства позволит оптимизировать SLM технологические процессы изготовления деталей. Например, при работе литых деталей, особенно при знакопеременной нагрузке, микротрещины, объединяются, и разрушение детали в большинстве случаев начинается с поверхности.

При оценке качества и эксплуатационных свойств изделий особо рассматриваются стабильность параметров качества поверхности детали. Для деталей авиастроительного производства наиболее важными эксплуатационными свойствами материала являются усталостная прочность и долговечность, коррозионная стойкость, способность воспринимать динамические нагрузки.

Установлено, [19,20,21] что усталостная прочность металлов тесно связана с качеством поверхности (геометрическими и физико-механическими параметрами). Например, неровности на поверхности, вызывая концентрацию напряжений, могут существенно снижать усталостную прочность деталей. Концентрация напряжений отмечается главным образом во впадинах: чем глубже впадина острее, и меньше ее радиус, тем интенсивнее происходит концентрация напряжений.

Если говорить о микро-геометрии поверхностного слоя в целом, то она может быть рассмотрена как совокупность шероховатости, волнистости и макроотклонений формы. [22]

Волнистость представляет собой совокупность периодических, регулярно повторяющихся выступов и впадин, расстояние между которыми значительно больше высоты неровностей. Под шероховатостью понимают совокупность микронеровностей с относительно малым шагом, образующих рельеф поверхности [23].

Между волнистостью и шероховатостью в настоящее время нет строго определенной границы. Условно принято относить к волнистости неровности, у которых отношение шага к высоте больше 40.

Стандарта на волнистость нет. Есть рекомендации ISO, согласно которым (рис. 1) предусмотрено два параметра: W_Z – высота волнистости (формула 1). S_W – шаг волнистости (формула 2). Важной эксплуатационной характеристикой микро-геометрии поверхности является ее стационарность. Данные о стационарности микро-геометрии

можно получить с использованием стандартных параметров шероховатости на основе простого соотношения S – средний шаг шероховатости по средней линии и S_m – средний шаг шероховатости по вершинам. [24]

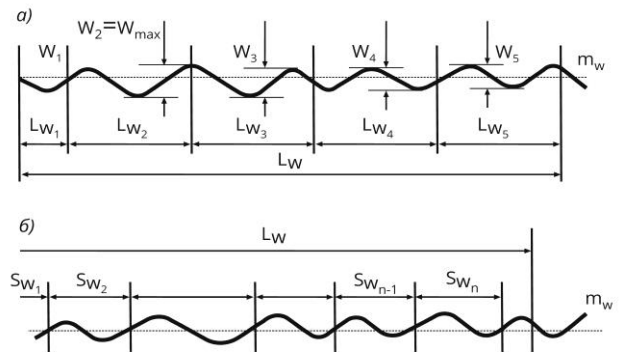


Рис. 1. Определение высоты (а) и шага (б) волнистости поверхности

Среднее арифметическое из пяти значений высоты волнистости рассчитывается по формуле (1)

$$W_z = (W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5) / 5 \quad (1)$$

$$S_w = (1/n) \sum_{i=1}^n S_{w_i} \quad (2)$$

где, L_w – длина участка измерений.

По профилограмме микро-геометрии поверхности получаем стандартные параметры шероховатости: среднее арифметическое отклонение профиля R_a ; средняя высота неровностей R_z ; наибольшая высота неровностей профиля R_{max} ; средний шаг неровностей S_m ; средний шаг неровностей по вершинам S . Определение указанных параметров микро-геометрии возможно только на основе фильтрации профилограммы (см. рис.2). [25]

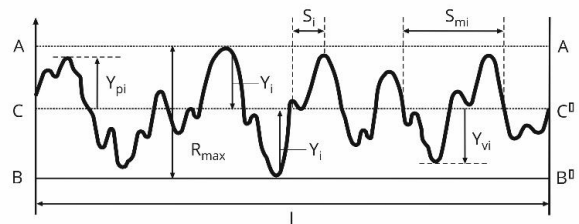


Рис. 2 Профилограмма шероховатости

R_a рассчитывается, как среднееарифметическое y_{pi} и y_{vi} – абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad (3)$$

или
$$R_a = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (4)$$

Относительная опорная длина профиля рассчитывается, как отношение опорной длины профиля к базовой длине:

Указать в рамках какой программы или гранта выполнялась работа или спонсоров.
В случае отсутствия подобной ссылки – это текстовое поле удалить

$$t_p = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{l} \quad (5)$$

Дополнительно критерием являются интегральные параметры профиля R_a , R_q , R_z .

Что касается макроотклонений, то они наблюдаемы визуально и могут быть выявлены при математической обработке профилограмм. Макроотклонение (рис.3) характеризуется:

H_{max} — максимальным макроотклонением,
 H_p — высотой сглаживания макроотклонения.

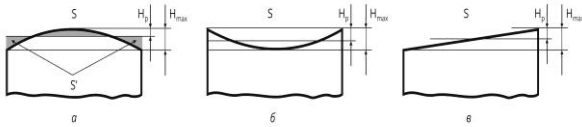


Рис. 3. Формы макроотклонений: а — выпуклая; б — вогнутая; в — непараллельная

Существует значительное число нестандартных параметров, их более 30. [26] Часто при решении эксплуатационных задач стандартными параметрами шероховатости невозможно полностью описать профиль как при SLM-методе. В этом случае прибегают к функциональным характеристикам описания профиля. Такими характеристиками являются опорная линия, плотности и функции распределения ординат и тангенсов углов наклона профиля. Например, в соответствии со стандартом DIN4776, контролируется форма профиля с использованием опорной линии или кривой Эббота – Файрстоуна (рис. 4). Математически это кумулятивная функция плотности вероятности, высоты профиля поверхности вычисляется путем интегрирования трассы профиля. Форма кривой разделена на несколько параметров шероховатости поверхности, т.е. на семейство параметров R_q . Применение данного стандарта позволяет корректно задавать требования к функциональным поверхностям, исходя из условий их работы, а также подбирать необходимую технологию при их изготовлении.

Помимо микрогеометрии на поверхностный слой существенное влияние оказывают его физико-механические свойства. Они характеризуются твердостью, структурными и фазовыми превращениями, знаком и глубиной распространения остаточных напряжений. [27,28] Глубина модифицированного слоя в значительной степени зависит от вида и условий формообразования поверхностного слоя. Для SLM - метода составляет обычно 0,1...0,25мм.

Остаточные напряжения в металла возникающие в процессе формирования поверхностного слоя SLM-методом, являются еще одной проблемой 3D-печати из жаропрочных сплавов. Это такие напряжения, которые существуют и уравниваются внутри тела в процессе остывания готового изделия. [29]

Для оценки поверхностных остаточных напряжений рекомендуются следующие параметры: $\delta_{ост}^1$ макронапряжения (напряжения 1-го рода), $\delta_{ост}^2$ макронапряжения (напряжения 2-го рода) и $\delta_{ост}^3$ статические искажения решетки (напряжения 3-го рода). Применительно к решению традиционных технологических задач особый интерес представляют параметр $\delta_{ост}^1$. Причиной возникновения макродефектов является предметом отдельного научного

исследования, а данная работа посвящена характерным особенностям их распределения в глубину материала изделия.

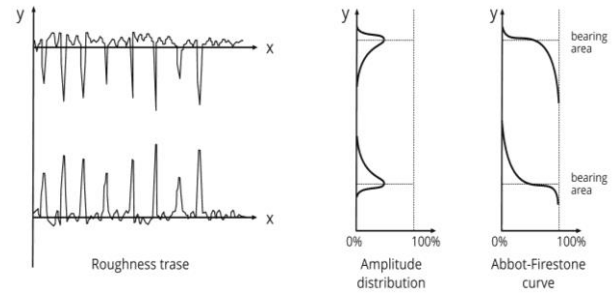


Рис. 4. Кривая Эббота-Файрстоуна - Abbott-Firestonecurve

К числу пока еще трудно решаемых проблем следует отнести механические напряжения в поверхностном слое материала деталей получаемых SLM- методом. При этом следует выделить три принципиально различных последствия воздействия этих напряжений в процессе эксплуатации продукции. Первое, если изделие жесткое и величины остаточных напряжений превышают предел прочности материала, то на поверхности изделия возникают трещины. Второе, если остаточные напряжения достаточно велики, а жесткость изделия мала, то возникают деформации изделий. Третье, если изделие обладает высокой жесткостью, а остаточного напряжения не достигают предела прочности сплава, то сохраняется опасность разрушения изделия при совпадении знаков остаточных напряжений. [30]

Многообразие параметров состояния поверхностного слоя и методов их оценки не позволяет выделить единственный параметр. Поэтому в научной и инженерной практике состояние поверхностного слоя оценивается набором единичных или комплексных параметров. В последние годы все активнее начинают применять так называемые комплексные параметры, математически или физически объединяющие сразу несколько отдельных параметров.

К таким относится модуль упругости E – это отношение приращения напряжения к соответствующему приращению удлинения в пределах упругой деформации. [31] Его вычисляют по формуле (6)

$$E = \frac{\Delta \sigma \cdot l_0}{\Delta l_{cy} \cdot F_0} \quad (6)$$

Для поверхностей деталей, работающих на усталостную прочность можно использовать уравнение в качестве комплексного параметра оценки качества поверхностей при SLM - печати:

$$C_y = \frac{140}{r_{m,SM}} (R_{max} - \sqrt{R_{max} R_y}), \quad (7)$$

Для оценки несущей способности поверхности или ее контактной жесткости известен комплексный параметр качества поверхностного слоя изделия:

$$\Pi = \left(\frac{R_p^u W_p^2 H_p^2}{u_n} \right)^{1/v+4} \quad (8)$$

Для комплексной оценки качества поверхностей трения предложен параметр, который наряду с вышеперечисленными, характеристиками включает и поверхностные остаточные напряжения второго рода, характерные для

финишной стадии обработки поверхности после SLM – печати:

$$C_x = \frac{(R_{\text{н}} W_{\text{з}} H_{\text{тл.н.к.}})^{1/6}}{r_{\text{н}}^{3/2} s_{\text{н}}^{1/2} u_{\text{н}}^{2/3} \lambda} \quad (9)$$

где λ – коэффициент, учитывающий влияние поверхностных остаточных напряжений $\sigma_{\text{ост}}^2$:

$$\lambda = \left(\frac{\sigma_{\text{в}} - \sigma_{\text{ост}}}{\sigma_{\text{д}}} \right)^{t_y} \quad (10)$$

где $\sigma_{\text{в}}$ – временное сопротивление разрушению; $\sigma_{\text{д}}$ – действующее значение амплитудного напряжения на поверхности трения; t_y – параметр фрикционной усталости при упругом контакте.

Для оценки качества поверхностного слоя кулачковых пар трения предложен аналогичный комплексный параметр – C_T . Этот параметр определяет, насколько удельная мощность трения реальных поверхностей изделий, отличается от удельной мощности трения в идеальном случае по формуле:

$$C_T = \frac{q_{\text{гв}}}{Q_{\text{гв}}} = \frac{f q_{\text{г}} v}{Q_{\text{гв}}} \quad (11)$$

где f – коэффициент трения; $q_{\text{г}}$ и v – контурное давление и скорость скольжения; $Q_{\text{гв}}$ и $Q_{\text{гд}}$ – удельная мощность трения реальной поверхности и идеальной соответственно.

Для оценки цилиндрических поверхностей, образующих соединение, передающее осевые нагрузки или крутящие моменты, предложен комплексный параметр, характеризующий их металлоемкость:

$$C_{\text{н}} = R_{\text{п}} + W_{\text{п}} + H_{\text{п}} \quad (12)$$

Таблица 1.

Взаимосвязь эксплуатационных свойств детали и параметров качества поверхностного слоя

Параметры, влияющие на эксплуатационные свойства детали	Контактная жёсткость	Износостойкость	Усталостная прочность	Нагрузки осевых и крутящих моментов
Шероховатость и, $R_{\text{амс}}$, $R_{\text{в}}$, R_{z} , $S_{\text{м}}$	Средняя	Средняя	Сильная	Средняя
Волнистости $W_{\text{амс}}$, W_{z} , $S_{\text{в}}$, $t_{\text{в}}$	Средняя	Сильная	Слабая	Сильная
Макроотклонения $H_{\text{амс}}$, $H_{\text{п}}$	Сильная	Сильная	Сильная	Сильная
Физико-механические, $\sigma_{\text{ост}}^1, E$	Средняя	Сильная	Сильная	Слабая

В таблице представлены самые существенные эксплуатационные свойства деталей и степень влияния основных параметров качества поверхностного слоя деталей, получаемых SLM-технологией.

Из таблицы видно, что различные параметры поверхностного слоя в различной степени влияют на эксплуатационные свойства деталей. Например, наибольшее влияние на эксплуатационные свойства деталей оказывают параметры макроотклонения поверхности.

ТРАДИЦИОННЫЕ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

К самым распространенным методам контроля состояния поверхностного слоя деталей являются контактные. У приборов, работающих по данному методу в качестве из-

мерительного зонда используется механический измерительный шуп. Данный метод часто дает лучшее горизонтальное разрешение по сравнению, например, с бесконтактными оптическими методами, однако измеренный профиль представляет собой свертку истинного профиля и радиуса шупа, диапазон измеряемых высот микронеровностей должен быть откалиброван с помощью независимого эталона.

Наибольшее распространение получил измерительный шуп, работающие по поверхности алмазным стилусом. Эти профилографы позволяют измерять неровности поверхности высотой от 0,8 до 63 мкм. Погрешность вертикального увеличения профилографа для разных видов приборов от ± 5 до $\pm 10\%$, а горизонтального – не более $\pm 10\%$. [32,33]

Особенностью бесконтактных профилометров является использование оптического излучения в качестве измерительного зонда. Достоинством данных методов является то, что луч не может повредить поверхность, диапазон измеряемых высот микронеровностей может быть откалиброван автоматически. К недостаткам можно отнести зависимость оптических констант от поверхности материала.

Также существует сравнительный бесконтактный метод, который основывается на сравнении измеряемой поверхности с образцами шероховатости (ГОСТ 9378-93). Этот метод является простым и доступным, обеспечивает достоверность контроля при $R_{\text{а}} > 1,25$ мкм и $R_{\text{z}} > 10$ мкм. [34] Достоинством, является простота измерения, к недостаткам высокая погрешность измерения, так как результаты измерения напрямую зависят от субъективных факторов.

Метод светового сечения заключается в следующем: пучок световых лучей, поступающих от источника света через узкую щель, направляется объективом под углом α на контролируемую поверхность. Высота микронеровностей измеряется от визирной линии микрометром. Разность отсчетов при совмещении этой линии с верхним и нижним краями неровности позволяет определять значения h_i , необходимые для расчета $R_{\text{а}}$ и R_{z} . Приборы, работающие по принципу светового сечения позволяют измерять неровности поверхности высотой от 0,8 до 62,5 мкм при погрешности показаний от 7,5-24%. Приборы позволяют определять параметры R_{z} , $R_{\text{амс}}$, S , и осуществлять фотосъемку микронеровностей.

Лазерный эллипсометрический метод основан на анализе изменения поляризации света, прошедшего или отраженного от исследуемого объекта. На принципах эллипсометрии построены методы чувствительных бесконтактных исследований поверхности различных веществ, процессов адсорбции, коррозии окисных пленок и других. В качестве источника света в эллипсометрических измерениях используется монохроматическое излучение лазера. Количественной мерой этих изменений служат поляризационные углы, определяемые основным уравнением эллипсометрии. [35,36]

Растровый электронный микроскоп (РЭМ), [37] позволяет получать изображения поверхности образца с высоким разрешением (несколько нанометров). Размер электронного зонда и размер области взаимодействия зонда с

образцом намного больше расстояния между атомами мишени. Однако, сканирующий электронный микроскоп имеет свои преимущества, включая способность визуализировать сравнительно большую область образца, способность исследовать массивные мишени, а также разнообразие аналитических методов, позволяет измерять фундаментальные характеристики материала деталей, [38] с разрешением от десятков до единиц нанометров. [39] Преимущества РЭМ: значительная глубина резкости изображения, большие размеры объектов и диапазон увеличений: от 3 - 150 000 раз.

Атомно-силовой микроскоп (АСМ) используется для определения рельефа поверхности с разрешением от десятков ангстрем вплоть до атомарного уровня. В отличие от сканирующего туннельного микроскопа, с помощью АСМ можно исследовать как проводящие, так и непроводящие поверхности. [40] В качестве зонда используется наноразмерное острие, располагающееся на конце упругой консоли (кантилевера). В зависимости от характера действия силы между кантилевером и поверхностью образца выделяют три режима работы АСМ: контактный, полуконтактный, бесконтактный. [41,42] Достоинствами данного метода является возможность получения снимков микрорельефа поверхности с высоким разрешением. К недостаткам АСМ: - небольшой размер поля сканирования, низкую скорость сканирования поверхности, сложность получения изображения, искажение изображения из-за пьезокерамики сканера.

К перспективным методам измерения шероховатости для сверхгладких поверхностей относится сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ). В качестве средства для измерения эффективной высоты шероховатости используется сканирующий зондовый АСМ. Методика (ГОСТ Р8.700-2010 ГСИ) измерения эффективной высоты шероховатости поверхности, основана на спектральном разложении функций рельефа, полученной посредством сканирования поверхности твердого тела зондовым АСМ и позволяет получить относительную погрешность результатов измерений эффективной высоты шероховатости не более 12% при доверительной вероятности 0,95. В сравнении с микроскопией РЭМ СЗМ обладает рядом преимуществ. Так, в отличие от РЭМ, который даёт псевдотрёхмерное изображение поверхности образца, СЗМ позволяет получить истинно трёхмерный рельеф поверхности. Для работы РЭМ необходим вакуум, в то время как большая часть режимов СЗМ предназначена для исследований на воздухе. К недостатку СЗМ при его сравнении с микроскопией РЭМ следует отнести небольшой размер поля сканирования объекта. РЭМ в состоянии просканировать область поверхности размером в несколько миллиметров в латеральной плоскости, с перепадом высот в несколько миллиметров в вертикальной плоскости, а у СЗМ максимальный перепад высот составляет несколько микрометров, а максимальное поле сканирования в лучшем случае — порядка 150×150 мкм.

В заключение сопоставим методы контроля измеряемых параметров шероховатости поверхности.

Из таблицы видно, что в зависимости от необходимых требований можно выбрать оптимальный метод и средства измерения дефектности поверхности, полученной SLM -методом. Выбор ограничивающих условий опреде-

ляется особенностями эксплуатации анализируемой поверхности изделия. Например, для анализа качества поверхности турбин лопаток получаемых SLM -методом необходимо использовать (см. табл. 2) методы №1;4. На этапе аттестации производства изделий и частей газотурбинного двигателя необходимо добавить методы №2;3. Для настройки оборудования по получению заранее заданных свойств поверхности материала необходимо использовать дополнительно методы №5;6, для определения природы возникновения дефектов структуры характерной для SLM –технологии. Все эти методы измерения позволят разработать достоверный комплекс средств контроля, который способен оценивать качество поверхности деталей из жаропрочных сплавов, изготавливаемых SLM –методом.

Таблица 2

Сравнительная таблица методов измерения шероховатости поверхности детали

№	Метод	Измерение неровностей в мкм	Цифровая обработка измерений	Сложность обработки измерений	Режим работы: Контактный «+» Бесконтактный «-»
1	Профиллограф	0,8–63	+	Сравнительно низкая	+
2	Сравнительный бесконтактный	$R_a > 1,25$ $R_z > 10$	-	Низкая	-
3	Метод светового сечения	0,8–62,5	-	Сравнительно низкая	-
4	Эллипсометрия	0,0003–0,0579	+	Очень высокая	-
5	РЭМ	0,0004	+	Очень высокая	-
6	АСМ	$\geq 0,001$	+	Очень высокая	±
7	СЗМ	$\geq 0,019$	+	Сравнительно невысокая	-

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

В результате исследования методов контроля качества поверхностного слоя твердого тела, установлена взаимосвязь эксплуатационных свойств и качества поверхностного слоя изделия, изготовленных SLM –методом. Достоверность измерения показателей качества поверхности позволяет спрогнозировать свойства детали на безотказность работы и срок службы изделия из жаропрочных сплавов. Показана возможность разработки комплексного параметра, математически и физически объединяющего сразу несколько наиболее существенных структурных величин жаропрочных сплавов, необходимых для качества слоёв получаемых SLM –методом для изделий авиационной отрасли.

Выводы

В производстве изделий, особенно для авиационной отрасли, необходимо получать готовые детали с прогнозируемыми эксплуатационными свойствами поверхности. Нами определён комплекс критериев, который оценивает качество поверхности готового изделия.

Среди изученных нами показателей эксплуатационных свойств определены методы и средства качества поверхностного слоя детали характерных для SLM –метода, это:

- усталостная прочность - характеризующаяся сопротивлением поверхности детали циклическим нагружением;

- износостойкость - характеризующаяся изменением свойств поверхности изделия;
- контактная усталость - определяется материалом поверхностного слоя в условиях многократных контактных нагружений;
- коррозионная стойкость - характеризует процессы, развивающаяся только на поверхностном слое детали;
- достоверность качества поверхности упомянутых выше показателей необходимо оценивать бесконтактными методами с учётом структуры жаропрочных сплавов.

Таким образом, эксплуатационные свойства определяются свойствами поверхностного слоя, особенно при SLM – технологии, в зависимости от изменения макро- и микро-геометрии, которые влияют на качество поверхностного слоя из жаропрочных сплавов.

ЛИТЕРАТУРА

- Gladush G.G. Physic of laser materials processing: theory and experiment: monograph / G. G. Gladush, I. Smurov. – Berlin: SpringerVerlag, 2011. – 534 p.
- Шишковский И.В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий / И.В. Шишковский. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 424с.
- Кузнецов В.Е. Системы быстрого изготовления прототипов и их расширения / В.Е. Кузнецов // CAD/CAM/CAE Observer. – 2004. – №2(15).
- Сапрыкин А.А. Повышение производительности процесса селективного лазерного спекания при изготовлении прототипов: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2006. – 161с.
- Wang R.-J. Influence of process parameters on part shrinkage in SLS / R.-J. Wang, L. Wang, L. Zhao, Z. Liu // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2007. – Vol. 33, №5-6. – P. 498-504.
- Senthilkumaran K. New model for shrinkage compensation in selective laser sintering / K. Senthilkumaran, Pulak M. Pandey, P.V.M. Rao // Virtual and Physical Prototyping. – 2009. – Vol. 4, is. 2. – P. 49-62.
- Tang Y. Accuracy analysis and improvement for direct laser sintering [text] / Y. Tang, H.T. Loh, J.Y.H. Fuh, Y.S. Wong // Innovation in Manufacturing Systems and Technology. – 2004. – P. 985-995.
- Григорьянц А.Г. Лазерная аддитивная технология изготовления покрытий и деталей из композиционного материала/ А.Г. Григорьянц, Д.Ю. Новиченко, И.Ю. Смуров // Известия высших учебных заведений. – 2011. – №7. – С. 38-46.
- Смуров И.Ю. Аддитивное производство с помощью лазера. Проведение экспериментальных работ / И.Ю. Смуров, И.А. Мовчан, И.А. Ядройцев, А.А. Окунькова, Н.Ю. Черкасова, Г.В. Антоненкова // Вестник МГТУ «Станкин». – 2012. – №1. – С. 36-38.
- Евгенов А.Г. Исследование свойств сплава ЭП648, полученного методом селективного лазерного сплавления металлических порошков / А.Г. Евгенов, А.М. Роголев, С.В. Неруш, И.С. Мазалов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2015. – №2. – Ст. 02.
- Лукина Е.А. Особенности формирования структуры жаропрочного никелевого сплава ЖС6-К-ВИ при селективном лазерном сплавлении / Е.А. Лукина // Цветные металлы. – 2016. – №3 (879). – С. 57-63.
- Смуров И.Ю. Аддитивное производство с помощью лазера / И.Ю. Смуров, И.А. Мовчан, И.А. Ядройцев, А.А. Окунькова, Е.В. Цветкова, Н.Ю. Черкасова // Вестник МГТУ «Станкин». – 2011. – Т. 2, №4. – С. 144-146.
- Carter L.N. The influence of the laser scan strategy on grain structure and cracking behaviour in SLM powder-bed fabricated nickel superalloy / L.N. Carter, C. Martin, Ph.J. Withers, M.M. Attallah // Journal of Alloys and Compounds. – 2014. – Vol. 615. – P. 338-347.
- Шмотин Ю.Н. Новые материалы для перспективного двигателя ОАО «НПО „Сатурн” / Ю.Н. Шмотин, Р.Ю. Старков, Д.В. Данилов, О.Г. Оспенникова, Б.С. Ломберг //Авиационные материалы и технологии. – 2012. – №2. – С. 6-8.
- Ломберг Б.С. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей / Б.С. Ломберг, С.В. Овсепян, М.М. Бакрадзе, И.С. Мазалов //Авиационные материалы и технологии. – 2012. – №5. – С. 52-57.
- Каблов Е.Н. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения / Е.Н. Каблов, Н.В. Петрушин, И.Л. Светлов, И.М. Демонис // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – №5. – С. 36-51.
- Kruth J.P. Selective laser melting of iron-based powder / J.P. Kruth, L. Froyen, J. Van Vaerenbergh // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – Vol. 149. – P. 616-622.
- Osakada K. Flexible manufacturing of metallic products by selective laser melting of powder / K. Osakada, M. Shiomi // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2006. – Vol. 46. – P. 1188-1193.
- Бабичев А.П. Формирование и контроль параметров качества поверхности, определяющих эксплуатационные свойства деталей машин: Научное издание/ А.П. Бабичев, М.А. Тамаркин. – Ростов-на-Дону, 1990.
- Сулима А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин. – Машиностроение, 1988.
- Бабичев А.П. Применение вибрационных технологий для повышения качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко. – Ростов-на-Дону, 2006.
- Демкин Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. –М.: Машиностроение, 1981. – 244с.
- ГОСТ Р ИСО 4287-2014 Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200116337>.
- Васильков Д.В. Обеспечение качества поверхностного слоя ответственных деталей машин / Д.В. Васильков, А.С. Александров, В.В. Голикова // Современные методы технической диагностики и неразрушающего контроля деталей и узлов. – 2019. – №4. – С. 4.
- Васильков Д.В. Динамика технологической системы механической обработки / Д.В. Васильков, В.Л. Вейц, В.С. Шевченко. СПб.: Изд. Инструмент, 1997. – 230с.
- Валетов В.А. Автоматизированная система непараметрической оценки микрогеометрииповерхности / В.А. Валетов, Д.В. Васильков, А.В. Воронин, М.Р. Могендович

// Машиностроение и автоматизация производства: Межвуз. сб. научн. тр. – СПб: СЗПИ, 1995. – С. 54-67.

27. Рыжов Э.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Э.В. Рыжов, А.Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 1979. – 176 с.

28. Колесников К.С. Технологические основы обеспечения качества машин / К.С. Колесников, Г.Ф. Баландин, А.Д. Дальский и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.

29. Поздеев А.А. Остаточные напряжения: теория и приложения / А.А. Поздеев, Ю.И. Няшин, П.В. Трусов. М.: Наука, 1982. – 112 с.

30. Валетов В.А. Непараметрический подход к оценке качества изделий / В.А. Валетов, А.Ю. Иванов // Металлообработка. – 2010. – № 6 (60). – С. 55-59.

31. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение (с Изменениями N 1, 2, 3) – URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-1497-84>.

32. Назаров Ю.Ф. Методы исследования и контроля шероховатости поверхности металлов и сплавов / Ю.Ф. Назаров, А.М. Шкилько, В.В. Тихоненко, И.В. Компанец // ФИП. – 2007. – Т. 5, № 3-4. – С. 207-216.

33. Степанов С.Н. Метрологическое обеспечение производства. Нормирование параметров и способы измерения текстуры поверхности / С.Н. Степанов, А.Н. Табенкин, С.Б. Тарасов. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2012. – 147 с.

34. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3 т. / Под ред. И. Н. Жестковой. – 8-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001.

35. Горшков М.М. Эллипсометрия / М.М. Горшков. – М.: Сов. радио. – 1974. – 200 с.

36. Асалханов Ю.И. Эллипсометрия субмонослойных покрытий и приповерхностный слой твердых тел / Ю.И. Асалханов. – Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 1998. – 208 с.

37. Морис Ф. Микроанализ и растровая электронная микроскопия / Под ред. Ф. Морис, Л. Мени, Р. Тиксье. – М.: Металлургия, 1985.

38. Дюков В.Г. Растровая оптическая микроскопия: монография / В.Г. Дюков, Ю.А. Кудеяров. – М.: Наука, 1992. – 207 с.

39. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии / В.Л. Миронов. – М.: Техносфера, 2005. – 144 с.

40. Суслов А.А. Сканирующие зондовые микроскопы (обзор) / А.А. Суслов, С.А. Чижик // Материалы, Технологии, Инструменты. – 1997. – Т. 2, № 3.

41. Lapshin R.V. Feature-oriented scanning methodology for probe microscopy and nanotechnology / R.V. Lapshin // Nanotechnology. – 2004. – Vol. 15, is. 9. – P.1135-1151.

42. Magonov S.N. Surface analysis with STM and AFM: experimental and theoretical aspects of image analysis / S.N. Magonov, M.-H. Whangbo. – VCH, 1996. – 323 p.

The Analysis of Methods and Tools for Assessing the Quality of the Surface Layer of Products Obtained by the SLM-Method from Heat-Resistant Alloys

Levina T.A., Safonov E.V., To Manh Hung

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Moscow Polytechnic University"

Moscow, Russian Federation

t-levina@internet.ru

Abstract. The article focuses on methods used for metal items facial layer quality assessment. Those items are typically produced with SLM-method (technology of selective laser melting of super alloys). The technology is supposed to be the most perspective in aircraft-industry. Lightweight construction is becoming more attractive for machine-building enterprises as a single-component price is reduced due to less material consumption. Lighter components result in lighter weight, thus, it saves operational energy consumption. Despite obvious advantages the method offers, there are still some disadvantages: it's difficult to forecast inherent characteristics of an item produced with SLM-method. It happens because of many variable factors involved in the process and the item faultless

performance coupled with its durability are influenced by the item size and shape accuracy. The authors believe that the item material facial layer characteristics have a dominant influence on an item serviceability. The article exposes the relation between an item serviceability and an item material facial layer quality. The main criteria for facial layer quality control are introduced. Traditional as well as modern assessment methods for facial layer quality control have been observed and analyzed.

Keywords: additive technologies, SLM-method, facial layer quality.

Исследование условий роботизированной сборки профильных валов

Вартанов М.В., Чан Динь Ван, Нгуен Ван Зунг

Московский политехнический университет

Москва, Российская Федерация

natalia.vartanova@bk.ru, trandinhvan1221@gmail.com, nguyendungpt45@gmail.com

Аннотация. В теории автоматической сборки условия собираемости цилиндрических соединений изучены достаточно хорошо. Условия автоматической сборки профильных или многогранных валов изучены значительно хуже. В последние годы подобные соединения все шире используются в машиностроении, что объясняется рядом их преимуществ. К эксплуатационным относятся: большая усталостная прочность профильного вала; меньшая интенсивность установившегося износа; более высокая крутильная жесткость; профильные соединения обладают свойством автоматического центрирования под передаваемой нагрузкой. В машиностроении профильные соединения используются в коробках скоростей и гитарах токарных и фрезерных станков, в гибких модульных инструментальных системах, в кузнечно-прессовом оборудовании, в компрессорах и коробках передач автомобилей, а также в карданных валах сельскохозяйственной техники. Профильные соединения в основном предназначены для передачи крутящего момента сопряженными поверхностями деталей машин, режущих и вспомогательных инструментов, их применяют вместо шлицевых и шпоночных соединений. В работе рассмотрены вопросы определения условий выполнения роботизированной сборки профильных валов. Представлена общая последовательность решения задач сборки профильных валов и создана математическая модель в квазистатической постановке сопряжения вала квадратной формы. Получаемые из модели данные можно использовать для обучения робота сборке многогранных валов, используя измерения 6-компонентного силомоментного датчика. Приводится описание экспериментальной установки с промышленным роботом, оснащенный силомоментным датчиком. Обсуждается согласованность аналитического решения и результатов физического эксперимента.

Ключевые слова: роботизированная сборка, профильные детали, последовательность сборки, силомоментный датчик.

ВВЕДЕНИЕ

Роботизированная установка вала в отверстие является распространенной сборочной задачей в машиностроении. Известны различные методы определения положения отверстия: использование визуальной информации с камеры технического зрения [1, 2] и использование силомоментного датчика для оценки контактных реакций в зоне сопряжения [3]. Имеет свою специфику сборка профильных деталей. М.Е. Caine [5] и D.R. Strip [6] была исследована сборка квадратных валов. М.Е. Caine выбирает начальную конфигурацию вала, наклоненного вокруг трех осей, а затем проводит сборку через ряд состояний, которые последовательно уменьшают количество степеней свободы вала, контактирующего с отверстием. Таким образом уменьшается неопределенность положения системы. В работе [7] D.R.

Strip расширяет эту стратегию в сочетании с общей стратегией сборки, разработанной в [6], чтобы обобщить ее для всех выпуклых трехгранных валов.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ СБОРКИ ПРОФИЛЬНЫХ ВАЛОВ

В статье рассматривается последовательность сборки профильных валов на основе применения активной адаптации. Данная последовательность может быть разделена на 6 этапов (рис. 1): а – оценка положения, б – г: подход, д, е: обнаружение отверстия, ж, и: выравнивание, й – сопряжение.

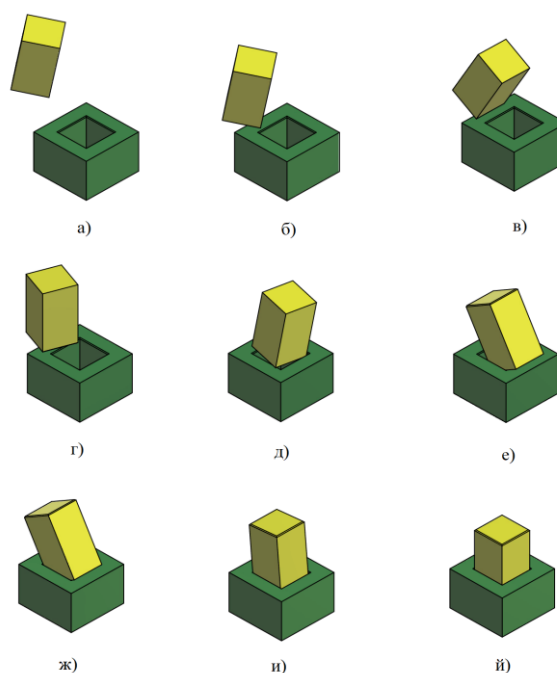


Fig. 1. Последовательность сборки квадратного вала в отверстия:

а – свободное положение; б – контакт «вершина – грань» (v-f); в – контакт «ребро – грань»; г – контакт «грань – грань»; д – 2 контакта «вершина – грань»; е – контакт «ребро – грань»; ж, и – 2 контакта «ребро – грань», й – сборка завершена

В задаче сборки профильных деталей (например, квадратного вала) возникает угловая и линейная ошибка, как показано на рис. 2.

Угловая погрешность θ – это разность фаз между квадратным валом и квадратным отверстием вокруг оси z; φ_x и φ_y – разность углов между центральной осью и осями x и y, соответственно; поперечная погрешность δ –

это разница в положении центральных осей штифта и отверстия в плоскости Oxy .

Таким образом, в отличие от сборки цилиндрической детали, требуется дополнительный этап выравнивания фаз для исправления угловой ошибки относительно оси z .

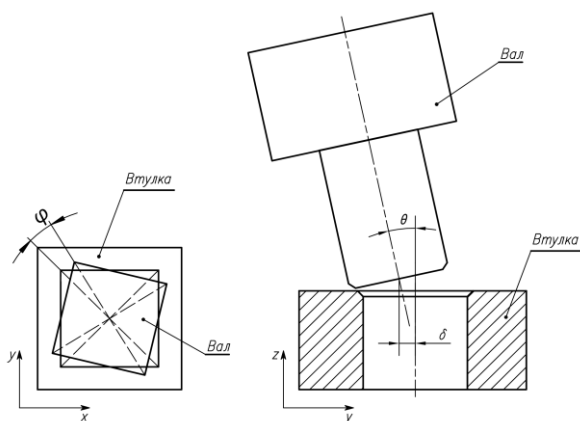


Fig. 2. Погрешности при сборке профильных деталей

Сборка реализуется с помощью искусственного перегиба вала (рис.3б) и перемещения его в направлении отверстия. Контакт (e-f) (нижний боковой край вала контактирует с внутренней поверхностью отверстия) возникает из-за угловой погрешности. В месте контакта действует сила, которая поворачивает вал, чтобы минимизировать угловую погрешностью (рис. 3в). Таким образом, робот может продолжать перемещать вал для увеличения силы контакта, которая компенсирует боковые и угловые погрешности (рис. 3г). Затем вал и отверстие выравниваются, и сборка завершается этапом сопряжения.

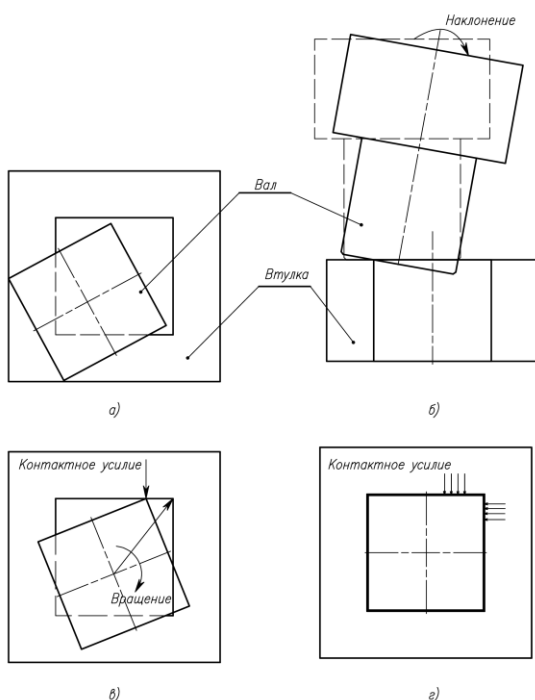


Fig. 3. Стратегия выравнивания с использованием направления сборки

КВАЗИСТАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СБОРКИ ПРОФИЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Известен ряд исследований, раскрывающих управление по усилию для деталей цилиндрической формы [8-11]. Однако в практике необходимо собирать не только детали цилиндрической формы, но и профильные детали. В данной статье, рассмотрена математическая модель сборки для случая двухточечного контакта «ребро-грань»: нижний край вала контактирует с внутренней поверхностью отверстия и наоборот (рис. 1и).

На рис. 4 и 5 изображены два контакта (e-f), а также схема действия сил и моментов, действующих на вал.

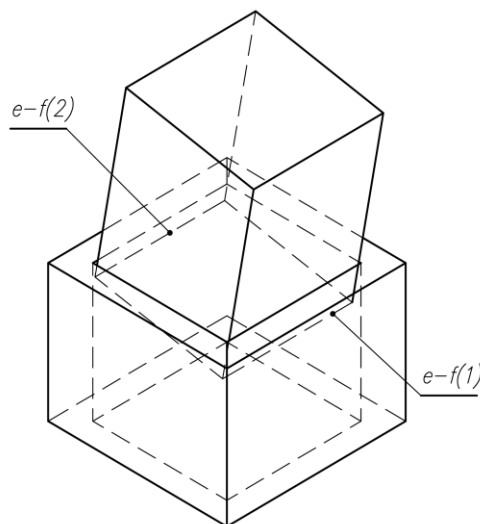


Fig. 4. Контакт ребро-грань (e-f) профильного вала с отверстием

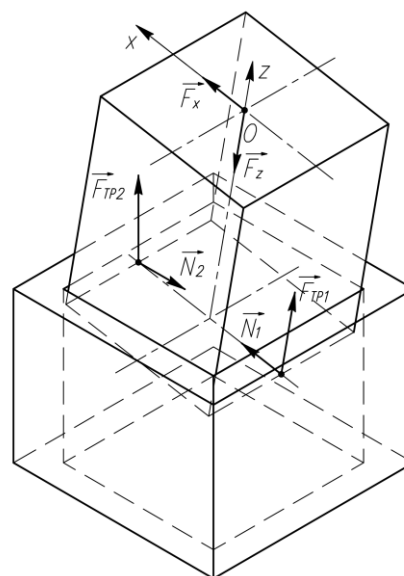


Fig. 5. Схема действия сил и момент на вал

Чтобы составить уравнения равновесия, определим силы и моменты, действующие в координатной плоскости Oxz (рис. 6).

где:

θ – угол перегиба оси вала и отверстия;

W , w – ширина сопрягаемых поверхностей, соответственно отверстия и вала;
 q – глубина сопряжения.

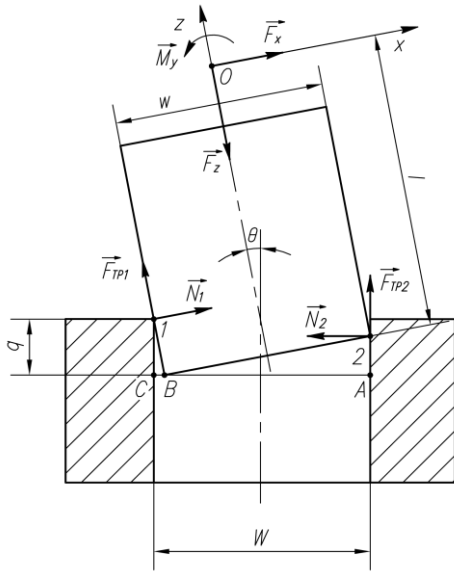


Fig. 6. Силы и момент, действующие на вал в координате Oxz

Уравнение равновесия:

$$\begin{aligned} \sum F_x &= F_x + N_1 - N_2 \cos \theta + \mu N_2 \sin \theta = 0 \\ \sum F_z &= -F_z + \mu N_1 + N_2 \sin \theta + \mu N_2 \cos \theta = 0 \\ \sum M_o(F) &= M_y - \mu \frac{w}{2} N_1 + (l - \frac{q}{\cos \theta}) N_1 - l N_2 \cos \theta + \frac{w}{2} N_2 \sin \theta + l \mu N_2 \sin \theta + \frac{w}{2} \mu N_2 \cos \theta = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Рассмотрим состояние предельного равновесия, когда силы трения покоя имеют максимальное значение:

$$F_{тр1, \max} = \mu \cdot N_1, \quad F_{тр2, \max} = \mu \cdot N_2 \quad (2)$$

где μ - коэффициент трения покоя.

Из первых двух уравнений системы (1) можно получить силы реакции N_1 и N_2 :

$$\begin{aligned} N_1 &= -F_x + \frac{F_z + \mu F_x}{2\mu \cos \theta + (1 - \mu^2) \sin \theta} (\cos \theta - \mu \sin \theta) \\ N_2 &= \frac{F_z + \mu F_x}{2\mu \cos \theta + (1 - \mu^2) \sin \theta} \end{aligned} \quad (3)$$

Подставив N_1 и N_2 из системы уравнений (3) в последнее уравнение системы (1) получим:

$$\begin{aligned} M_y &= \\ &(-l + \mu \frac{w}{2} + \frac{q}{\cos \theta}) [-F_x + \frac{(F_z + \mu F_x)(\cos \theta - \mu \sin \theta)}{2\mu \cos \theta + (1 - \mu^2) \sin \theta}] \\ &+ [\frac{(l \cos \theta - \frac{w}{2} \sin \theta - l \mu \sin \theta - \frac{w}{2} \mu \cos \theta)(F_z + \mu F_x)}{2\mu \cos \theta + (1 - \mu^2) \sin \theta}] \end{aligned} \quad (4)$$

Для малых углов θ имеем:

$$\cos \theta \approx 1, \quad \sin \theta \approx \theta \quad (5)$$

С учетом допущений (5) уравнение (4) приобретает вид:

$$\begin{aligned} M_y &= (-l + \mu \frac{w}{2} + q) \left[-F_x + \frac{F_z + \mu F_x}{2\mu + (1 - \mu^2)\theta} (1 - \mu\theta) \right] \\ &+ \left[l - \frac{w}{2} \mu - (\frac{w}{2} + l\mu)\theta \right] \left[\frac{F_z + \mu F_x}{2\mu + (1 - \mu^2)\theta} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

Выражение (6) представляет собой функцию, устанавливающую взаимосвязь момента M_y с величинами сил F_x и F_z в условиях предельного состояния по условиям трения. Угол θ может быть найден из соотношения:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \theta &= \frac{AB}{q} \\ BC &= w \cdot \cos \theta \\ AB &= W - BC = W - w \cos \theta \\ \theta \approx \tan \theta &= \frac{AB}{q} = \frac{W - w \cos \theta}{q} \approx \frac{W - w}{q} \end{aligned} \quad (7)$$

Подставив выражение (7) в (6), получим:

$$\begin{aligned} M_y &= (-l + \mu \frac{w}{2} + q) \left[-F_x + \frac{(F_z + \mu F_x)(1 - \mu \frac{W - w}{q})}{2\mu + (1 - \mu^2) \frac{W - w}{q}} \right] \\ &+ \left[l - \frac{w}{2} \mu - (\frac{w}{2} + l\mu) \frac{W - w}{q} \right] \left[\frac{F_z + \mu F_x}{2\mu + (1 - \mu^2) \frac{W - w}{q}} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, получены выражения для величин усилий F_x и F_z с силомоментного датчика. Тогда по формуле (8) можно вычислить значение момента M_y (расчетный момент M_p) и сравнить со значением момента, полученным с датчика (M_d).

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения экспериментов создана экспериментальная установка, оснащенная силомоментным датчиком (рис. 7).

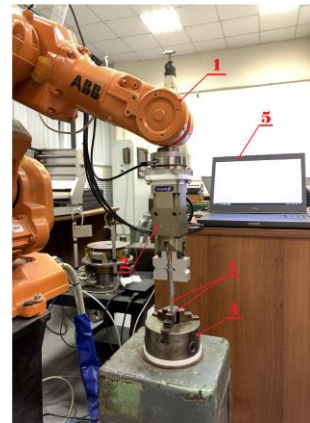


Fig. 7. Экспериментальная установка для исследования роботизированной сборки:

1 – промышленный робот ABB IRB 140; 2 – захватное устройство; 3 – экспериментальные образцы; 4 – базовое приспособление; 5 – персональный компьютер

Установка смонтирована на базе промышленного робота IRB-140 с контроллером IRC5. Сопрягаемые профильные детали вал и втулка жёстко базируются в схвате робота 2 и базовом приспособлении 4. Информация о возникающих в зоне сборки силах и моментах поступает в систему управления промышленным роботом, а также регистрируется персональным компьютером 5.

Контактные усилия определены в сборочных операциях типа «вал-втулка». Вал опускался вниз на разную глубину сопряжения. Вал и втулка изготавливались из одинаковых материалов *Ст45*. Коэффициент трения определялся при различных глубинах сопряжения вала и втулки [12]. Эксперимент проводился с квадратным валом при различных зазорах рис. 7.

Таблица 1

Экспериментальный результат при сборки квадратного вала с зазором 0,05 мм

№	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	q	M_d	M_p
1	0,93	-0,03	-1,72	0,02	0,22	0,5	0,22	0,29
2	1,00	0,05	-4,12	0,00	0,22	1	0,22	0,31
3	1,11	0,22	-5,58	-0,07	0,20	1,5	0,20	0,33
4	1,19	0,40	-4,77	-0,12	0,21	2	0,21	0,36
5	1,36	0,25	-8,71	-0,12	0,24	2,5	0,24	0,38
6	1,56	0,79	-13,73	-0,29	0,17	3	0,17	0,40
7	1,71	1,05	-13,35	-0,39	0,18	3,5	0,18	0,44
8	1,94	1,21	-18,45	-0,41	0,18	4	0,18	0,45
9	1,27	1,39	-29,12	-0,53	-0,25	4,5	-0,25	0,12
10	1,27	1,48	-30,73	-0,56	-0,34	5	-0,34	0,07
11	1,27	1,57	-38,23	-0,61	-0,44	5,5	-0,44	-0,06
12	0,35	2,16	-47,96	-0,80	-0,93	6	-0,93	-0,52
13	0,95	2,32	-46,25	-0,85	-0,82	6,5	-0,82	-0,36
14	0,41	2,60	-55,65	-0,98	-1,06	7	-1,06	-0,73
15	0,28	3,43	-61,53	-1,27	-1,26	7,5	-1,26	-0,93
16	0,50	3,36	-62,65	-1,28	-1,21	8	-1,21	-0,95
17	-0,82	3,73	-75,04	-1,43	-1,65	8,5	-1,65	-1,67
18	-2,22	3,63	-81,14	-1,59	-2,07	9	-2,07	-2,31
19	-1,81	3,60	-82,46	-1,57	-1,94	9,5	-1,94	-2,30
20	-3,76	3,20	-100,15	-1,72	-2,62	10	-2,62	-3,39

Таблица 2

Экспериментальный результат при сборки квадратного вала с зазором 0,03 мм

№	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	q	M_d	M_p
1	-0,68	2,61	-24,89	-0,77	-0,43	0,5	-0,43	-0,23
2	-0,45	2,76	-30,49	-0,83	-0,42	0,75	-0,42	-0,18
3	-1,12	3,30	-37,59	-0,97	-0,66	1	-0,66	-0,42
4	-1,98	3,77	-45,64	-1,09	-1,01	1,25	-1,01	-0,74
5	-2,50	3,98	-50,42	-1,17	-1,21	1,5	-1,21	-0,94
6	-2,34	4,00	-51,35	-1,19	-1,20	1,75	-1,20	-0,92
7	-2,23	3,97	-50,67	-1,19	-1,15	2	-1,15	-0,92
8	-2,54	4,14	-57,57	-1,22	-1,27	2,25	-1,27	-1,07
9	-3,43	4,52	-64,08	-1,32	-1,60	2,5	-1,60	-1,42
10	-4,26	5,04	-71,30	-1,47	-1,92	2,75	-1,92	-1,76
11	-4,22	5,29	-74,55	-1,57	-2,00	3	-2,00	-1,81

№	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	q	M_d	M_p
12	-3,73	5,24	-73,74	-1,58	-1,88	3,25	-1,88	-1,69
13	-3,52	5,21	-77,24	-1,58	-1,87	3,5	-1,87	-1,70
14	-4,38	5,43	-80,99	-1,64	-2,08	3,75	-2,08	-2,04
15	-4,97	5,97	-86,11	-1,82	-2,35	4	-2,35	-2,32

При разных глубинах сопряжения вала и втулки (рис. 8 и 9) хорошо видно изменение силы F_z . Во избежание повреждения силомоментного датчика решено было остановиться на значении в 100 Н (рис. 8). Шаг приращения выбран 0,5 мм подбирался экспериментально в процессе исследования.

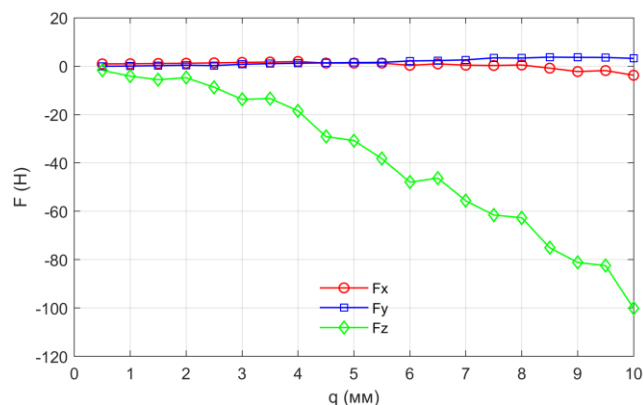


Fig. 8. Зависимость компонента главного вектора сил от глубины сопряжения (при зазоре $\Delta = 0,05$ мм)

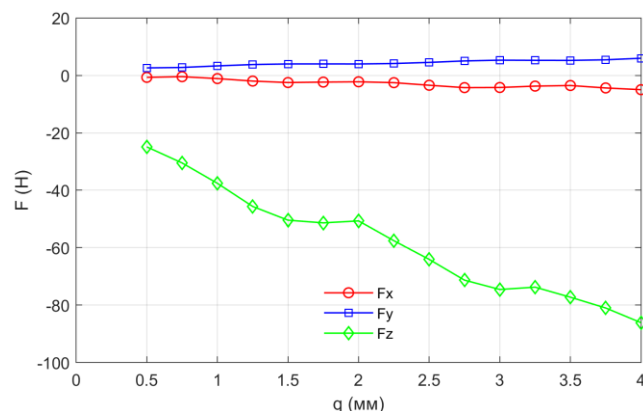


Fig. 9. Зависимость компонента главного вектора сил от глубины сопряжения (при зазоре $\Delta = 0,03$ мм)

На рис. 10 и 11 показана взаимосвязь вращающего момента M_y , обеспечивающего совмещение деталей с глубиной сопряжения вала и втулки. Значение момента M , которое обеспечивает совмещение деталей определяется с помощью датчика, должно быть меньше значение M_p , при котором возникает заклинивание. Значение M_p определяется уравнением (8).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье определена последовательность сборки профильных валов и рассмотрено изменение сборочных сил, а также сравнение расчетных и экспериментальных данных. Проведенный эксперимент дает промежуточный результат исследования контактных состояний сборки профильных соединений. Окончательной целью

исследований является разработка алгоритма управления сборочным роботом на основе управления переходами между контактными состояниями сборочного процесса.

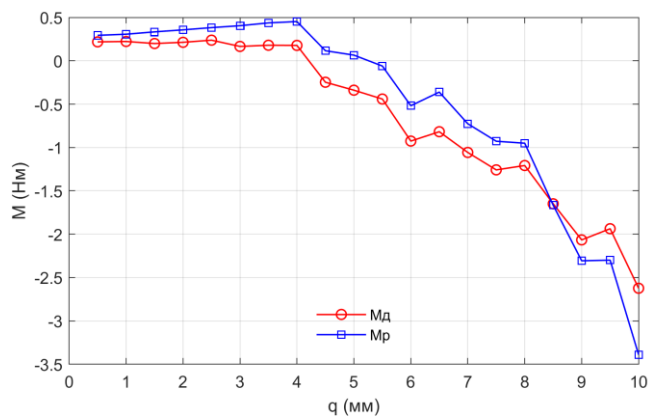


Fig. 10. Сравнение расчетного и экспериментального момента для случая сборки с зазором $\Delta = 0,05$ мм

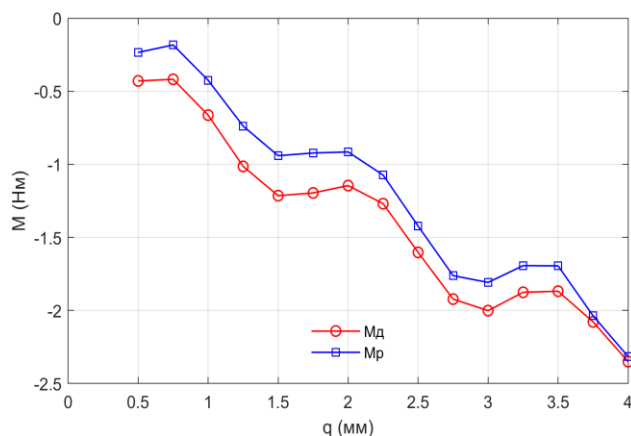


Fig. 11. Сравнение расчетного и экспериментального момента для случая сборки зазор $z = 0,03$ мм

ЛИТЕРАТУРА

1. Peña-Cabrera M. Machine vision approach for robotic assembly / M. Peña-Cabrera, I. Lopez-Juarez, R. Rios-Cabrera, J. Corona-Castuera // *Assembly Automation*. – 2005. – Vol. 25, is. 3. – P. 204-216.
2. Miura J. Task-oriented generation of visual sensing strategies in assembly tasks / J. Miura, K. Ikeuchi // *IEEE*

Trans. Pattern Anal. Machine Intell. – 1998. – Vol. 20. – P. 126-138.

3. Kim Y.L. Hole detection algorithm for chamferless square peg-in-hole based on shape recognition using F/T sensor / Y.L. Kim, H.C. Song, J.B. Song // *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* – 2014. – Vol. 15. – P. 425-432.

4. Park H. Intuitive peg-in-hole assembly strategy with a compliant manipulator / H. Park, J.-H. Bae, J.-H.n Park, M.-H. Baeg, J Park // *IEEE ISR 2013*. – Seoul, 2013. – P. 1-5. doi: 10.1109/ISR.2013.6695699.

5. Caine M.E. Assembly strategies for chamferless parts / M.E. Caine, T. Lozano-Perez, W.P. Seering // *Proc. IEEE Intl. Conf. Robotics and Auto.* – Scottsdale, AZ, 1989.

6. Strip D.R. Insertions using geometric analysis and hybrid force-position control: method and analysis / D.R. Strip // *Proc. IEEE Intl. Conf. Robotics and Automation.* – Philadelphia, PA, 1988.

7. Strip D.R. A passive mechanism for insertion of convex pegs / D.R. Strip // *Proc. IEEE Intl. Conf. Robotics and Automation.* – Scottsdale, AZ, 1989.

8. Вартанов М.В. Экспериментальные исследования условий собираемости при активной роботизированной сборке/ М.В. Вартанов, М.В. Архипов, В.К. Петров, Р.С. Мищенко // «СТИН». – 2017. – №4. – С. 14-16.

9. Холодкова А.Г., Технология автоматической сборки / Под. ред. А.Г. Холодковой; М.Г. Кристаль, Б.Л. Штриков, А.С. Зенкин, Б.М. Арпентьев, А.Г. Андреев. – М.: Машиностроение, 2010. – 560 с.

10. Черняховская Л.Б. Кинематический и динамический анализы автоматической сборки цилиндрических деталей: Монография / Л.Б. Черняховская. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2011. – 75 с.

11. Вартанов М.В. Идентификация положения детали с помощью силомоментного датчика в сборочных операциях типа «вал-втулка» при двухточечном контакте / М.В. Вартанов, В.К. Петров, И.Н. Зинина, Нгуен Ван Зунг, Чан Динь Ван // *Автоматизация и приборостроение: проблемы, решения.* – 2020. – №2 (10). – С.17-26.

12. Vartanov M.V. Determination of changing friction coefficient using force torque sensor during robotic assembly of cylindrical connection with clearance / M.V. Vartanov, N. Van Dung, T.D. Van // *International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. – 2020. – P. 977-981.

Study Robotic Assembly Conditions of Profile Shafts

Mikhail V. Vartanor

Moscow Polytechnic University
Moscow, Russian Federation
natalia.vartanova@bk.ru

Tran Dinh Van

Moscow Polytechnic University
Moscow, Russian Federation
trandinhvan1221@gmail.com

Nguyen Van Dung

Moscow Polytechnic University
Moscow, Russian Federation
nguyendungpt45@gmail.com

Abstract. In the theory of automatic assembly the conditions for assembling cylindrical joints have been carefully researched. The automatic assembly conditions of profile or polyhedral shafts are much less researched. In recent years such joints are increasingly being used in mechanical engineering, which is explained by their advantages. Operational includes: high fatigue strength of the profiled shaft; less intensity of steady-state wear; higher twisting stiffness; profile joints have a property of automatically centering under the transferred load. In mechanical engineering, profile joints are used in gearboxes and guitars of turning and milling machines, inflexible modular tool systems, in press-forging equipment, in compressors and car gearboxes, as well as in Cardan shafts of agricultural machinery. Profile joints are mainly intended for the transmission torque by the mating sur-

faces of machine parts, cutting, and auxiliary tools; they are used instead of spline and key joints. This paper considers issues of determining the robotic assembly conditions for profile shafts. The general sequence of assembling profile shafts is presented and also created a mathematical model in quasi-static formulation of square shaft conjugation. The data obtained from the model can be used to train the robot to assemble polyhedral shafts using measurements from a 6-piece force/torque sensor. An experimental setup with an industrial robot, retrofitted with a force-torque sensor is given. The consistency of analytical solutions and results of the physical experiments is discussed.

Keywords: robotic assembly, profile shaft, assembly sequence, force-torque sensor.

Оптимизация технологических процессов изготовления и ремонта деталей на основе мощности выполняемых процессов

Кузнецов В.А., Аленина И.А., Мочалова Т.С.

Московский Политехнический университет

Москва, Российская Федерация

rensi@mail.ru, e-alenina@mail.ru., mochalowa.tatiana2016@yandex.ru

Аннотация. В статье изложены основы оптимизации способа воздействия на обрабатываемый материал, позволяющей снизить энергоемкость процессов обработки и себестоимость изготовления продукции машиностроения с обеспечением ее заданного качества и производительности. За критерий оптимальности (целевую функцию) целесообразно выбрать энергоемкость процесса обработки, т.к. именно этот показатель влияет на большинство технико-экономических показателей. Мощность как показатель энергоэффективности целесообразно использовать при технологическом проектировании в случаях, когда имеется возможность деталь выполнить в рамках различных технологических процессов. Например, деталь может быть получена из заготовки удалением определенного припуска с поверхностей за счет операций механообработки или послойно напечатана на принтере методами аддитивных технологий. Приведены алгоритмы расчета мощности при резании лезвийным инструментом, при различных видах шлифования, электрофизическом, плазменном и лазерном видах обработки деталей машиностроения.

Ключевые слова: метод обработки, способ воздействия, энергоемкость, мощность, степень использования запаса пластичности, оптимизация.

ВВЕДЕНИЕ

Технологические процессы изготовления и ремонта деталей в настоящее время отличаются многоступенчатостью воздействия, при этом управление степенью, знаком и температурой деформации на каждой операции, а также видом напряженно-деформированного состояния, (НДС) позволяет в технологическом плане обеспечить заданное качество обработки (точность, микрогеометрию поверхности и физико-механические свойства материала) с наибольшей эффективностью. Для этого, на этапе определения способа воздействия необходимо выявить критерий оптимальности и систему ограничений, для определения наиболее эффективного метода обработки, а также разработать математические модели, которые позволяли бы описать все явления, происходящие в процессе обработки и прогнозировать качество обрабатываемых деталей и технико-экономические показатели разрабатываемых технологических операций. Анализ различных фундаментальных теорий показал, что наиболее полно явления при механообработке в очаге деформации, а также на поверхности контакта инструмента с деталью могут быть описаны математическими моделями теории пластичности и феноменологической теории разрушения. [1]

Проанализировав цели, достигаемые при реализации метода обработки [2], можно сделать вывод, что за критерий оптимальности (целевую функцию) целесообразно выбрать энергоемкость процесса обработки, т.к. именно этот показатель влияет на большинство технико-экономическими показателей (стойкость инструмента, металлоемкость и сложность конструкции оборудования и оснастки, технологическая себестоимость, производительность и т.д.). В качестве системы ограничений могут служить модели связей параметров качества с характеристиками метода обработки (МО).

МОЩНОСТЬ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Энергоемкость целесообразно выразить через мощность процесса деформирования, которая известными методами определяется при произвольном числе этапов деформации. Данный критерий характеризует не только усилие деформирования, необходимое для проведения процесса, но и скорость осуществления воздействия, чего не учитывает такой критерий, как работа пластической деформации. Мощность как показатель энергоэффективности целесообразно использовать при технологическом проектировании в случаях, когда имеется возможность деталь выполнить в рамках различных технологических процессов. Например, деталь может быть получена из заготовки удалением определенного припуска с поверхностей за счет операций механообработки или послойно напечатана на принтере методами аддитивных технологий. Возможны различные комбинации из методов обработки без удаления, с удалением или с нанесением слоя материала. В этом случае возникает задача определения оптимального сочетания методов обработки в рамках одного технологического процесса.

Для условий поступательного перемещения инструмента относительно обрабатываемой детали (например, при протягивании, долблении, строгании), мощность, затрачиваемая на преодоление трения на контактных поверхностях инструмента и детали, определяется по выражению:

$$N_{gi} = \int_0^l \int_0^{2\pi} V_{CK} \mu G_s R dl d\Phi \quad (1)$$

где l – длина контакта инструмента с деталью;

h – глубина распространения деформации;

V_{CK} – скорость скольжения;

μ – коэффициент трения по Зибелю (Прандтлю);

G_s – предел текучести обрабатываемого материала;

R – радиус инструмента.

Интегрирование по глубине распространения деформации учитывает уменьшение величины деформации от поверхности обрабатываемой детали вглубь металла. Используя полученное выражение, можно оценивать энергоёмкость различных методов механической обработки и осуществлять выбор и создание вариантов технологических операций обработки, обеспечивающих минимальный расход энергии и максимальную стойкость инструмента при заданном качестве поверхностного слоя обрабатываемых деталей. Для определения величин, входящих в данное выражение и для создания конкретных моделей взаимосвязей параметров качества с технологическими факторами, действующими в процессе обработки необходимо принять соответствующую методологию их разработки.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛА

Для оценки деформируемости, под которым понимают способность тела в целом изменять свою форму при обработке давлением без нарушения сплошности используют критерий, который называют степенью использования запаса пластичности (СИЗП).

Следует указать также, что разрушение металла происходит при $СИЗП = 1$, так как большинство методов обработки (особенно черновых или получистовых) предопределяет удаление слоя материала, то для выбора соответствующих воздействий при обеспечении минимальной энергоёмкости процесса необходимо определять степень использования запаса пластичности на различных этапах деформационного воздействия с целью управления процессом разрушения. Если же обработка осуществляется без удаления слоя материала, то для обеспечения требуемого качества поверхности необходимо, чтобы условие разрушения гарантированно не выполнялось, что также может быть достигнуто, например, созданием в зоне обработки наиболее благоприятного вида напряженного состояния.

Для осуществления расчета критерия и оценки возможности разрушения материала при применении того или иного метода механической обработки осуществляется решение трех основных задач. Во-первых, определяется деформированное состояние металла. Для этого, по заданным смещениям или компонентам скорости перемещения частиц среды находятся компоненты тензора скорости деформации и интенсивность скоростей деформации сдвига. Затем определяется степень деформации сдвига вдоль траектории движения частицы среды. Во-вторых, определяется напряженное состояние металла в зоне обработки, а именно значения показателя напряженного состояния. Следует отметить, что определение напряженного и деформированного состояния в зоне обработки применительно к объемным задачам вызывает существенные математические трудности. Затем определяется пластичность обрабатываемого металла, зависящая от схемы напряженного состояния, температурно-скоростных условий, а также немонотонности деформации. Данные о пластичности различных марок сталей и сплавов в зависимости от термомеханических параметров и методика исследования подробно изложены в работе. После решения вышеуказанных задач, а именно определения напряженного и деформированного состояния зоны обработки, а также зависимости пластичности металла от термомеха-

нических параметров можно найти степень использования запаса пластичности и оценить возможность разрушения поверхностного слоя обрабатываемой детали на любом этапе обработки.

АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ СПОСОБА МЕХАНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Для осуществления процесса оптимизации способа механического воздействия на обрабатываемый материал разработан алгоритм, представленный на "рис. 1".

Для процессов пластического деформирования определение мощности, параметров напряженно-деформированного состояния и степени использования запаса пластичности возможно на основе приведенной методологии. Для процессов резания мощность вычисляется на основании величин усилий резания, которые определяются на основании имеющихся справочников. Кроме этого, проведенными экспериментальными исследованиями в условиях механообработки была выявлена взаимосвязь степени использования запаса пластичности с параметрами качества обработанной поверхности (HV , U , Ra) и силой резания P_p по предварительно деформированному слою. Математические выражения такого типа позволяют определить величину основных параметров качества, которые являются технологическими ограничениями при нахождении минимума мощности процесса деформирования для комбинированной обработки.

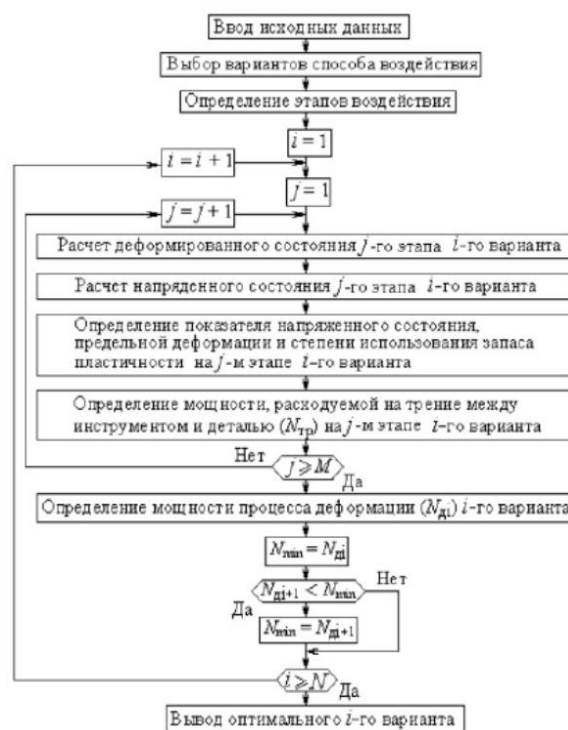


Рис. 1. Алгоритм оптимизации способа воздействия на обрабатываемый материал

МЕТОДИКА РАСЧЕТА МОЩНОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ МЕХАНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

В шлифовальных станках различают следующие виды электроприводов: главный привод (вращение шлифовального круга), привод вращения изделия, привод подачи, вспомогательные приводы и специальные электромеханические устройства.[3]

Тогда предположим, что для расчета суммарной потребляемой мощности шлифования необходимо суммировать мощности электродвигателей для каждого из этих приводов, т.е:

$$N_{\text{ит}} = N_{\text{zn}} \cdot \eta_{\text{zn}} + N_{\text{su}} \cdot \eta_{\text{su}} + N_{\text{mm}} \cdot \eta_{\text{mm}} + N_{\text{ecn}} \cdot \eta_{\text{ecn}} + N_{\text{cy}} \cdot \eta_{\text{cy}} \quad (2)$$

Другими словами мощность необходимую для осуществления процесса шлифования можно получить, просуммировав произведения мощности и КПД установленных в шлифовальном станке электродвигателей.

Мощность привода главного движения (мощность вращения шлифовального круга). Эффективная мощность при шлифовании:

- периферией круга с продольной подачей, кВт
$$N = C_N V_3^r t^x S^y d^q \quad (3)$$

- при врезном шлифовании периферией круга, кВт
$$N = C_N V_3^r S_p^y d^q b^z \quad (4)$$

- при шлифовании торцом круга, кВт
$$N = C_N V_3^r t^x b^z \quad (5)$$

b – ширина шлифования, мм; [4]

C_N – коэффициент, характеризующий материал изделия и твердость круга;

s – перемещение шлифовального круга в направлении его оси, мм·об⁻¹;

t – глубина шлифования, мм;

d – диаметр обрабатываемой заготовки, мм;

x, r, y, q, z – эмпирические коэффициенты, характеризующие условия обработки, выбираются по справочникам.

Также мощность, затрачиваемую на вращение инструмента при шлифовании также можно рассчитать как:

$$N_{\text{рез}} = \frac{P_z v_k}{10^3 \eta_1} \quad (6)$$

η_1 – КПД привода механизмов вращения инструмента;

P_z – тангенциальная составляющая силы резания (по ней определяется мощность станка, потребная на шлифование);

v_k – скорость вращения круга.

Мощность привода вращения изделия [5]:

$$N_{\text{рез}} = \frac{P_z v_{\partial}}{60 \cdot 10^3 \eta_2} \quad (7)$$

η_2 – КПД привода механизмов вращения детали;

Мощность привода подачи:

- Полезная мощность привода механизма подачи, кВт
$$N_2 = \frac{P_{\text{уд}} S_{\text{и}}}{102 \cdot 60 \cdot 100} \quad (8)$$

- Фактическая мощность
$$N_n = \frac{N_2}{\eta_2} \quad (9)$$

- Удельная мощность, Вт/см²

$$N_{\text{уд}} = \frac{N_0 - N_{\text{х.х}}}{S} \quad (10)$$

η_2 – КПД привода подачи;

S – площадь контакта инструмента с деталью, см²;

$N_{\text{х.х}}$ – мощность холостого хода электродвигателя, Вт;

N_0 – общая мощность электродвигателя, Вт. [6]

Для вспомогательных приводов шлифовальных станков применяются асинхронные короткозамкнутые двига-

тели, мощность которых можно определить по паспорту станка.

Для определения мощности резания определяем силу резания при черновой обработке. Силу резания при точении рассчитываем по следующей формуле:

$$P_z = 9,81 * C_p * t^x * S^y * v * K_p \quad (11)$$

где C_p – коэффициент, учитывающий свойства обрабатываемого материала, материал режущей части резца, а также условия обработки, определяется по табл. 2;

K_p – общий поправочный коэффициент, численно равный произведению ряда коэффициентов, каждый из которых отражает влияние определенного фактора на силу резания:

$$K_p = K_{\text{ур}} * K_{\text{фр}} * K_{\text{ур}} * K_{\text{лр}} * K_{\text{гр}} \quad (12)$$

где $K_{\text{ур}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий влияние качества обрабатываемого материала, определяется по табл. 1:

$$K_{\text{ур}} = \left(\frac{\sigma}{750} \right)^{0,75} = 1,24 \quad (13)$$

Таблица 1

Поправочный коэффициент $K_{\text{ур}}$, для стали и чугуна, учитывающий влияние качества обрабатываемого материала на силовые зависимости

Обрабатываемый материал	Расчетная формула	Показатель степени (в числителе – для твердого сплава, в знаменателе – для быстрорежущей стали)
Конструкционная сталь σ_n , МПа <600 >600	$K_{\text{ур}} = (\sigma_n / 750)^n$	0,75/0,35 0,75/0,35
Серый чугун	$K_{\text{ур}} = (HB / 190)^n$	0,4/0,55
Ковкий чугун	$K_{\text{ур}} = (HB / 150)^n$	0,4/0,55

$K_{\text{ур}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий передний угол резца, по табл. 1;

$K_{\text{лр}}$ – поправочный коэффициент учитывающий угол наклона главного лезвия, по табл. 3;

$K_{\text{фр}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий главный угол в плане резца, по табл. 3;

Поправочный коэффициент $K_{\text{гр}}$, учитывающий радиус при вершине резца, определяется для резцов из быстрорежущей стали по табл. 3. [7]

Для того чтобы подсчитать мощность, затрачиваемую на резание (эффективную мощность) лезвийным инструментом, необходимо сложить мощности на преодоление каждой силы P_z, P_y, P_x т.е.

$$N_{\text{рез}} = N_{P_z} + N_{P_y} + N_{P_x} P_z \quad (14)$$

Или:

$$N_{\text{рез}} = \frac{P_z v}{60 * 75} + \frac{P_y v_y}{60 * 75} + \frac{P_x s n}{60 * 75 * 1000} \quad (15)$$

При продольном точении никаких перемещений в направлении действия силы нет, т.е второе слагаемое равно нулю. Третье слагаемое мало (1–2% от р.) и им можно пренебречь.

Таблица 2

Значения коэффициента и показателей степени в формулах, составляющих силы резания при точении

Обрабатываемый материал	Материал режущей части	Вид обработки	Коэффициенты и показатели степени в формулах для составляющих											
			тангенциальной P_z				радиальной P_y				осевой P_x			
			C_p	x	y	n	C_p	x	y	n	C_p	x	y	n
Сталь конструкционная и стальное литье	Твердый сплав	Наружное прод. и попер. точение и растачивание	300	1,0	0,75	-0,5	243	0,9	0,6	-0,3	339	1,0	0,5	-0,4
		Отрезание и прорезание	408	0,72	0,80	0	173	0,73	0,67	0	-	-	-	-
	Быстрорежущая сталь	Наружное прод. и попер. точение и растачивание	200	1,0	0,75	0	125	0,9	0,75	0	67	1,2	0,65	0
		Отрезание и прорезание	247	1,0	1,0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
		Фасонное точение	212	1,0	0,75	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Чугун серый, HB 190	Твердый сплав	Наружное прод. и попер. точение и растачивание	92	1,0	0,75	0	54	0,9	0,75	0	46	1,0	0,4	0
	Быстрорежущая сталь	Отрезание и прорезание	158	1,0	1,0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Чугун ковкий HB 150	Твердый сплав	Наружное прод. и попер. точение и растачивание	81	1,0	0,75	0	43	0,9	0,75	0	38	1,0	0,4	0
			100		0,75		86				40	1,2	0,65	0
	Быстрорежущая сталь	Отрезание и прорезание	139	1,0	1,0	0	-	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 3

Поправочные коэффициенты, учитывающие влияние геометрических параметров режущей части инструмента на составляющие силы резания при обработке, стали и чугуна

Параметр		Материал режущей части реза	Обозначение	Поправочный коэффициент для составляющей		
Наименование	Величина			для составляющей		
				тангенциальной P_z	радиальной P_y	осевой P_x
Главный угол в плане ϕ , град	30	Твердый сплав	$K_{\phi p}$	1,08	1,30	0,78
	45			1,00	1,00	1,00
	80			0,94	0,77	1,11
	90			0,89	0,50	1,17
	30	Быстрорежущая сталь		1,08	1,63	0,70
	45			1,00	1,00	1,00
Передний угол γ , град	-15	Твердый сплав	$K_{\gamma p}$	1,25	2,0	2,0
	0			1,10	1,4	1,4
	10	1,00		1,0	1,0	
	12-15	Быстрорежущая сталь		1,15	1,6	1,7
20-25	1,00		1,0	1,0		
Угол наклона главного лезвия λ , град.	-5	Твердый сплав	$K_{\lambda p}$	1,00	0,75	1,07
	0			1,00	1,00	1,00
	5			1,25	1,25	0,85
	15			1,70	1,70	0,65
Радиус при вершине r , мм	0,5	Быстрорежущая сталь	K_{rp}	0,87	0,66	1,0
	1,0			0,93	0,82	
	2,0			1,00	1,00	
	3,0			1,04	1,14	
	5,0			1,10	1,35	

Тогда:

$$N_{рез} = \frac{P_z v}{60 * 75 * 1,36} = \frac{P_z v}{60 * 102} \quad (\text{кВт}) \quad (16)$$

По этой же формуле подсчитывается при поперечном точении (подрезании) и при отрезании. Приняв во внимание к. п. д. станка легко подсчитать и необходимую (расчетную) мощность электродвигателя: [8]

$$N_M = \frac{N_{рез}}{\eta} \quad (17)$$

Мощность непрерывного лазерного излучения можно определить по формуле: [9]

$$P_0 = W_0 / \tau_i \quad (18)$$

W_0 – энергия лазерного импульса;

τ_i – длительность импульса.

При расчете мощности энергетического воздействия при электрофизическом методе обработки баланс мощности в единице длины столба разряда может быть записан как (для $t = t_1$):

$$P_C = P_U + P_T \quad (19)$$

где P_C – средняя мощность в единице длины столба разряда, выделенная к моменту времени: [10]

$$P_C = \text{const} \cdot g_2^{1/2} R^3 E_n^2 e^{-\frac{eV_i}{2kT_{\text{эф}}}} \quad (20)$$

P_U – потери на излучение:

$$P_U = \text{const} \cdot g_2 e^{-\frac{V_a}{kT_{\text{эф}}}} \quad (21)$$

V_a – некоторый средний уровень возбуждения;

g_2 – масса газа в единице длины столба;

e – заряд;

V_i – потенциал ионизации;

P_T – потери на теплопроводность;

E_p – градиент потенциала вдоль столба разряда.

В качестве расчета мощности плазменной обработки будем использовать расчет мощности плазматрона. Для расчета параметров плазматрона зададимся следующими константами:

- скорость звука v в воздухе при 4200 К;
- плотность воздуха ρ при 4200 К;
- расход воздуха G ;
- давление воздуха на выходе из плазматрона p .

Для мощности плазматрона будем использовать систему уравнений электрических и тепловых характеристик плазматрона, а также уравнение для вычисления мощности:

- вольт-амперной характеристики:

$$U = 1290 \cdot \left(\frac{I^2}{Gd}\right)^{-0.15} \cdot \left(\frac{G}{d}\right)^{0.3} \cdot (p \cdot d)^{0.25} \quad (22)$$

- теплового КПД плазматрона:

$$\frac{1 - \eta}{\eta} = 5.85 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{I^2}{Gd}\right)^{0.27} \cdot \left(\frac{G}{d}\right)^{-0.27} \cdot (p \cdot d)^{0.3} \cdot \left(\frac{1}{d}\right)^{0.5} \quad (23)$$

- мощности, вкладываемой в дугу:

$$N_q = U \cdot I \quad (24)$$

- энергии истекающей струи:

$$U \cdot I \cdot \eta = G \cdot (i_1 - i_2) \quad (25)$$

Представленная система уравнений не замкнута, поэтому необходимо ввести ещё два условия, устанавливающие взаимосвязь между искомыми параметрами. Первое – длина выходного электрода принимается

$$\bar{l} = (l/d) \quad (26)$$

Второе условие определяет отсутствие теплового запыления в канале цилиндрического электрода. С этой целью внутренний диаметр электрода выбирается на 10-30% больше критического. Решив представленную выше систему уравнений можно определить мощность плазматрона. [11]

Определив метод обработки с минимальной энергоемкостью можно спроектировать оптимальный технологический процесс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

В заключение следует отметить, что принцип минимизации энергоемкости на всех этапах жизненного цикла изделий (технологических переделах) позволяет получать значительную экономию по себестоимости продукции машиностроения. Важен тот факт, что мощность можно посчитать для различных способов воздействия (обработка плазменная, лазерная, электрофизическая, резанием различным инструментом и обычным трением).

В свою очередь, оптимизация мощности при различных методах обработки позволяет правильно выбрать элементы технологической системы и снизить затраты на закупку оборудования и эксплуатационные энергетические затраты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колмогоров В.Л. Пластичность и разрушение / В.Л. Колмогоров, А.А. Богатов, Б.А. Мигачев. – М.: Металлургия, 1977.
2. Кузнецов В.А. Методология оптимизации способа механического воздействия на обрабатываемый материал и расчета его основных параметров / В.А. Кузнецов // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2018. – №3. – С. 33-37.
3. <https://infopedia.su/16x120c3.html> (дата обращения 25.12.2020).
4. <http://osntm.ru/schlifovanie.html> (дата обращения 25.12.2020).
5. https://studref.com/620582/tehnika/sily_rezaniya_moschnost_shlifovaniya (дата обращения 25.12.2020).
6. https://www.mebelcompass.ru/Oborudovanie_dlya_otdelki_izdelii_iz_drevesiny/p2_articleid/2707 (дата обращения 25.10.12).
7. http://osntm.ru/sila_rez.html (дата обращения 25.10.12).
8. <https://mash-xxl.info/page/160177082152176112097072215005127055155050222127/> (дата обращения 25.12.2020).
9. Лосев В.Ф. Физические основы лазерной обработки материалов: учебное пособие / В.Ф. Лосев, Е.Ю. Морозова, В.П. Ципилев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 199 с.
10. Жидков, И.С. Электрофизические методы обработки материалов: учебное пособие / И.С. Жидков, А.И. Кухаренко, С.О. Чолах. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 195 с.
11. <https://www.bestreferat.ru/referat-214729.html> (дата обращения 25.12.2020).

Optimization of Technological Processes of Manufacturing and Repair of Parts Based on the Power of the Processes Performed

Kuznetsov V.A., Alenina I.A., Mochalova T.S.

Moscow Polytechnic University

Moscow, Russian Federation

renzi@mail, e-alenina@mail.ru, mochalowa.tatiana2016@yandex.ru

Abstract. The article describes the basics of optimizing the method of impact on the processed material, which allows to reduce the energy intensity of processing processes and the cost of manufacturing machine-building products with ensuring its specified quality and productivity. For the optimality criterion (objective function), it is advisable to choose the energy intensity of the processing process, since this indicator affects the most technical and economic indicators of Power as a measure of efficiency is useful for process design in cases where there is a possibility the item to perform within various processes. For example, a part

can be obtained from the workpiece by removing a certain allowance from the surfaces due to machining operations or printed in layers on a printer using additive technologies. Algorithms for calculating power when cutting with a blade tool, for various types of grinding, electrophysical, plasma and laser types of machining of mechanical engineering parts are presented.

Keywords: processing method, method of exposure, energy intensity, power, degree of use of the plasticity reserve, optimization.

Влияние затупления инструмента на значение осевой составляющей силы резания и процесс сверления

Шульгин А.Н., Чуприна О.А., Пыхов В.В.

Снежинский физико-технический институт (филиал) ФГАОУ ВО «НИЯУ «МИФИ»
Снежинск, Российская Федерация
ANShulgin@mephi.ru

Аннотация. Одним из основных технологических критериев, влияющих на качество сверления отверстий, выступает правильная геометрия режущего инструмента и степень его износа. Определение «критической» степени износа сверл возможно только косвенным способом – по наличию заусенцев медной фольги на выходе инструмента из печатной платы, поскольку при современной степени интеграции микросборок основная часть обрабатываемых отверстий имеет диаметр порядка 0,6 – 0,8 мм и определить износ инструмента без специальной оснастки достаточно сложно, а в условиях массового производства – практически невозможно.

Для оценки влияния геометрии режущего инструмента и степени износа на процесс сверления проведен ряд производственных экспериментов с использованием твердосплавных сверл стандартной геометрии заточки разной степени износа. Для оценки качества обработанных отверстий дополнительно проведены измерения размера стружки ($L_{стр}$), микрошероховатость стенок отверстий (R_a) и величина заусенцев медной фольги на выходе из заготовок (H_3) специализированным прецизионным инструментом. Всего отсверлено 1500 отверстий на каждом ранее определенном режиме обработки.

В ходе проведения работы, практически установлены: «критическая» величина затупления инструмента, максимально допустимые значения $L_{стр}$, R_a и H_3 . На основании проведенных экспериментов определены пороговые значения скоростей движения осевой подачи для работы «подношенным» и «затупленным» инструментом. Дополнительно сформулированы общие рекомендации для рабочего оператора при выполнении сверления фольгированного стеклотекстолита и исключения массового брака при изготовлении печатных плат.

Ключевые слова: фольгированный стеклотекстолит, осевая составляющая силы резания, затупление инструмента, геометрия режущего инструмента, микрошероховатость в отверстиях, скорость движения осевой подачи.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях серийного многономенклатурного производства наиболее распространенным методом получения отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита является сверление на станках с помощью твердосплавного инструмента [1 – 3]. Сверление отверстий, особенно, подлежащих металлизации, является одной из важнейших операций при изготовлении печатной платы, поскольку от ее выполнения зависит качество ме-

таллизации и точность изготовления конечного узла [4 – 6].

ВЛИЯНИЕ РАДИУСА ЗАКРУГЛЕНИЯ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ

На механизм сверления отверстий значительное влияние оказывает отношение радиуса закругления режущей кромки r_β к толщине срезаемого слоя h [7]. Отношение r_β/h – это параметр, который оказывает влияние на удельные силы резания. Когда это значение меньше 1, и далее уменьшается, имеет место значительное и нелинейное увеличение удельной силы резания, что описывается как масштабный или размерный эффект [7, 8]. При микросверлении материал удаляется вдоль закругления режущей кромки, поэтому врезание или врубание также возникает вдоль этой кромки.

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для оценки влияния геометрии режущего инструмента и параметров заточки на значение осевой составляющей силы резания P_0 проведен ряд дополнительных экспериментов. С использованием пяти компонентного пьезоэлектрического динамометра Kistler Mini Dyn 9256C2 выполнена обработка отверстий на материале СФ-2 производства ЗАО «Молдавизолит» на одних и тех же режимах резания ($n = 36000$ об/мин; $S = 1100, 1500, 1700$ мм/мин: Режим 1, Режим 2, Режим 3 соответственно) с использованием сверл $\varnothing 2$ мм.

Для определения влияния радиуса закругления режущей кромки и степени затупления инструмента на процесс резания, в эксперименте использованы рабочие сверла разной степени износа [8]. Всего обработано 6 предварительно подготовленных заготовок (по одной на каждый режим резания; 1500 отверстий на каждом режиме) с дополнительным измерением размера стружки, микрошероховатости и заусенцев медной фольги на выходе отверстий.

Измерения фракции стружки ($L_{стр}$) проводились с помощью прецизионного инструментального микроскопа ИМЦЛ 100x50А ГОСТ8074, определение шероховатости стенок отверстий (R_a) выполнялось с помощью инструментального профилометра TR-200 [9], измерение величины заусенцев медной фольги (H_3) – специальным приспособлением с использованием индикатора часового типа [10].

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В эксперименте использованы сверла фирмы «Нат» со стандартной схемой заточки [11]. Практически установлено, что для инструмента Ø2 мм критическим с точки зрения образования дефектов при обработке является радиус закругления режущей кромки $r_{\beta} = 0,034$ мм. Поэтому при отработке использованы затупленные сверла с $r_{\beta} = 0,03$ мм (предмаксимальная величина затупления) и $r_{\beta} = 0,016$ мм (средняя величина затупления). Внешний вид и геометрические параметры используемого обрабатываемого инструмента представлен на рис.1 [12].

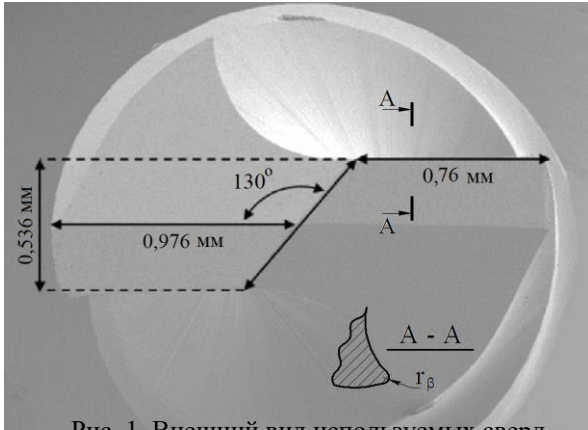


Рис. 1. Внешний вид используемых сверл

Используемый затупленный инструмент представлен на рис. 2: а) $r_{\beta} = 0,016$ мм; б) $r_{\beta} = 0,03$ мм.

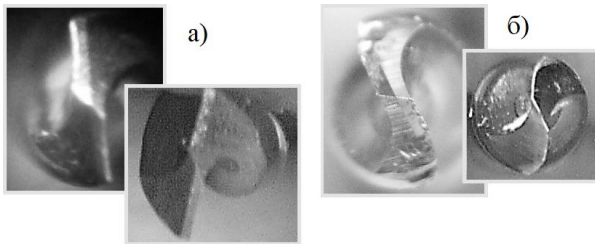


Рис. 2. Внешний вид острых и затупленных сверл

Результаты эксперимента представлены на рис. 3. Необходимо отметить, что ввиду загруженности графики вместо реальных выходных данных представлены аппроксимационные зависимости $P_0(t)$, полученные с помощью аппроксимации полиномами 5-го порядка. Степень полинома подобрана путем ее повышения, начиная от 2-й [13, 14]. Практически установлено, что повышение степени полинома свыше пятой визуально не увеличивает точности аппроксимируемой функции, повышая лишь время выполнения расчетов и снижая вычислительную устойчивость.

ВЛИЯНИЕ ЗАТУПЛЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА НА ПРОЦЕСС РЕЗАНИЯ

Таким образом установлено, что использование «подношенных» сверл с радиусом закругления режущей кромки $r_{\beta} = 0,016$ мм, увеличивает нагрузку P_0 на 13...19 % относительно новых сверл с острозаточенными режущими кромками. При затуплении инструмента до предмаксимального значения с $r_{\beta} = 0,03$ мм, осевая составляющая силы резания увеличивается на 20...25 %

относительно значений, полученных при обработке острым инструментом. С увеличением скорости движения осевой подачи, влияние износа режущего инструмента возрастает. При этом существенно меняются условия резания базового материала. Так при $r_{\beta} = 0,016$ мм имеем увеличение фракции стружки в 1,2 раза в зависимости от режима резания, при $r_{\beta} = 0,03$ мм – в 1,35 раза.

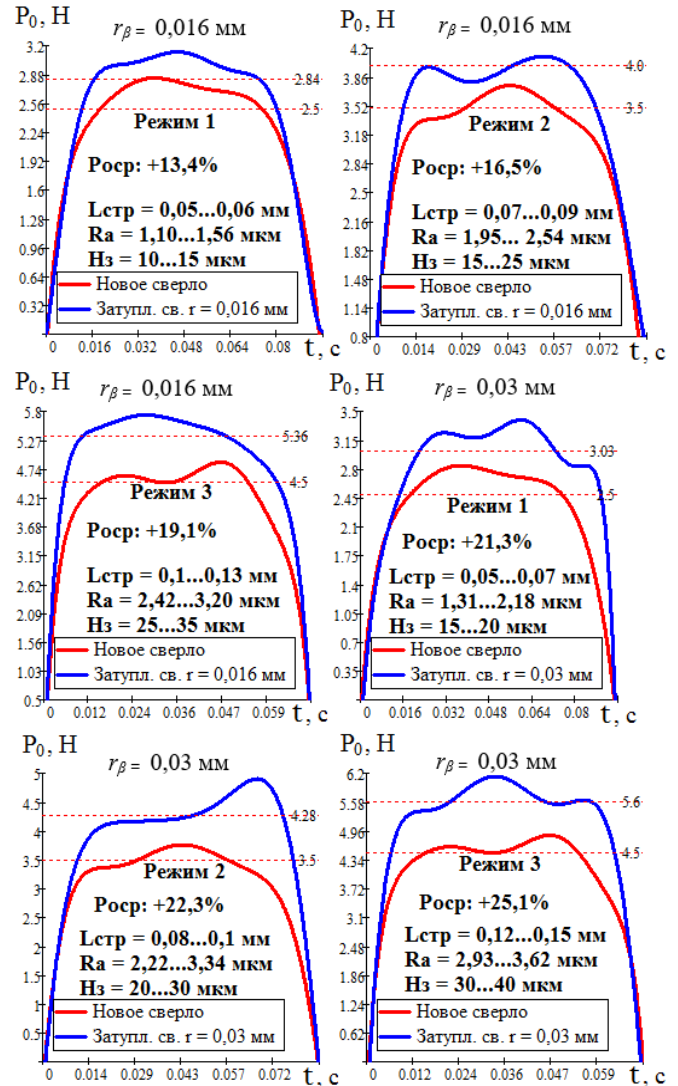


Рис. 3. Влияние скругления режущей кромки сверла на процесс обработки

В 1,3 (при $r_{\beta} = 0,016$ мм) и 1,7 (при $r_{\beta} = 0,03$ мм) раза увеличивается микрошероховатость в отверстиях; до 1,3 и 1,75 раза (при $r_{\beta} = 0,016$ и 0,03 мм соответственно) увеличивается величина заусенцев фольги на выходе отверстий.

Необходимо отметить, что с увеличением затупления инструмента помимо увеличения осевой составляющей силы резания P_0 и ухудшения условий резания возрастает количество дефектов при обработке отверстий. Так, при $r_{\beta} = 0,016$ мм на Режиме 3 ($S = 1700$ мм/мин; $P_0 = 4,5$ Н) возрастает до критических значений 3,2 мкм шероховатость в отверстиях; тогда как при $r_{\beta} = 0,03$ мм этот показатель превышает допустимые значения уже на Режиме 2 ($S = 1700$ мм/мин; $P_0 = 4,5$ Н); при обработке острозаточенным ин-

струментом микрошероховатость отверстия достигает значений R_a 3,2 мкм только при $S = 1900$ мм/мин; $P_0 = 7,1$ Н. Дополнительно установлено, что на Режиме 3 при $r_{\beta} = 0,03$ мм имеют место локальные дефекты в виде посветлений материала на входе и выходе отверстий. Для установления этого факта медная фольга с заготовок печатных плат была дополнительно удалена химическим способом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, работа затупленными сверлами увеличивает нагрузку на инструмент. С увеличением скорости движения осевой подачи увеличиваются филаменты стружки и затрудняется ее отделение [15], ухудшаются показатели шероховатости в отверстиях, которые влияют на последующее качество адсорбирования каталитических частиц палладия и соответственно последующее качество меднения металлизированных отверстий [16].

Дополнительно возрастают заусенцы медной фольги на выходе инструмента, которые приводят к возникновению производственных дефектов в виде «ободков» [17, 18]. Исходя из производственной практики максимально допустимые значения шероховатости $R_a = 3,2$ мкм, максимально допустимые значения заусенцев медной фольги $H_3 = 30$ мкм [19, 20]. На этом основании сверление отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита «подношенными» сверлами необходимо выполнять при значениях скоростей движения осевой подачи – не более 1700 мм/мин, сверление отверстий «затупленными» сверлами – при значениях скоростей движения осевой подачи – не более 1500 мм/мин. Кроме того, рабочий-оператор должен постоянно следить за состоянием режущего инструмента для исключения локальных дефектов при выполнении сверления фольгированного стеклотекстолита и исключения массового брака при изготовлении печатных плат.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abrate S. Machining of composite materials. Part I: Traditional methods / S. Abrate, D.A. Walton // *Composites Manufacturing*. – 1992. – Vol. 2. – P. 75-82.
2. Bhatnagar N. Prediction of thrust force and torque when drilling composite materials / N. Bhatnagar, M.K. Jalutharia // *Int. J. Materials and Product Technology*. – 2008. – Vol. 32. – P. 213-225.
3. Elhachimi M. Mechanical modelling of high speed drilling 1: Predicting torque and thrust / M. Elhachimi, S. Torbaty, P. Joyot // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 1999. – Vol. 39. – P. 553-568.
4. Lazar M. Experimental analysis of drilling fibre-reinforced composites / M. Lazar, P. Xirouchakis // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2011. – Vol. 51. – P. 937-946.
5. Rahmatullah I. Mechanistic approach for prediction of forces in micro-drilling of plain and glass-reinforced epoxy sheets / I. Rahmatullah, M.S. Shunmugam // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2014. – Vol. 75. – P. 1177-1187.
6. Rahamathullah I. Thrust and torque analyses for different strategies adapted in micro-drilling of glass-fibre reinforced plastics / I. Rahamathullah, M.S. Shunmugam // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B:*

Journal of Engineering Manufacture. – 2011. – Vol. 225. – P. 505-519.

7. Anand R.S. Mechanistic modelling of micro-drilling cutting forces / R.S. Anand, K. Patra, M. Steiner, D. Biermann // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 88. – P. 241-254.

8. Faraz A. Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates / A. Faraz, D. Biermann, K. Weinert // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2009. – Vol. 49. – P. 1185-1196.

9. Tsao C.C. Evaluation of thrust force and surface roughness in drilling composite material using Taguchi analysis and neural network / C.C. Tsao, H. Hoheng // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2008. – Vol. 203. – P. 342-348.

10. Pande S.S. Investigation on burr formation in drilling / S.S. Pande, H.P. Relekar // *Int. J. Mach. Tool Des. and Res.* – 1986. – Vol. 26, is. 3. – P. 339-348.

11. Lobanov D.V. Influence of sharpening on the quality of hard-alloy tools for the cutting of composite / D.V. Lobanov, A.S. Yanyushkin // *Russian Engineering Research*. – 2011. – Vol. 3. – P. 236-239.

12. Durao L.M. Comparative analysis of drills for composite laminates / L.M. Durao // *Journal of Composite Materials*. – 2011. – Vol. 46, is. 14. – P. 1649-1659.

13. Oden J.T. Some contributions to the mathematical theory of mixed finite element approximation in theory and practice in finite element structural analysis / J.T. Oden // *University of Tokyo Press*. – 1973. – Vol. 1. – P. 3-23.

14. Scholz R. Approximation von sttelpunkten mit finiten elementen / R. Scholz // *Bonn. Math. Schr.* – 1976. – Vol. 89. – P. 53-66.

15. Lui X. An analytical model for the prediction of minimum chip thickness in micromachining / X. Lui, R.E. Devor, S.G. Kapoor // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2006. – Vol. 128. – P. 474-481.

16. Rahamathullah I. Analyses of forces and hole quality in micro-drilling of carbon fabric laminate composites / I. Rahamathullah, M.S. Shunmugam // *Journal of Composite Materials*. – 2013. – Vol. 47, is. 9. – P. 1129-1140.

17. Brinksmeier E. Drilling of composites and resulting surface integrity CIRP annals / E. Brinksmeier, S. Fangmann, R. Rentsch // *Manufacturing Technology*. – 2011. – Vol. 60. – P. 57-60.

18. Ghasemi F.A. Effects of drilling parameters on delamination of glass-epoxy composites / F.A. Ghasemi // *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. – 2011. – Vol. 5, is. 12. – P. 1433-1440.

19. Isbilir O. Delamination and wear in drilling of carbon-fiber-reinforced plastic composites using multilayer TiAlN/TiN PVD-coated tungsten carbide tools / O. Isbilir, E. Ghassemieh // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. – 2012. – Vol. 31, is. 10. – P. 717-727.

20. Marques A.T. Delamination analysis of carbon fibre reinforced laminates / A.T. Marques // *16TH International conference on composite materials*. – 2007. – P. 1-10.

Influence of Tool Blunting on the Value of the Axial Component of the Cutting Force and the Drilling Process

Shulgin A.N., Chuprina O.A., Pykhov V.V.
National Research Nuclear University MEPhI (branch in Snezhinsk)
Snezhinsk, Russian Federation
ANShulgin@mephi.ru

Abstract. One of the main technological criteria affecting the quality of drilling the holes is the correct geometry of a cutting tool and the amount of its wear. The determination of the «critical» amount of a drill wear is possible only through the indirect way, in particular by the presence of the copper foil burrs at the tool output from the printed circuit board, since with the up-to-date degree of integration of micro-assemblies, the main part of the processed holes has the diameter of about 0.6-0.8 mm, and it is quite challenging to determine the tool wear without special equipment, and in conditions of mass production it is almost impossible.

A number of industrial experiments with the hard-alloy drills of standard sharpening geometry of various amount of wear was carried out in order to assess the influence of the cutting tool geometry and the amount of wear on the drilling process. To assess the quality of the processed holes, the chip size (L_{chip}), the micro-roughness of the holes (R_a) and the size of the copper foil

burrs at the output of the workpieces (H_3) were additionally measured with a specialized precision tool. In total, 1500 holes were drilled at each previously determined operating mode.

The «critical» value of the tool blunting, the maximum allowable values of L_{chip} , R_a and H_3 were practically defined in the course of work. On the basis of the conducted experiments, the threshold values of the axial feed speeds for the work of the «worn out» and «blunted» tool were defined. In addition, the general recommendations were formulated for the operator when drilling the foiled fiberglass and eliminating mass defects at printed circuit board manufacture.

Keywords: foiled fiberglass, cutting force axial component, tool blunting, cutting tool geometry, holes micro-roughness, axial feed speed.

Структура и фазовый состав керамического материала из порошка полученного химическим диспергированием сплава В95

Нечаев Д.А., Омаров А.Ю., Иванов Н.В.

Российский университет транспорта – РУТ (МИИТ)

Москва, Российская Федерация

nda@inbox.ru, asif.omarov@yandex.ru, ivanovofis@mail.ru

Аннотация. В работе представлены результаты дифференциально-сканирующей калориметрии, термогравиметрии порошка, растровой электронной микроскопии и рентгенофазового анализа керамического материала из порошка, полученного методом химического диспергирования сплава В95. Кратко описан процесс получения нового керамического материала. На основе полученных результатов описан механизм формирования изучаемой микроструктуры.

Ключевые слова: сплав В95, химическое диспергирование, гидроксид алюминия, средний размер частиц, удельная поверхность, реологические свойства.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение уровня свойств традиционных керамических материалов и создание новых видов керамики невозможно без расширения номенклатуры и повышения качества исходных порошков и целенаправленного изменения их химического состава. Разработка новых технологических решений, принципов выбора добавок способствует созданию материалов, обладающих улучшенными (часто уникальными) физико-техническими характеристиками, либо рядом специальных свойств.

В этой связи большой интерес представляют порошки, полученные методом химического диспергирования алюминиевых сплавов в растворе едкого натра, который ранее был разработан в Московском государственном промышленном университете (сейчас в составе Московского политехнического университета) [1]. Этот метод позволяет без значительных затрат получать исходное сырье с наноразмерными частицами легированными различными элементами. К настоящему времени довольно детально изучены порошки, полученные диспергированием сплавов алюминия с кремнием и магнием, а также структура и свойства керамик, полученных спеканием этих порошков. Влияние состава алюминиевых сплавов на структуру и свойства таких порошков и керамик, спеченных из них, фактически не изучено.

В данной работе описаны микроструктура и фазовый состав керамического материала из порошка химически диспергированного алюминиевого сплава В95, спеченного при относительно невысокой температуре обжига (1500°C), а также влияния на них сушки и термообработки. Полученные результаты будут, несомненно, полезны при рациональном выборе состава исходных порошков для получения керамик с заданными свойствами.

ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ КЕРАМИКИ

Химическое диспергирование сплава В 95 осуществляли путем его обработки 20 %-ным водным раствором

едкого натра. Полученный осадок промывали дистиллированной водой и фильтровали путем вакуумной фильтрации [1].

Для снижения уровня рН и стабилизации раствора, а также снижения вредных связанных ионов Na^+ было необходимо отмыть осадок. Для этого применялась технология многократной промывки осадка методом декантации [1].

Конечное значение рН – среды при отмывке порошка, полученного в результате химического диспергирования сплава В 95, равно 8,32 и достигнуто на 19 стадии декантации [1].

Отмытый путем декантации и высушенный (при 60°C) осадок мелкой фракции растирается пестиком в ступке с целью получения сыпучего порошкового продукта [1].

Фракционирование порошка было проведено с использованием метода мокрого ситового анализа в специальной аналитической просеивающей машине Retsch AS 200.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Отличительной особенностью процесса химического диспергирования сплава В95 является значительный суммарный выход частиц осадка, более 40%, принадлежащий фракции <50мкм.

На рисунке 1 приведены результаты дифференциально-сканирующей калориметрии и термогравиметрии порошка из В95 (фракция <50мкм). Анализ дериватограмм показал, что в процессе нагрева основная потеря массы образца происходит в температурном диапазоне от 212,7оС до 303,7оС. Несмотря на то, что процесс не сопровождается тепловым эффектом, можно предположить что основная потеря массы образца связана с исчезновением адсорбированной и хемосорбированной воды, а также углекислого газа. Дальнейшее уменьшение массы до температуры 535,4оС связано с потерей порошком химически связанной воды. Остатки химически связанной или гидратной воды удаляются из образца вплоть до температур близких к 955оС.

В результате проведенного исследования, по общепринятым в технологии керамик правилам, верхний температурный предел был поднят выше точки начала перехода (955,3оС) на 100оС и составил 1050оС с целью дегидратации гидроксида алюминия и его перевод в γ и α – модификации Al_2O_3 [2].

Для приготовления шихты использовали поливиниловый спирт марки 6/1 ГОСТ 10779–78 «Спирт поливиниловый. Технические условия». Прессование образцов производили в стальной пресс-форме под давлением 200 МПа. Выжиг органической связки из отпрессованных образцов

проводили на воздухе в сушильном шкафу СНОЛ – 3,5 при температуре 250 °С. Режим спекания заключался в нагреве образцов до температуры 1500 °С с изотермиче-

ской выдержкой 1 час, после ее завершения печь отключали, охлаждение образцов вместе с печью до комнатной температуры происходило в течение суток (24 часа) [3].

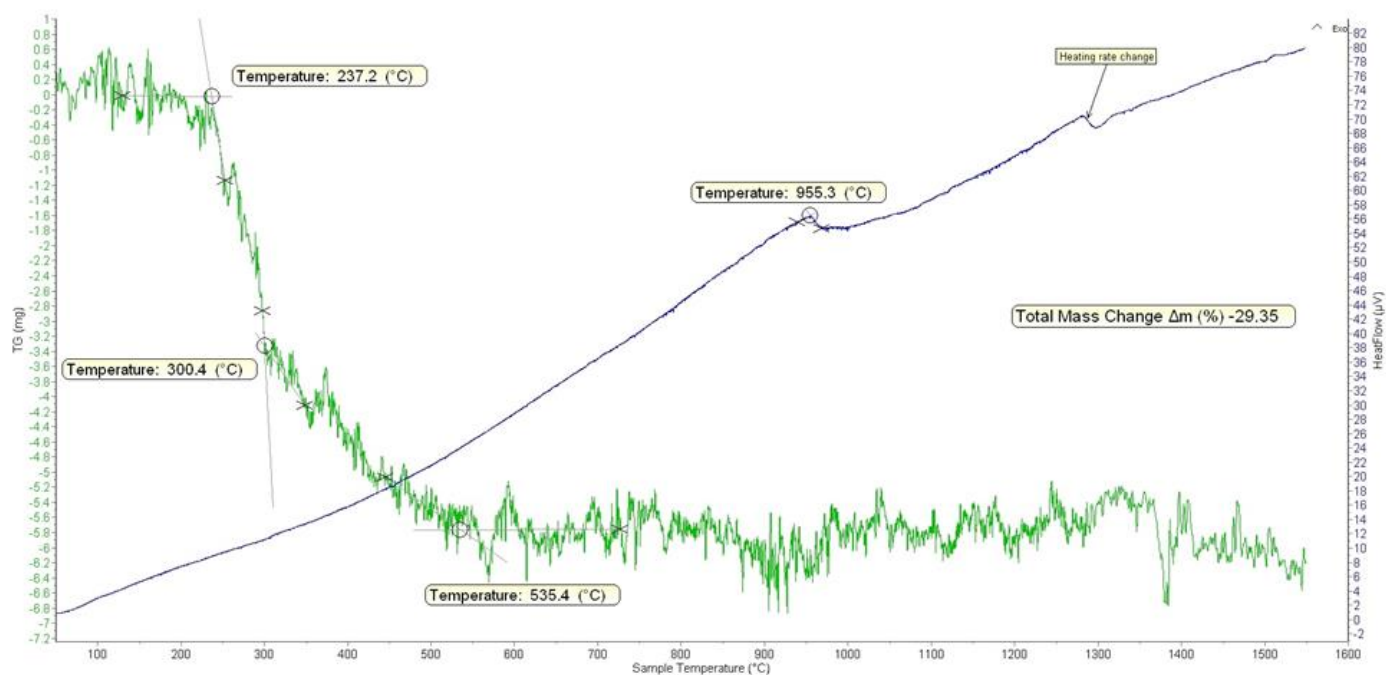


Рис. 1. Результаты дифференциально-сканирующей калориметрии и термогравиметрии порошка В95 (фракция менее 50 мкм)

СТРУКТУРА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ НОВОГО КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Фазовый состав керамики определяли на приборе D2 PHASER фирмы Bruker, излучение Cu K α , фильтр – Ni. Режим трубки (Cu) 10 мА, 30 кВ. Расшифровку спектра и расчёт фазового состава осуществляли с помощью библиотеки JCPDS-ICDD с использованием специализированного программного обеспечения (пакет рентгеноструктурного анализа Topas).

Результаты анализа (рис. 2) показали, что структура образца представлена, основными фазами - Al₂O₃ (корунд), фазы с низкой интенсивностью линий – шпинели типа Al₂MgO₄ и AlCuO₂.

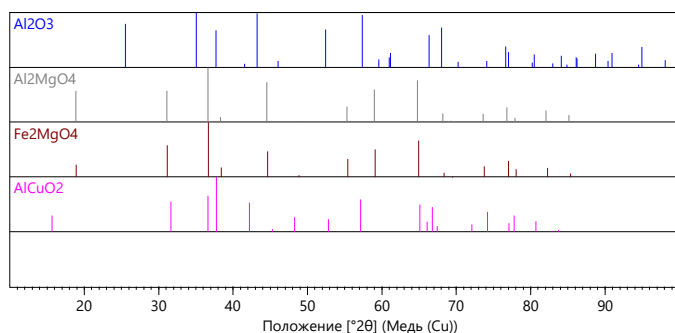


Рис. 2. Дифрактограмма образца с наложенными штрих-диаграммами фаз из базы данных PDF–2

При высоких температурах в системе MgO – Al₂O₃ – наблюдается образование твердых растворов оксида алюминия в шпинели. Соединение, полученное при более вы-

соких температурах спекания, имеет структуру алюмомагнезиальной шпинели нестехиометрического состава, описываемого формулой Mg_{1-3x}Al_{2+2x}O₄.

Вероятно, при достижении температуры спекания 1500 °С фазы MgO и Al₂O₃, находившиеся в свободном состоянии в порошке, полностью перешли в твердые растворы внедрения на основе шпинели. Ее можно рассматривать, как продукт взаимодействия этих оксидов со шпинелью стехиометрического состава. Отсутствие MgO в структуре материала можно объяснить также повышенной летучестью этого соединения [4].

Керамика обладает двумя непрерывными фазами – твердой и газообразной. Закрытая пористость образуется, в основном, поровым пространством изометричных кристаллов и кристаллов вытянутой формы.

Так как в составе порошка не было зафиксировано легкоплавких соединений, то с большой долей уверенности можно говорить о протекании спекания материала в системе твердая фаза – газ по механизму объемной диффузии, характерному для твердофазного спекания.

Однако могут иметь место и другие механизмы, в частности по типу: испарение–конденсация. На смешанный механизм спекания разрабатываемого материала также указывает небольшая степень усадки и уплотнения, что свойственно процессам испарения-конденсации.

Можно утверждать, что до нагрева не происходит разложения интерметаллида алюминия, который, по видимому, остается после химического диспергирования сплава В95, он частично покрыт слоем гидроксида алюминия, что препятствует его взаимодействию с щелочью.

Анализ микроструктуры керамики (рис. 3) выявил наличие эвтектических колоний, на котором можно ви-

дети характерные для эвтектик мелкие вытянутые кристаллы гладкой формы. Следует отметить периодичность структур, наличие столбчатых кристаллов в керамике, ориентированных параллельно друг другу.

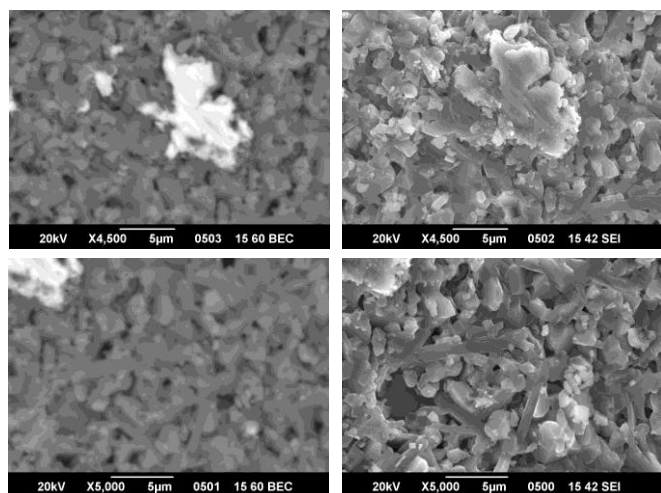


Рис. 3. Электронная микроскопия нового керамического материала

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кратко описана технология изготовления керамического материала из порошка полученного химическим диспергированием сплава В95.

Согласно данным РФА, что основной фазой керамического материала является - Al_2O_3 (корунд), фазы с низкой интенсивностью линий – шпинели типа Al_2MgO_4 и $AlCuO_2$. Образование данных фаз связано с высокой температурой спекания в $1500\text{ }^\circ\text{C}$, где фазы MgO и Al_2O_3 ,

находившиеся в порошке, полностью перешли в твердые растворы внедрения на основе шпинели.

Анализ микроструктуры керамики выявил наличие эвтектических колоний, на котором можно видеть характерные для эвтектик мелкие вытянутые кристаллы гладкой формы. Следует отметить периодичность структур, наличие столбчатых кристаллов в керамике, ориентированных параллельно друг другу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шляпин А.Д. Изучение свойств порошка гидроксида алюминия, полученного химическим диспергированием из отходов сплава В95 / А.Д. Шляпин, Д.А. Нечаев, А.Ю. Омаров, Н.В. Иванов, Т.Ю. Скакова // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – № 12. – С. 58-61. doi: 10.30987/1999-8775-2019-2019-12-58-61.
2. Трифонов Ю.Г. Структура и фазовый состав нового керамического материала / Ю.Г. Трифонов, А.Д. Шляпин, А.Ю. Омаров // Новые огнеупоры. – 2012. – № 12. – С. 31-35.
3. Иванов Д.А. Разработка технологии утилизации продукта отхода рабочего цикла мобильных водородных генераторов / Д.А. Иванов, А.Ю. Омаров, А.Д. Шляпин // Машиностроение и инженерное образование. – 2010. – №1. – С. 31-36.
4. Андрианов Н.Т. Синтез и успеваемость порошков в системе $MgO-Al_2O_3$, полученных золь-гель методом / Н.Т. Андрианов, П.П. Файков, С.Р. Абдель Гавад, Е.М. Малькова // Успехи в химии и химической технологии: сб. науч. тр. – Т. XIX. – 2005/ – № 8(56). – С. 36-40.

Structure and Phase Composition of Ceramics Made of Powder Obtained by Chemical Dispersion of V95 Alloy

Nechaev D.A., Omarov A.Yu., Ivanov N.V.

Russian University of Transport - RUT MIIT
Moscow, Russian Federation

nda@inbox.ru, asif.omarov@yandex.ru, ivanovofis@mail.ru

Abstract. The paper presents the results of differential scanning calorimetry, powder thermogravimetry, scanning electron microscopy, and X-ray phase analysis of ceramics made of powder obtained by chemical dispersion of B95 alloy. The process of obtaining a new ceramic material is briefly described. The mechanism of formation of the microstructure observed is described using the results obtained.

Keywords: B95 alloy, chemical dispersion, aluminum hydroxide, average particle size, specific surface area, rheological properties.

Влияние технологии изготовления отверстий на прочность ортогонально-армированных волокнистых композитов

Ахмедшин Э.Х.
Московский политех
Москва, Россия
fallenking74@gmail.com

Власов Д.Д., Татусь Н.А.
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН
Москва, Россия
danila_vlasov_98@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена анализу влияния отверстий, выполненных по различным технологиям на прочность ортогонально-армированных волокнистых композитов. Приведено сравнение данных, полученных конечно-элементным моделированием с результатами экспериментов на растяжение композитных пластин с отверстиями. Экспериментально подтверждено, что сверление отверстий в волокнистых композитах недопустимо: при изготовлении отверстий нужно раздвигать волокна на этапе укладки композитного элемента. Также была показана возможность моделирования если не самой структуры волокон, то хотя бы свойств материала рядом с отверстием с помощью встроенных функций МКЭ пакетов.

Ключевые слова: МКЭ, волокнистый композит, отверстие, укладка волокон вокруг отверстия, технология изготовления.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес инженеров-композитчиков к биологическим конструкциям в последнее время возрос многократно: во-первых, основательно развились методы исследования и моделирования волокнистых конструкций с помощью методов конечных элементов [1, 2], во вторых, активно развиваются методы «проектирования» навеянные самым известным из инженеров – Природой (bioinspired) [3-6]; в-третьих, появились технологии, позволяющие укладывать волокна по индивидуальным траекториям [8-10], как это часто происходит в биологических материалах.

Дальнейшим шагом на пути к повсеместному применению композитов станет развитие методов исследования и испытания конструкций целиком вместо плоских образцов, но до этого, на взгляд авторов, пока далеко.

Пластики, армированные волокнами, показывают зависимость механических характеристик от линейных размеров - пресловутый масштабный фактор [11-13], более того замечено существенное влияние технологии изготовления и подготовки образца на его механические характеристики [14-17].

Авторов интересовал вопрос влияния отверстий на прочность ортогонально армированных композитов, ранее [18, 19] было показано колоссальное влияние отверстий на несущую способность однонаправленных композитов, интересно было проверить, сохраняется ли эта тенденция для материала с ортогональным армированием.

В отличие от традиционных экспериментальных работ [20-23], которые проводятся на основе стандартов, настоящий эксперимент носит исключительно сравнительный

характер, в связи с этим размеры образцов отличаются от стандартных. На взгляд авторов, ценность работы заключается именно в использовании самодельных специальных образцов для изучения отверстий в волокнистых композитах.

Сравнение расчетов с экспериментом – проверка точности расчетов МКЭ комплексов – важна в первую очередь для ответа на вопрос: можно ли считать композитные конструкции с «особой» укладкой волокон без дополнительных доработок модели или нет? В этом и состояла цель исследования.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ РАСЧЕТ

Для численного расчета создавались модели 3-х типов: тип 1 – сплошной образец, 2-й и 3-й - образцы с отверстиями. Причем, 2-й образец имитировал сверление отверстия, а 3-й - биоподобное обтекание волокнами. Расчет проводился в популярном конечно-элементном комплексе. Моделирование можно назвать цифровым экспериментом, поскольку и типы, и размеры «образцов», и приложения нагрузки полностью соответствовали проведенному далее эксперименту. Авторов интересовало, «почувствует» ли программа разницу между отверстиями, изготовленными по различным технологиям. Учитывались не максимальные нагрузки в ньютонах, а их отношение: нагрузка в образцах с отверстиями к нагрузке в сплошном образце.

Основная сложность заключалась в задании траекторий укладки волокон. Стандартными методами КЭ пакетов сделать это весьма трудоемко, поэтому применялся метод деградации свойств материала. Поскольку в образце, в котором волокна уложены вокруг отверстия по известному закону меняется массовая доля волокна, то меняются и характеристики в сечении около отверстия (рис. 1). Это явление и моделировалось заданием коэффициента деградации свойств материала.

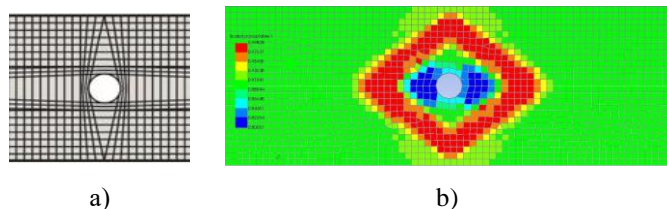


Рис. 1. Изменение характеристик в биоподобном образце, а) волокна, уложенные по технологии, б) МКЭ-модель

На рис. 1 б) красным цветом выделена область, где

массовая доля волокон возросла за счет раздвижения, синим – область, где волокна в одном направлении отсутствуют, а в зеленой области массовая доля не изменилась, следовательно характеристики материала такие же как у остальных образцов (с просверленным отверстием и сплошного). В связи с этим для зеленой области коэффициент не задавался, а в синей и красной областях задавались положительные и отрицательные коэффициенты соответственно. Значение коэффициента деградации ниже нуля в красной зоне отражает улучшение свойств материала вследствие увеличения объемной доли волокна.

Результаты численного эксперимента показаны на рис. 2, а данные приведены в таблице 1. Таким образом, КЭ моделирование просверленных и биоподобных отверстий стандартными методами программных пакетов вполне осуществимо: максимальная нагрузка для образцов с отверстиями различных типов отличается.

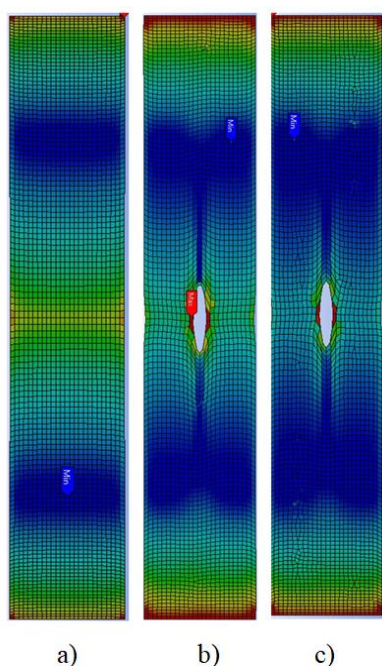


Рис. 2. Внешний вид моделей после проведения численного эксперимента на растяжение: а) – тип 1, б) – тип 2, с) – тип 3

Таблица 1

Типы плоских образцов	Тип 1	Тип 2	Тип 3
Максимальная нагрузка, Н	21053	14190	16919
Максимальная нагрузка в % от предельной нагрузки для сплошных образцов	100	67	80

Следующие шаги в работе направлены на подготовку и проведение эксперимента для сравнения с численными расчетами.

ПОДГОТОВКА КОМПОЗИТНЫХ ОБРАЗЦОВ

Для проведения эксперимента образцы изготавливались методом вакуумной инфузии (рис. 3): ортогонально армированная стеклоткань укладывалась в несколько слоёв для получения необходимой толщины пакета (2,5 мм) и габаритных размеров плиты (250 мм * 500 мм), после чего весь пакет помещался в вакуумный мешок (3) и пропитывалась эпоксидной смолой с отвердителем (4).

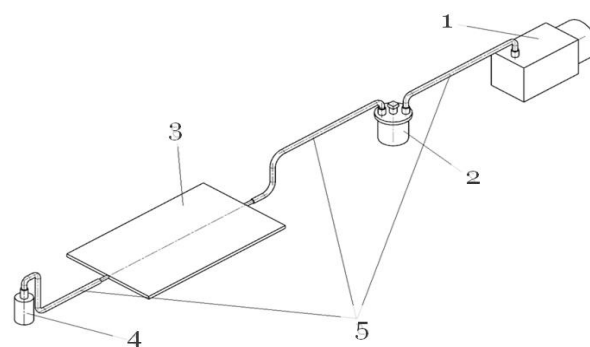


Рис. 3. Технология получения композитной плиты методом инфузии. 1 – вакуумный насос, 2 – ловушка для смолы, 3 – пакет с формой композита, 4 – дегазированное связующее, 5 – вакуумный трубопровод

Для получения отверстий диаметром 4 мм в одном случае использовался метод сверления, а в другом - на этапе подготовки тканного пакета перед пропиткой в ткань закладывались цилиндры из политетрафторэтилена диаметром, равным диаметру сверла, при этом волокна вручную раздвигались вокруг цилиндра. Данная технология получения отверстий обтеканием волокон, безусловно, является гораздо более трудоемкой, чем сверление. Однако Природа неоднократно демонстрирует именно такое поведение материала в био-конструкциях.

После отверждения цилиндры удалялись и на трёхкоординатном ЧПУ станке вырезались образцы нужного размера. Таким образом, для проведения испытаний было изготовлено 3 типа образцов: сплошные полосы – тип 1, полосы с просверленным отверстием – тип 2 и полосы с отверстиями, полученными раздвижением волокон, - тип 3 (рис. 4).

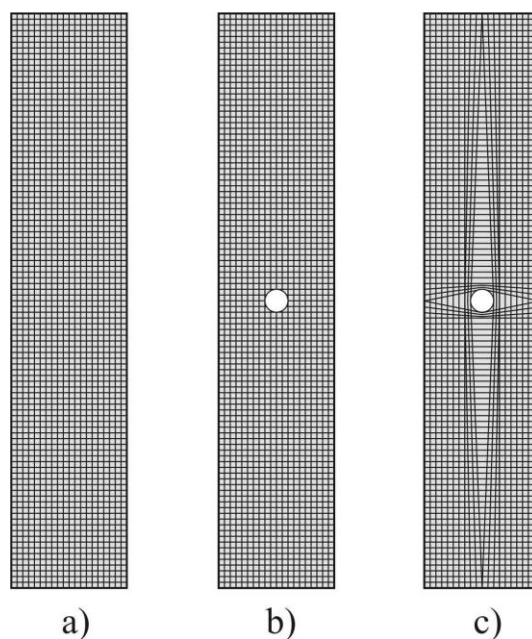


Рис. 4. Внешний вид образцов для проведения испытаний: а) – тип 1, б) – тип 2, с) – тип 3

ПОДГОТОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент на растяжение образцов проводился на электромеханической разрывной машине INSTRON 100

кН. Для испытания применялись самозатягивающиеся захваты (рис. 5), у которых сила сжатия между губками P_- пропорциональна силе растяжения образца P_+ .

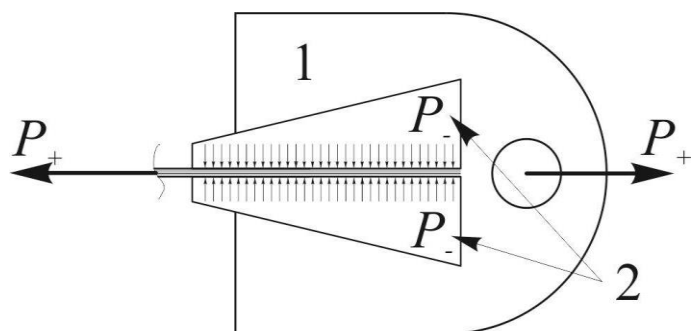


Рис. 5. Самозатягивающийся захват. 1 – корпус захвата, 2 – губки, между которыми зажимается образец

Образцы размерами 230мм* 24мм* 2.5мм помещались в захваты таким образом, чтобы длина рабочей части составляла 130 мм. Для снижения концентрации напряжений в захватной части в эксперименте применялись накладки из наждачной бумаги.

Скорость нагружения составляла 2 мм/мин, что является стандартным для большинства испытаний.

Внешний вид образца в захватах после проведения испытаний показан на рис. 6



Рис. 6. Образец типа 2 после испытания

Во время эксперимента образцы нагружались до разрушения.

Вид разрушения образцов показан на рис. 7. Все образцы разрушились в рабочей зоне, что говорит о корректности результатов испытаний. Образцы типа 2 и 3 разрушились в зоне отверстия.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для набора статистики были испытаны серии по четыре образца каждого типа. Разброс полученных при проведении эксперимента значений максимальных напряжений не превышал для образцов 1 типа – 3%, 2 типа – 10%, 3 типа – 5%, что говорит о достоверности результатов.

Типичные кривые нагружения приведены на рис. 8.



Рис. 7. Вид разрушенных образцов: а) – тип 1, б) – тип 2, с) – тип 3

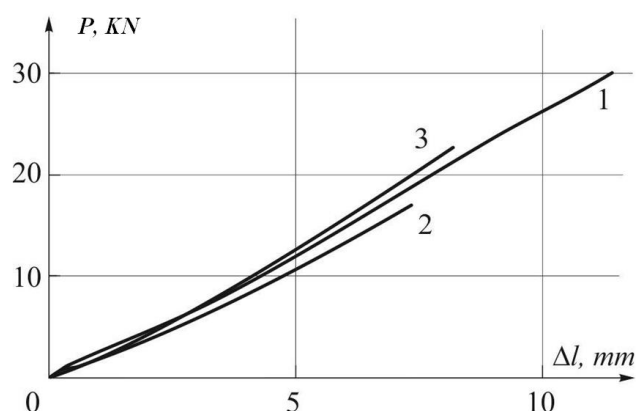


Рис. 8. Типичные диаграммы нагрузка-перемещение. Цифрами обозначены типы образцов

Результаты, полученные при проведении эксперимента, сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Типы плоских образцов	Тип 1	Тип 2	Тип 3
Максимальная нагрузка, Н	29746	17639	21487
Максимальная нагрузка в % от предельной нагрузки для гладких образцов	100	59	72

Отчетливо видно, что образцы с просверленным отверстием выдерживают гораздо меньшую нагрузку, чем образцы с раздвинутыми волокнами. Стоит отметить, что существенную роль здесь играет целостность наполнителя: очевидно, что сверление перерезает часть волокон в сечении, что существенно снижает прочность конструкции у отверстия. В случае образца типа 3 все волокна остаются в сечении, как и в образце без отверстия, что позволяет повысить общую прочность образца при растяжении.

Еще одним важным моментом является то, что представленная авторами технология ручного формования

отверстий в волокнистых композитах путем раздвижения волокон не является точной: даже вымеренное позиционирование полимерного цилиндра не гарантирует одинакового и ровного раздвижения волокон по обеим сторонам. Более того, повышается вероятность непропитки волокон у отверстия связующим. Тем не менее, даже технология с такими недостатками наглядно демонстрирует преимущество такого подхода к созданию отверстий в композитных конструкциях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проведении исследования основная цель авторов заключалась в численной и экспериментальной проверке эффективности нового подхода к изготовлению отверстий в конструкциях из полимерных композитов - раздвижению волокон на этапе формования. Для этого были изготовлены и испытаны специальные образцы, отработана новая технология и проведен численный анализ МКЭ.

По результатам проведенной работы можно сделать однозначный вывод, что технология изготовления отверстий влияет на несущую способность ортогонально армированных волокнистых композитов. То есть отверстия, изготовленные без перерезания волокон, гораздо более эффективны, чем просверленные. Авторы получили снижение несущей способности на 41% для просверленного и 28% «биологического» отверстия. Модернизация технологии раздвижения волокон или использование аддитивных технологий может привести к увеличению прочности образцов с отверстиями.

Также показана возможность моделирования биоподобных отверстий стандартными средствами программных пакетов КЭ расчетов, однако относиться к получаемым результатам следует внимательно, поскольку результаты сравнения цифрового и натурального экспериментов показали завышение прочностных характеристик элементов с отверстием примерно на 10%. Эксперимент с моделированием укладки волокон способом деградации свойств следует считать удачным. На основе экспериментальных работ можно подобрать более точный коэффициент деградации, с помощью которого следует моделировать «биологические» отверстие. Но скорее всего он будет отличаться для разных типов укладки волокон и разных размеров отверстий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Malakhov A.V. Design algorithm of rational fiber trajectories in arbitrarily loaded composite plate / A.V.Malakhov, A.N.Polilov // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2017. – Vol. 46. – № 5. pp. 479-487.
2. Krishnadasan C.K. Analytical studies and numerical predictions of stresses in shear joints of layered composite panels for aerospace applications / C.K. Krishnadasan, N. Siva Shanmugam, B. Sivasubramonian, B. Nageswara Rao, R. Suresh // *Composite Structures*. – 2021. – 112927. doi:10.1016/j.compstruct.2020.112927.
3. Ghazlan A. Inspiration from Nature's body armours – A review of biological and bioinspired composites/ A. Ghazlan, T. Ngo, P. Tan, Y. Min Xie, P.Tran, M.Donough // *Composites Part B: Engineering*. – 2021. – Vol. 205, 108513. doi:10.1016/j.compositesb.2020.108513.

4. Polilov A.N. Strength biomechanics of fiber composites / A.N. Polilov, N.A. Tatus. – Moscow: Fizmatlit, 2018. – 328 p.

5. Polilov A.N. Analysis of efficiency of uniform-strength composite leaf springs under various loading conditions / A.N. Polilov, N.A. Tatus', X. Tian // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2019. – Vol. 48 (5). – P. 431-439. doi: 10.3103/S105261881905008X.

6. Fakoor M. A micromechanical approach for mixed mode I/II failure assessment of cracked highly orthotropic materials such as wood / M.Fakoor, M.S.Khezri // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. – 2020. – Vol. 109. – 102740. doi:10.1016/j.tafmec.2020.102740.

7. Wasti S. Influence of plasticizers on thermal and mechanical properties of biocomposite filaments made from lignin and polylactic acid for 3D printing / S. Wasti, E.Triggs, R.Farag, M.Auad, S.Adhikari, D.Bajwa, M.Li, A.J. Ragauskas // *Composites Part B: Engineering*. – 2021. – Vol. 205, 108483. doi:10.1016/j.compositesb.2020.108483.

8. Polilov A.N. Analyzing the correctness of equal strength composite profiled beam bending problems / A.N. Polilov, N.A. Tatus, X. Tian // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – 2019. – Vol. 60 (1). – P. 144-155. doi: 10.1134/S0021894419010188.

9. Tao R. 4D printed origami metamaterials with tunable compression twist behavior and stress-strain curves / R. Tao, L. Ji, Y. Li, Z. Wan, W. Hu, W. Wu, B. Liao, L. Ma, D. Fang // *Composites Part B: Engineering*. – 2020. – Vol. 201. – 108344. doi:10.1016/j.compositesb.2020.108344.

10. Hou Z. Optimization design and 3D printing of curvilinear fiber reinforced variable stiffness composites / Z. Hou, X. Tian, J. Zhang, Z. Zheng, L. Zhe, D. Li, A.V. Malakhov, A.N. Polilov // *Composites Science and Technology*. – 2021. – Vol. 201. – 108502. doi: 10.1016/j.compscitech.2020.108502.

11. Paris F. The scale effect in composites: An explanation physically based on the different mechanisms of damage involved in failure / F. Paris, M.L. Velasco, E. Correa // *Composite Structures*. – 2021. – Vol. 257. – 11308. doi:10.1016/j.compstruct.2020.113089.

12. Saito H. A study of crack suppression mechanism of thin-ply carbon-fiber-reinforced polymer laminate with mesoscopic numerical simulation / H. Saito, H. Takeuchi, I. Kimpara // *Journal of Composite Materials*. – 2014. – Vol. 48(17). – P. 2085-2096. doi:10.1177/0021998313494430.

13. Serra J. Scaling effect in notched composites: The Discrete Ply Model approach / J. Serra, C. Bouvet, B. Castanié, C. Petiot // *Composite Structures*. – 2016. – Vol. 148. – P. 127-143. doi:10.1016/j.compstruct.2016.03.062.

14. Zhang Y. Predicting the delamination factor in carbon fibre reinforced plastic composites during drilling through the Gaussian process regression / Y. Zhang, X. Xu // *Journal of Composite Materials*. – 2021. doi:10.1177/0021998320984245.

15. Umair M. Effect of weave architecture and glass microspheres percentage on the low velocity impact response of hemp/green epoxy composites / M. Umair, M. Hussain, Z. Abbas, K. Shaker, Y. Nawab // *Journal of Composite Materials*. – 2021. doi:10.1177/0021998320987605.

16. Tatus N.A. A special specimen shape for adequate determination of tensile strength of a unidirectional fiber-reinforced composite / N.A. Tatus, A.N. Polilov, D.D. Vlasov,

E.K. Akhmedshin // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2315. – 040044. doi: 10.1063/5.0036628.

17. Brauning K.A. Mitigations of machine-damaged free-edge effects on fiber-reinforced composites / K.A. Brauning, A. Kunza, I.M. Alarifi, R. Asmatulu // Journal of Composite Materials. – 2020. doi:10.1177/0021998320967987.

18. Polilov A.N. Reducing the effect of holes on the bearing capacity of fiber-reinforced materials / A.N. Polilov, N.A. Tatus, I.S. Kamantsev, A.V. Kuznetsov, E.Kh. Akhmedshin, X. Tian // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2176. – 030010. doi: 10.1063/1.5135134.

19. Akhmedshin E.Kh. Reducing of holes effect on composite elements strength / E. Kh.Akhmedshin, A.N. Polilov, N.A. Tatus // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 848 (1). – 012088. doi: 10.1088/1757-899X/848/1/012088.

20. Fernandes F.A.O. Manufacturing and testing composites based on natural materials / F.A.O. Fernandes, J.P. Tavares, R.J. Alves de Sousa, A.B. Pereira, J.L. Esteves //

Procedia Manufacturing. – 2017. – Vol. 13. – P. 227-234. doi:10.1016/j.promfg.2017.09.055.

21. Spronk S.W.F. Stress-strain synchronization for high strain rate tests on brittle composites / S.W.F. Spronk, E. Verboven, F.A. Gilabert, R.D.B. Sevenois, D. Garoz, M. Kersemans, W. Van Paepegem // Polymer Testing. – 2018. – Vol. 67. – P. 477-486. doi:10.1016/j.polymertesting.2018.02.008.

22. Komorek A. Properties of multi-layered polymer composites with Vectran fiber reinforcement / A. Komorek, R. Szczepaniak, P. Przybylek, A. Krzyzak, J. Godzimirski, M. Roskiewicz, D. Seremak // Composite Structures. – 2021. – Vol. 256. – 113045. doi:10.1016/j.compstruct.2020.113045.

23. Yamamoto G. Tensile-strength-controlling factors in unidirectional carbon fiber reinforced plastic composites / G. Yamamoto, K. Koizumi, T. Nakamura, N. Hirano, T. Okabe // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2021. – Vol. 140. – 106140. doi:10.1016/j.compositesa.2020.106140.

Effect of Hole Manufacturing Technology on the Strength of Orthogonally Reinforced Fibrous Composites

E. Kh. Akhmedshin
Moscow Polytech
Moscow, Russian Federation
fallenking74@gmail.com

D.D. Vlasov, N.A. Tatus'
Mechanical Engineering Research Institute of the Russian
Academy of Sciences
Moscow, Russian Federation
danila_vlasov_98@mail.ru

Annotation. The work is devoted to the analysis of the hole effect made using various technologies on the strength of orthogonally reinforced fibrous composites. Comparison of data obtained by finite-element modeling with results of tensile experiments of composite plates with holes is given. It has been experimentally confirmed that drilling holes in fibrous composites is unacceptable: when making holes, fibers must be expanded at the stage of laying the composite element. It is also shown that in FEM pro-

grams there is an opportunity to model the material properties near the hole.

Keywords: FEM, fibrous composite, hole, fibre laying around the hole, manufacturing technology.

Модифицированные композиционные мелкозернистые бетоны

Перфилов В.А.

Волгоградский государственный технический университет
Волгоград, Российская Федерация
vladimirperfilov@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований по определению влияния комплексных добавок, включающих пластификатор и сажевые отходы производства на свойства мелкозернистых бетонов. Проведены экспериментальные исследования совместной работы цементно-песчаной матрицы с сажевыми отходами. В ходе исследований определялось влияние на процессы структурообразования, физико-механические и прочностные характеристики мелкозернистых бетонов комплексного введения в состав смеси пластифицирующей добавки и сажевых отходов. Установлено, что микрочастицы сажевых отходов концентрируют вокруг себя зерна кварцевого песка, а также продукты новообразований цементного камня в виде гидросиликатов кальция и другие. Это способствует уплотнению микроструктуры полученного мелкозернистого бетона и увеличению его прочностных характеристик.

Ключевые слова: сажевые отходы, пластификатор, мелкозернистый бетон, ультразвуковой диспергатор, прочность.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при работе тепловых электростанций и других генерирующих объектов образуется огромное количество сажевых отходов. Влияние этих отходов на окружающую среду очень негативное ввиду наличия в них в большом объеме вредных химико-биологических новообразований. В результате хранения сажевых отходов на открытых полигонах при воздействии осадков возникает опасность заражения водоемов и подземных вод, что может привести к угрозе здоровью человека. Возникает необходимость утилизации отходов и ликвидации их захоронений, занимающих большие площади и требующих огромных финансовых затрат на их обслуживание. Для решения данной проблемы существуют технологии переработки сажевых и других видов отходов для производства мелкозернистых бетонов [1-7].

АКТУАЛЬНОСТЬ

Применение сажевых отходов при приготовлении мелкозернистых бетонов является актуальным ввиду их специфических физико-химических свойств. Введение сажи в бетонную смесь способствует улучшению реологических характеристик бетонной смеси, снижает ее водоотделение, и тем самым, увеличивает плотность мелкозернистого бетона. Микрочастицы сажевых отходов, имеющие размер не более 5-7 мкм, путем адгезии взаимодействуют с гидросиликатами цемента, образуя прочные кристаллы новообразований цементного камня. Такой направленный процесс кристаллизации способствует упрочнению микроструктуры и значительному росту

плотности и прочности затвердевшего композиционного материала.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задачей научных исследований является повышение эффективности процесса получения бетонной смеси, направленное на увеличение ее прочности за счет использования неutilизированных сажевых отходов, упрочняющих структуру мелкозернистого бетона на микроуровне.

Для улучшения физико-механических свойств мелкозернистых бетонов на микроуровне проведены исследования влияния комплексных модифицирующих добавок, включающих сажевые отходы теплоэнергетических производств и пластифицирующие добавки.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Проанализированы научно-экспериментальные исследования совместной работы цементно-песчаной матрицы с различными видами пластифицирующих и нанокремниевых добавок, а также микронаполнителей [8-25]. В ходе исследований изучалось влияние на процессы структурообразования, физико-механические и прочностные характеристики мелкозернистых бетонов комплексного введения в состав смеси пластифицирующей добавки и сажевых отходов.

С целью изучения влияния добавок изготавливались образцы мелкозернистых бетонов размером 4х4х16 см на основе цементно-песчаной смеси состава Ц:П=1:3 с водоцементным отношением В/Ц=0.45. В качестве исходных материалов для изготовления образцов использовались: порландцемент ЦЕМ11/А-Ш 42.5Н, кварцевый песок с модулем крупности 1.9. Сажевые отходы крупностью до 5-7 мкм вводились в процентном отношении от массы цемента (см. табл. 1) совместно с водой затворения. Учитывая, что сажа не растворяется в воде, приготовление водного раствора углеродной добавки производилось с помощью ультразвукового диспергатора с частотой от 20 до 25 кГц. В результате высокоскоростного перемешивания полученный раствор обладает длительной устойчивостью и высокой реакционной способностью.

Приготовление цементно-песчаной смеси осуществлялось в растворосмесителе в течение 3 минут. После распределения смеси в стандартных формах производилось кратковременное виброуплотнение на лабораторной виброплощадке с амплитудой колебаний 0,5 мм и частотой 3000 кол./мин. Твердение образцов осуществлялось в естественных условиях при температуре 18-22о С и влажности 80 – 95 % в течение 28 суток. На каждый состав приготавливалось не менее 3-х образцов, а определение прочности производилось неразрушающим методом ультразвуковым прибором «Пульсар-1.2», а также с помощью

прессового оборудования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты экспериментальных исследований влияния сажевых отходов на свойства цементно-песчаной смеси представлены в табл.1.

При введении сажевых отходов в мелкозернистую бетонную смесь наблюдалось увеличение подвижности раствора, что способствовало уменьшению количества добавляемой воды затворения при сохранении равной подвижности растворов с различным количеством вводимой добавки.

Пластифицирующее действие добавки исследовалось с помощью встряхивающего столика и стандартного конуса. Анализ полученных данных показал, что введение сажевых отходов в количестве 0.25...1 % от массы цемента способствует увеличению распыла стандартного конуса от 115 мм (эталон без добавки) до 122 мм.

Таблица 1

Влияние сажевых отходов на свойства мелкозернистого бетона

№ состава	Количество сажевой добавки, % от массы цемента	Распыл стандартного конуса, мм	Прочность мелкозернистого бетона, МПа	
			Изгиб	Сжатие
1	0	115	0.49	27.3
2	0.25	120	0.42	27.6
3	0.3	120	0.43	30.5
4	0.35	121	0.49	32.6
5	0.5	121	0.42	37.6
6	1.0	122	0.45	39.4

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что введение в бетонную смесь добавки сажевых отходов приводит к увеличению прочности на сжатие по сравнению с составом смеси без добавки. Максимальное увеличение прочности (на 44 %) по сравнению с эталоном без добавки показал мелкозернистый бетон, имеющий в своем составе 1,0 % сажевых отходов по отношению к массе цемента.

Микроструктурный анализ полученных образцов мелкозернистого бетона производился с помощью цифрового стереомикроскопа «Альтами LCD». Микрофотографии представлены на рис. 1. Установлено, что микрочастицы сажевых отходов концентрируются вокруг себя зерна кварцевого песка, а также продукты новообразований цементного камня в виде гидросиликатов кальция и другие. Это способствует уплотнению микроструктуры полученного мелкозернистого бетона и увеличению его прочностных характеристик.

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований показано положительное влияние добавки из сажевых отходов на физико-механические свойства и микроструктуру мелкозернистого бетона.

В ходе проведения дальнейших экспериментальных исследований изучалось влияние пластифицирующих добавок на изменение прочностных параметров мелкозернистого бетона. При неизменном составе смеси мелкозернистого бетона Ц:П=1:3 с водоцементным отношением В/Ц=0.45 вместо добавки сажевых отходов был использован пластификатор «Д-11», разработанный в ООО НПП «Ирстройпрогресс» в соответствии с ТУ 5743-007-44628610-2008.

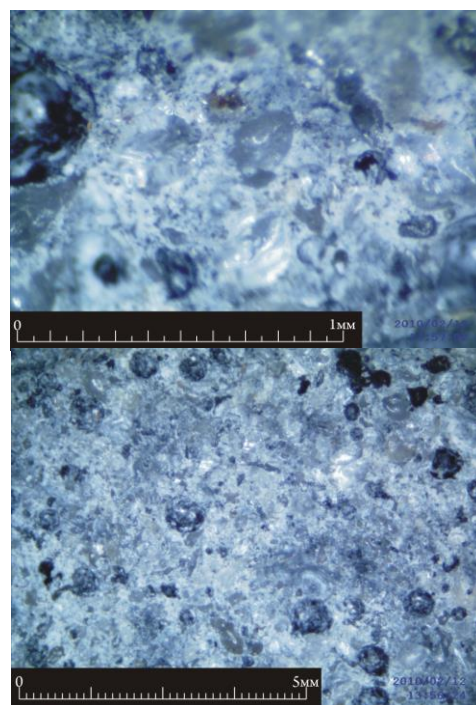


Рис. 1. Микрофотографии структуры мелкозернистого бетона с использованием сажевой добавки в количестве 0.5 % от массы цемента

Дозировка добавки осуществлялась в соответствии с рекомендациями ее разработчика в зависимости от расхода цемента. Приготовление раствора добавки также производилось с помощью высокочастотного ультразвукового диспергатора. Полученный водный раствор пластифицирующей добавки вводился в цементно-песчаную смесь и перемешивался в стандартном растворосмесителе. После изготовления образцов и их затвердевания в условиях, аналогичных при изготовлении мелкозернистых бетонов с использованием сажевых отходов, были определены прочностные характеристики. Результаты испытаний представлены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние пластифицирующей добавки «Д-11» и комплексной добавки, дополнительно включающей сажевые отходы на свойства мелкозернистого бетона

№ п/п	Количество добавки «Д-11», % от массы цемента	Прочность мелкозернистого бетона с «Д-11», МПа		Количество комплексной добавки («Д-11»+сажевые отходы) в соотношении 1:1, % от массы цемента	Прочность мелкозернистого бетона с комплексной добавкой, МПа	
		Изгиб	Сжатие		Изгиб	Сжатие
1	0	0.49	27.3	0	0.49	27.3
2	0.25	0.4	43.64	0.25	0.4	53.28
3	0.35	0.35	43.54	0.35	0.37	54.2
4	0.5	0.38	46.5	0.5	0.42	51.2
5	0.75	0.34	47.4	0.75	0.43	53.4
6	1.0	0.33	49.8	1.0	0.37	52.5
7	1.5	0.35	45.6	1.5	0.37	51.4

Анализ результатов испытаний показал, что с увеличением количества вводимой пластифицирующей добавки прочность мелкозернистого бетона возрастает. Максимальное увеличение прочности на сжатие по сравнению с

эталонном без добавки составило 82 % (состав № 6). Дальнейшее увеличение количества пластификатора (состав № 7) приводит к некоторому снижению прочности на сжатие. Следует отметить небольшое уменьшение показателей прочности при изгибе образцов с пластифицирующей добавкой по сравнению с образцами, включающими сажевые отходы.

Введение пластифицирующей добавки «Д-11» также способствовало повышению подвижности раствора, незначительно превышающей этот показатель в мелкозернистых бетонах, приготовленных с использованием сажевых отходов. Так, расплыв стандартного конуса на встряхивающем столике составил 148 мм.

Известно, что стоимость пластифицирующих добавок достаточно высока, поэтому комплексное использование этих добавок с сажевыми отходами способствовало бы снижению себестоимости получения мелкозернистых бетонов без снижения прочностных характеристик и реологических свойств бетонных смесей.

Для проведения дополнительных испытаний использовали аналогичный состав мелкозернистого бетона, а именно, Ц:П=1:3 с водоцементным отношением В/Ц=0.45. В качестве комплексной модифицирующей добавки применяли пластификатор «Д-11» и сажевые отходы в соотношении 1:1, в количестве 0.25-1.5 % от массы цемента. Приготовление комплексной добавки осуществлялось в ультразвуковом диспергаторе совместно с водой затворения для лучшей растворимости компонентов и повышения реакционной способности смеси. Дальнейшее изготовление опытных образцов и их затвердевание аналогичны предшествующим испытаниям.

Результаты испытаний полученных образцов на прочность представлены в табл. 3. Анализ полученных данных показал, что образцы, имеющие в своем составе указанную комплексную добавку, имеют более высокие параметры прочности по сравнению с образцами, в состав которых входит только пластификатор или сажевые отходы.

Максимальное увеличение прочности на сжатие мелкозернистого бетона с комплексной добавкой по сравнению с эталоном без добавок составляет 98 %. Пластифицирующее действие комплексной добавки выразилось в увеличении расплыва стандартного конуса на встряхивающем столике, которое составило 138 мм. Установлено, что частичное замещение добавки «Д-11» сажевыми отходами в мелкозернистом бетоне привело к повышенной водопотребности смеси. Однако для составов с комплексной добавкой отмечено пониженное водоотделение и нерасплаиваемость смеси.

С учетом параметров подвижности и прочности мелкозернистых бетонов оптимальной дозировкой комплексной добавки, включающей пластификатор «Д-11» и сажевые отходы, является диапазон от 0,35 % до 0,75 % от массы цемента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

Таким образом, растворная смесь с комплексной добавкой, включающей пластификатор «Д-11» и сажевые отходы, обладает пониженным водоотделением и нерасплаиваемостью. В результате проведения экспериментальных исследований установлено, что добавление в сырьевую смесь комплексной добавки, включающей «Д-11» и сажевые отходы при указанных соотношениях входящих в состав компонентов, способствует увеличению

прочности мелкозернистого бетона в 28 суточном возрасте почти в 2 раза. Введение в бетонную смесь неуплотненных сажевых отходов позволит улучшить реологические свойства мелкозернистых смесей. Утилизация огромных скоплений отходов на полигонах позволит улучшить экологическое состояние окружающей среды как в почве, подземных водах, так и в атмосфере. Значительно снизится себестоимость изготовления мелкозернистого бетона с улучшенными физико-механическими свойствами за счет применения производственных отходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Перфилов В.А. Утилизация отходов нефтегазодобывающих и теплогенерирующих производств для повышения промышленной и экологической безопасности / В.А. Перфилов, И.В. Шевцов, Б.Я. Засличко, У.В. Канавец // Вестник Волгоградского гос. архитектурно-строительного ун-та. Серия: Строительство и архитектура. – 2016. – № 43. – С. 238-243.
2. Перфилов В.А. Утилизация промышленных отходов для повышения экологической безопасности окружающей среды / В.А. Перфилов, О.Н. Вольская // Юг России: экология, развитие. – 2016. – Т. 11, № 2. – С. 205-212.
3. Перфилов В.А. Использование сажевых отходов с целью повышения прочностных характеристик тяжелых бетонов / В.А. Перфилов, М.О. Зубова // Современные проблемы проектирования, строительства и модернизации инженерных коммуникаций: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Самарканд, 2014. – С. 373-376.
4. Anisimov L.A. Development of technology for disposal of drilling wastes offshore oil and gas facilities [Электронный ресурс] / L.A. Anisimov, V.A. Perfilov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 272. – P. 022040. doi:10.1088/1755-1315/272/2/022040.
5. Перфилов В.А. Disposal of Oil and Gas and Power Industries to Improve Industrial and Environmental Safety [Электронный ресурс] / V.A. Perfilov, T.V. Doncova // International science and technology conference "Earth science" (ISTCEarthScience) IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 272. – P. 032079. doi:10.1088/1755-1315/272/3/032079.
6. Перфилов В.А. Влияние углеродистых добавок на свойства мелкозернистых фибробетонов / В.А. Перфилов, М.О. Зубова // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер. Политематическая. – 2015. – Вып. 1 (37) - URL: www.vestnik.vgasu.ru.
7. Oreshkin D.V. Disposal of drilling sludge in the production of building materials / D.V. Oreshkin, A.N. Chebotaev, V.A. Perfilov // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 111. – С. 607-611.
8. Perfilov V.A. Concrete strength and crack resistance control / V.A. Perfilov, D.V. Oreshkin, D.Y. Zemlyanushnov // Procedia Engineering. – 2016. – 150. – P. 1474-1478. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.085.
9. Perfilov V.A. Environmentally safe mortar and grouting solutions with hollow glass microspheres / V.A. Perfilov, D.V. Oreshkin, V.S. Semenov // Procedia Engineering. – 2016. – 150. – P. 1479-1484. doi:10.1016/j.proeng.2016.07.086.
10. Перфилов В.А. Влияние микроармирующих волокон и пластифицирующих добавок на свойства мелкозернистых бетонов / В.А. Перфилов, А.В. Котляревская, У.В. Канавец // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строи-

тельство и архитектура. – 2016. – № 44-2 (63). – С. 111-118.

11. Перфилов В.А. Влияние базальтовых волокон на прочность мелкозернистых фибробетонов / В.А. Перфилов, М.О. Зубова // Интернет-Вестник ВолгГАСУ. Серия: Политематическая. – 2015. – № 1 (37). – С. 9.

12. Перфилов В.А. Мелкозернистые базальтофибробетоны / В.А. Перфилов, М.О. Зубова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2014. – № 38. – С. 85-93.

13. Перфилов В.А. Применение базальтовых волокон и модифицирующей добавки для повышения прочностных характеристик тяжелых бетонов / В.А. Перфилов, М.О. Зубова, Д.Л. Неизвестный // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2011. – № 12. – С. 46-49.

14. Перфилов В.А. Фибробетон ускоренного твердения / В.А. Перфилов, У.В. Алаторцева, А.А. Тюрин // Известия ВУЗов. Строительство. – 2009. – № 1. – С. 48-51.

15. Перфилов В.А. Применение модифицирующих нанодобавок для повышения прочности фибробетонов / В.А. Перфилов, У.В. Алаторцева, М.И. Дмитрук, И.Л. Жюга // Известия ВУЗов. Строительство. – 2009. – № 8. – С. 17-19.

16. Гусев Б.В. Применение нанотехнологий и наноматериалов в строительстве: мнения экспертов / Б.В. Гусев // Строительство: новые технологии – новое оборудование. – 2012. – № 1. – С. 17-28.

17. Фаликман В.Р. Наноматериалы и нанотехнологии в современных бетонах / В.Р. Фаликман // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – № 1. – С. 31-34.

18. Юдович М.Е. Наномодификация пластификаторов, регулирование их свойств и прочностных характеристик

литых бетонов / М.Е. Юдович, А.Н. Пономарев // Стройпрофиль. – 2007. – № 6. – С. 49-51.

19. Вахмистров А.И. Эффективные фиброармированные материалы и изделия для строительства / А.И. Вахмистров, В.И. Морозов, Ю.В. Пухаренко, А.Н. Дмитриев, У.Х. Магдеев // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – № 10. – С.43-44.

20. Королев А.С. Мелкозернистые бетоны с нанодобавками синтетического цеолита / А.С. Королев // Бетон и железобетон. – 2008. – № 6. – С. 13-15.

21. Перфилов В.А. Конструкционные фибробетоны с применением модифицирующих нанодобавок / В.А. Перфилов, У.В. Алаторцева // Материалы Второго Международного форума по нанотех-нологиям 6-8 октября, 2009г. – Москва: ГК Роснанотех, 2009. – С. 374-375.

22. Пухаренко Ю.В. Современное состояние и перспективы применения фуллероидных наноструктур в цементных композициях / Ю.В. Пухаренко // Сибирский промышленник. – 2008. – № 3. – С. 30-31.

23. Perfilov V.A. Nano modified foam-fiber-concrete mixture / V.A. Perfilov, V.V. Gabova // Solid State Phenomena. – 2018. – Vol. 284. – P. 1036-1041. doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.284.1036.

24. Perfilov V.A. Impact of superplasticizing agents on physical and mechanical properties of cellular concrete / V.A. Perfilov, V.V. Gabova, I.A. Tomareva // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 974. – P. 181-186. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.974.181.

25. Перфилов В.А., Митяев С.П. Расчет фибробетона с нанодобавкой // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009612195, от 29.4.2009 г.

Modified Composite Fine-Grained Concrete

Perfilov V.A.

Volgograd State Technical University
Volgograd, Russian Federation
vladimirperfilov@mail.ru

Abstract. The paper presents the findings of the experimental investigation conducted to identify the effect of composite admixtures including a plastifying agent and soot production wastes on the proper-ties of fine grained concrete. The joint effect of the cement and sand matrix and soot wastes was investigated, too. The investigation identified the effect the complex admixture of a plastifying agent and soot wastes on structure formation, physical, mechanical properties and strength of the fine grained concrete. It was found that the micro particles of soot wastes concen-

trate the grains of the quartz sand around them as well as the products of the new formation of cement stone such as hydrated calcium silicate and others. This ensures a higher density of micro structure and increased strength of the fine grained concrete.

Keywords: soot wastes, plastifying agent, fine grained concrete, ultrasonic disperser, strength.

Механическое поведение слоистого углепластика на участках активного и пассивного деформирования в цикле одноосного растяжения

Северов П.Б.

ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук
Москва, Россия
alpinprom@yandex.ru

Аннотация. Исследовалось нелинейное поведение слоистого квазиизотропного углепластика в цикле одноосного растяжения. При контроле совместимости расчетных и экспериментальных отклонений подобраны аппроксимирующие нелинейные уравнения верхней и нижней ветвей петли гистерезиса. Изучено образование петли гистерезиса на участках активного и пассивного деформирования углепластика. Показаны этапы развития незамкнутой петли гистерезиса от максимального расширения через стабилизацию до тенденции соединения ветвей и сужения петли. Определена точка максимального угла между верхней и нижней ветвями петли – вершина петли гистерезиса при максимальной деформации. Установлена область деформирования, в которой ветви петли параллельны. Определены уравнения нелинейного поведения модулей $E_x(\epsilon)$ на участках увеличения и уменьшения деформации. Получена зависимость рассеяния механической энергии на единицу объема от деформации.

Ключевые слова: слоистый квазиизотропный углепластик, цикл одноосного растяжения, нелинейность зависимости “напряжение – деформация”, аппроксимирующие уравнения, образование петли гистерезиса, изменение модуля, рассеяние механической энергии.

ВВЕДЕНИЕ

Нелинейность зависимости “деформация – напряжение” при механическом растяжении слоистых углепластиков с однонаправленной, квазиизотропной и другими видами укладок является характерной особенностью этого подкласса композиционных материалов [1-7]. Зачастую нелинейность слабо выражена и почти не заметна на диаграммах деформирования [8]. Поэтому полагают, что материал подчиняется закону Гука, устанавливающего прямую пропорциональность между напряжениями и деформациями с коэффициентом пропорциональности E (модуль упругости, физическая константа материала). В случае одноосного растяжения определяются также такие характеристики материала, как статический предел прочности, максимальная деформация при разрушении, коэффициент Пуассона [9]. Реальное пребывание материала в поле приложенных усилий неизбежно вносит изменения в его структуру, и эти изменения позволяют судить о деградации его свойств [10, 11]. Свойства материала в начале нагружения и, например, перед разрушением различны. Циклические переменные нагрузки способствуют увеличению скорости деградации свойств материала, что приводит к разрушению конструкции, силовые элементы ко-

торой находятся при напряжениях, величина которых меньше статического предела прочности. Верхняя и нижняя ветви петли гистерезиса в цикле повторно статического нагружения слоистого углепластика не являются исключением. Увеличение деформации $\epsilon \uparrow$ на верхней ветви петли гистерезиса назовем активным деформированием, уменьшение деформации $\epsilon \downarrow$ на нижней ветви – пассивным [12]. Принимая одинаковой линейную зависимость между напряжениями и деформациями на участках активного $\epsilon \uparrow$ и пассивного $\epsilon \downarrow$ деформирования, невозможно рассчитать рассеяние механической энергии за цикл квазистатического растяжения. А именно по динамике рассеяния механической энергии в циклах нагружения принято судить об уровне накопленных повреждений материала, зачастую сопоставляя его с накопленным уровнем параллельно измеряемой физической величины, например, количеством импульсов акустической эмиссии [13-15].

В работе ставится задача математически описать нелинейные экспериментальные зависимости “деформация – напряжение” при растяжении слоистых углепластиков с квазиизотропной укладкой на участках активного $\epsilon \uparrow$ и пассивного $\epsilon \downarrow$ деформирования в одном из циклов повторно статического нагружения, после чего использовать полученные уравнения для определения характеристик незамкнутой петли гистерезиса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

Образец вырезан из слоистого квазиизотропного углепластика с укладкой $[0^\circ/0/\pm 45^\circ_2/0_2/90^\circ/0_2/\pm 45^\circ_2/0]_s$, вдоль направления 0° . Размеры рабочей зоны: длина 140 мм, поперечное сечение $50 \times 6,03$ мм². Диаметр центрального отверстия 14 мм. Образец растягивался с постоянной по модулю скоростью перемещения активного захвата $V_s = 4,4$ мкм/сек. Измерялись номинальное напряжение σ (далее по тексту “напряжение”) в поперечном сечении образца $50 \times 6,03$ мм² и средняя деформация ϵ (далее по тексту “деформация”) на базе 20 мм экстензометра, установленного на боковой плоскости образца симметрично центральному отверстию. Испытательное оборудование: электросервогидравлическая машина INOVA ИК-6033, доукомплектованная системой сбора экспериментальной информации фирмы National Instruments США.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные точки (ϵ_i , σ_i) на верхней и нижней ветвях петли гистерезиса представлены на “рис. 1”.

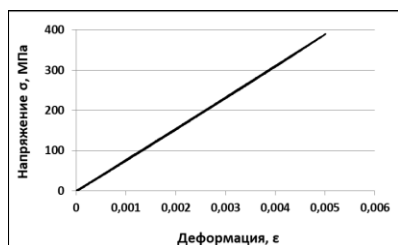


Рис. 1. Диаграмма деформирования образца, незамкнутая петля гистерезиса

Нагружение проводилось по траектории ($\epsilon = 0, \sigma = 0$ МПа) \rightarrow ($\epsilon = 0,005014, \sigma = 389,93$ МПа) \rightarrow ($\epsilon = 0,000031, \sigma = 0,23$ МПа). Количество точек измерения на верхней ветви петли гистерезиса 488, на нижней ветви 477. Каждый из двух выделенных массивов экспериментальных точек обрабатывался отдельно.

Подбор аппроксимирующего уравнения верхней $\epsilon \uparrow$ ветви петли гистерезиса осуществлялся следующим образом:

1. методом наименьших квадратов определялось аппроксимирующее уравнение прямой линии

$$\sigma = 77856 \times \epsilon - 0,85194 \quad (1)$$

2. по оси ординат определялись отклонения экспериментальных точек от прямой линии (1), осциллирующая кривая на “рис. 2”.

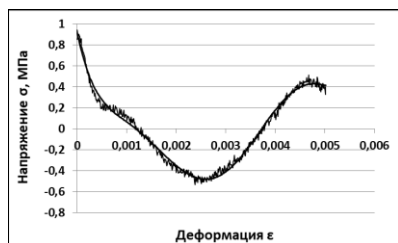


Рис. 2. Отклонения экспериментальных (осциллирующая кривая) и расчетных (гладкая кривая) точек от прямой линии (1) на участке $\epsilon \uparrow$

3. методом наименьших квадратов подбиралось аппроксимирующее уравнение кривой линии

$$\begin{aligned} \sigma = & 6,8716 \times 10^{15} \times \epsilon^6 + 1,1705 \times 10^{14} \times \epsilon^5 \\ & + 7,3994 \times 10^{11} \times \epsilon^4 - 2,1479 \times 10^9 \times \epsilon^3 \\ & + 3,0339 \times 10^6 \times \epsilon^2 + 7,5468 \times 10^4 \times \epsilon \\ & + 0,086914 \end{aligned} \quad (2)$$

4. по оси ординат определялись отклонения точек, рассчитанных по уравнению (2), от прямой линии (1), гладкая кривая “рис. 2”. При наложении осциллирующей и гладкой кривых аппроксимирующее уравнение кривой линии (2) принималось уравнением верхней ветви петли гистерезиса.

Подбор аппроксимирующего уравнения нижней $\epsilon \downarrow$ ветви петли гистерезиса производился аналогичным образом:

аппроксимирующее уравнение прямой линии

$$\sigma = 78011 \times \epsilon - 3,8542, \quad (3)$$

аппроксимирующее уравнение кривой линии

$$\begin{aligned} \sigma = & 1,1955 \times 10^{15} \times \epsilon^6 - 1,3454 \times 10^{13} \times \epsilon^5 \\ & + 7,6562 \times 10^{10} \times \epsilon^4 - 2,7889 \times 10^8 \times \epsilon^3 \\ & + 9,1939 \times 10^5 \times \epsilon^2 + 7,5628 \times 10^4 \times \epsilon \\ & - 2,0844. \end{aligned} \quad (4)$$

При наложении осциллирующей и гладкой кривых на

“рис. 3” аппроксимирующее уравнение кривой линии (4) принималось уравнением нижней ветви петли гистерезиса.

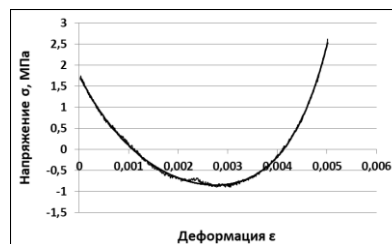


Рис. 3. Отклонения экспериментальных (осциллирующая кривая) и расчетных (гладкая кривая) точек от прямой линии (3) на участке $\epsilon \downarrow$

Следует отметить, что подбор аппроксимирующего уравнения по экспериментальным точкам “линейной диаграммы деформирования” без контроля отклонения точек от аппроксимирующей прямой линии может привести к неприемлемому результату.

Далее работа с массивами точек на участках активного $\epsilon \uparrow$ и пассивного $\epsilon \downarrow$ деформирования образца замещается математическими манипуляциями с двумя уравнениями ветвей петли гистерезиса: для верхней ветви – уравнение (2), для нижней ветви – уравнение (4).

Уравнения верхней ветви (2) и нижней ветви (4) удобно разделить на линейные (прямые (1) и (3) соответственно) и нелинейные (уравнения не приводятся) составляющие для определения их индивидуального вклада в поведение материала. Такой подход позволит оценить влияние нелинейных составляющих и ответить на вопрос, допустимо ли представлять композиционные углепластиковые материалы подчиняющимися закону Гука.

Для полноты последующего изложения незначительно увеличим область изменения нижней ветви (4) влево до значения $\epsilon = 0$ и определим остаточную деформацию $\epsilon^* = 0,000028$ при $\sigma \approx 0$ МПа и остаточное напряжение $\sigma^* = -2,08$ МПа при $\epsilon = 0$. Будем рассматривать нагружение по траектории ($\epsilon = 0, \sigma = 0$ МПа) \rightarrow ($\epsilon = 0,005014, \sigma = 389,93$ МПа) \rightarrow ($\epsilon = 0, \sigma = -2,08$ МПа).

Ответ на вопрос, при какой деформации ϵ происходит наиболее интенсивное расширение петли гистерезиса, дает кривая на “рис. 4”, полученная вычитанием из значений верхней ветви (2) значений нижней ветви (4). Разница определяет расстояние по оси ординат между ветвями петли гистерезиса.

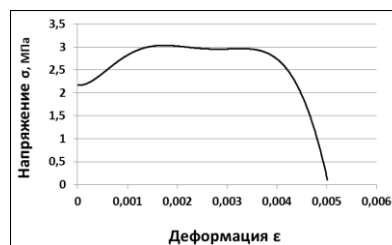


Рис. 4. Расстояние по оси ординат между ветвями петли гистерезиса

Положительные значения кривой “рис. 4” свидетельствуют о том, что ветвь петли на участке $\epsilon \uparrow$, описываемая уравнением (2), расположена выше ветви петли на участке $\epsilon \downarrow$, описываемой уравнением (4), и они не пересекаются. В области высоких значений ϵ нижняя ветвь петли гистерезиса

зиса с максимальной скоростью удаляется от ее верхней ветви, петля расширяется. В области средних значений ϵ нижняя и верхняя ветви почти параллельны, петля стабилизируется. В области низких значений ϵ нижняя ветвь приближается к верхней ветви, петля сужается.

Расстояния по оси ординат между линейными и нелинейными составляющими верхней и нижней ветвей петли гистерезиса приведены на “рис. 5” и “рис. 6” соответственно. Положительные значения прямой “рис. 5” свидетельствуют о том, что линейная составляющая верхней ветви (2) расположена выше линейной составляющей нижней ветви (4), и они не пересекаются. Две точки пересечения кривой на “рис. 6” с осью абсцисс указывают на точки пересечения между собой нелинейных составляющих ветвей петли гистерезиса. В области средних значений ϵ “рис. 6” нелинейная составляющая верхней ветви больше нелинейной составляющей нижней ветви, в области высоких и низких значений ϵ – меньше. Сложение прямой на “рис. 5” и кривой на “рис. 6” дает кривую на “рис. 4”.

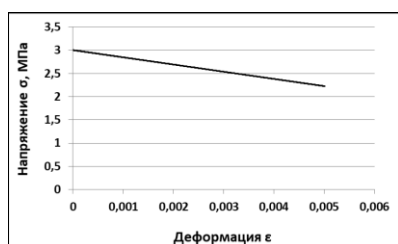


Рис. 5. Расстояние по оси ординат между линейными (1) и (3) составляющими ветвей петли гистерезиса

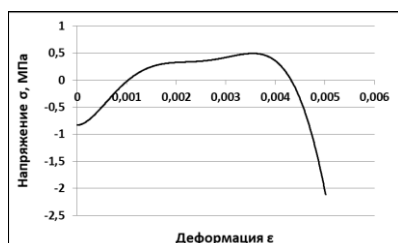


Рис. 6. Расстояние по оси ординат между нелинейными составляющими ветвей петли гистерезиса

Из нелинейности ветвей (2) и (4) петли гистерезиса следует изменяемость модуля ($E_x(\epsilon)$ $\epsilon \uparrow$) верхней ветви с увеличением деформации $\epsilon \uparrow$ и модуля ($E_x(\epsilon)$ $\epsilon \downarrow$) нижней ветви с уменьшением деформации $\epsilon \downarrow$. Чтобы получить модуль ($E_x(\epsilon)$ $\epsilon \uparrow$) верхней ветви и модуль ($E_x(\epsilon)$ $\epsilon \downarrow$) нижней ветви достаточно продифференцировать уравнения (2) и (4). На “рис. 7” приведена кривая ($E_x(\epsilon)$ $\epsilon \uparrow - E_x(\epsilon)$ $\epsilon \downarrow$) изменения тангенса угла наклона графика кривой на “рис. 4” к положительному направлению оси абсцисс. В вершине петли гистерезиса ($\epsilon = 0,005014$) угол между верхней и нижней ветвями петли максимален, нижняя ветвь расположена круче к положительному направлению оси абсцисс, чем верхняя. С уменьшением ϵ угол между ветвями постепенно уменьшается до нулевого значения, ветви остаются параллельными. При дальнейшем уменьшении ϵ незначительное увеличение угла между ветвями сменяется его уменьшением до нуля. Вследствие того, что в этой области верхняя ветвь расположена круче к положительному направлению оси абсцисс, чем нижняя, нижняя ветвь приближается к верхней ветви.

На “рис. 8” и “рис. 9” приведены первые производные разности линейных и нелинейных составляющих уравнений ветвей (2) и (4), представленных на “рис. 5” и “рис. 6” соответственно. Сложение прямой на “рис. 8” и кривой на “рис. 9” дает кривую на “рис. 7”.

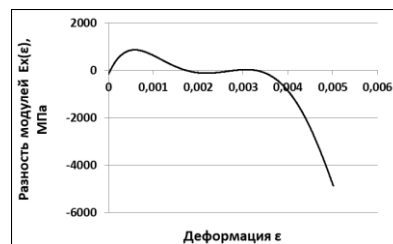


Рис. 7. Расстояние по оси ординат между модулями $E_x(\epsilon)$ верхней и нижней ветвей петли гистерезиса

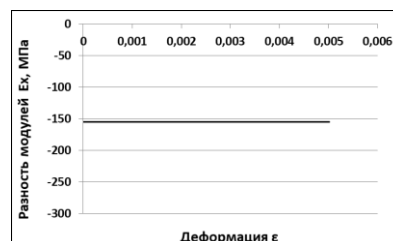


Рис. 8. Расстояние по оси ординат между модулями E_x линейных (1) и (3) составляющих ветвей петли гистерезиса

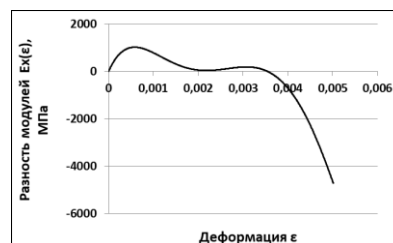


Рис. 9. Расстояние по оси ординат между модулями $E_x(\epsilon)$ нелинейных составляющих ветвей петли гистерезиса

Рассеяние механической энергии на единицу объема материала в зависимости от деформации ϵ возможно определить на участке пассивного деформирования $\epsilon \downarrow$ по мере уменьшения деформации от ее максимального значения $\epsilon = 0,005014$ до минимального $\epsilon = 0$. Минимальное значение рассеяния, равное нулю, получим в начале участка пассивного деформирования $\epsilon \downarrow$ при $\epsilon = 0,005014$. Максимальное значение рассеяния получим при завершении участка пассивного деформирования $\epsilon \downarrow$ и возвращении в исходную точку $\epsilon = 0$. Рассеяние механической энергии на пути деформирования ($\epsilon = 0$) \rightarrow ($\epsilon = 0,005014$) \rightarrow ($\epsilon = 0$) “рис. 10” вычисляется по разнице работы полных напряжений верхней ветви (2) на пути ($\epsilon = 0$) \rightarrow ($\epsilon = 0,005014$) и работы полных напряжений нижней ветви (4) на пути ($\epsilon = 0,005014$) \rightarrow ($\epsilon = 0$).

Рассеяния механической энергии при работе линейных и нелинейных составляющих ветвей (2) и (4) вычисляются аналогично “рис. 11” и “рис. 12”. Сложение кривых на “рис. 11” и “рис. 12” дает кривую на “рис. 10”.

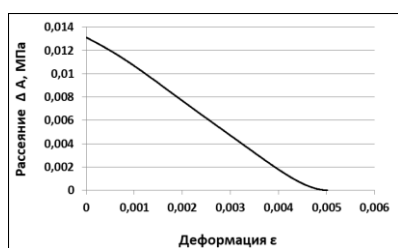


Рис. 10. Рассеяние механической энергии за цикл нагружения, работа полных напряжений ветвей петли гистерезиса

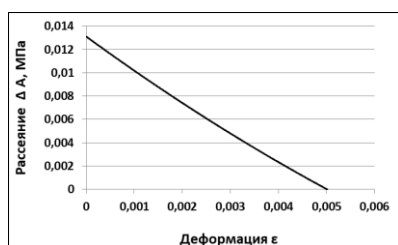


Рис. 11. Рассеяние механической энергии за цикл нагружения, работа линейных составляющих ветвей петли гистерезиса

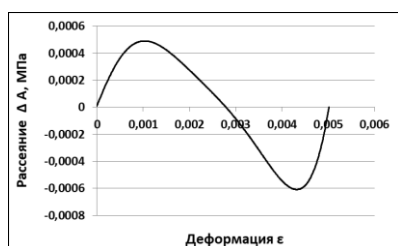


Рис. 12. Рассеяние механической энергии за цикл нагружения, работа нелинейных составляющих ветвей петли гистерезиса

Следует отметить, что рассеяние по разнице работ нелинейных составляющих ветвей (2) и (4) при возвращении в исходную точку $\epsilon = 0$ равно нулю “рис. 12”. Поэтому полное рассеяние механической энергии на единицу объема материала при возвращении в исходную точку $\epsilon = 0$ можно рассчитывать как по разнице работ полных напряжений ветвей (2) и (4), так и по разнице работ линейных составляющих ветвей (2) и (4) “рис. 11”.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

Краткое изложение содержания и основные результаты статьи приведены в аннотации.

Нелинейное поведение углепластиков при механическом нагружении является характерной особенностью этого подкласса композиционных материалов. Упрощенное представление зависимости “деформация – напряжение” в виде прямой пропорциональности с коэффициентом пропорциональности E (модуль упругости) наделяет материал исключительно линейно-упругими свойствами, тем самым запрещая материалу изменять свои свойства, накапливать повреждения и разрушаться. Это своего рода запрет на эволюцию свойств материала в условиях эксплуатации, для которых он и создавался.

В качестве рекомендаций по использованию полученных результатов следует предложить распространение

предложенного подхода на циклические области нагружения конструкционных углепластиков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лагас П.А. Нелинейный характер зависимости “напряжение – деформация” для слоистых графитоэпоксидных пластиков // *Аэрокосмическая техника*. – 1986. – №4. – С. 102-111.

2. Северов П.Б. Неупругое деформирование и разрушение слоистых углепластиков при механическом нагружении как эволюционный процесс накопления повреждений / П.Б. Северов, Ю.Г. Матвиенко, В.И. Иванов, А.В. Панков // XI Все-рос. съезд по фундам. пробл. теорет. и прикл. механики. Сборник трудов. – Казань, 2015. – С. 3385-3388.

3. Зиновьев П.А. Экспериментальное исследование деформативных и прочностных особенностей деформирования и разрушения слоистого углепластика / П.А. Зиновьев, Е.М. Песощников, Б.Г. Попов // *Механика композитных материалов*. – 1980. – № 2. – С. 241-245.

4. Полилов А.Н. Учет предразрушения около отверстий в волокнистых композитах // *Машиноведение*. – 1982. – №4. – С. 110-115.

5. Вильдеман В.Э. Экспериментальные исследования неупругого деформирования и разрушения конструкционных материалов при сложных и комплексных воздействиях // XII Всерос. съезд по фундам. пробл. теорет. и прикл. механики. Сборник трудов. – Уфа, 2019. – С. 587-589.

6. Лобанов Д.С. Влияние температурного старения на остаточную прочность конструкционных композитов // XII Всерос. съезд по фундам. пробл. теорет. и прикл. механики. Сборник трудов. – Уфа, 2019. – С. 1219-1220.

7. Староверов О.А. Деформирование и разрушение полимерных композитов в условиях комплексных механических воздействий / О.А. Староверов, В.Э. Вильдеман // XII Всерос. съезд по фундам. пробл. теорет. и прикл. механики: Сборник трудов. – Уфа, 2019. – С. 1130-1132.

8. Северов П.Б. Оценка механического состояния слоистых углепластиков по акустико-эмиссионному отображению процессов неупругого деформирования и разрушения // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. – 2016. – №4. – С. 85-92.

9. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 744 с.

10. Макаров П.В. Модель разрушения хрупких и квазихрупких материалов и геосред / П.В. Макаров, М.О. Еремин // *Физическая мезомеханика*. – 2013. – Т. 16, №1. – С. 5-26.

11. Панин В.Е. Основы физической мезомеханики пластической деформации и разрушения твердых тел как нелинейных иерархически организованных систем / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин // *Физическая мезомеханика*. – 2015. – Т. 18, №5. – С. 100-113.

12. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1974. – 560 с.

13. Березин А.В. Акустическая эмиссия и прочность слоистых углепластиков при нагружении / А.В. Березин, А.И. Козинкина // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. – 1997. – №3. – С. 111-119.

14. Северов П.Б. Деформирование и разрушение однонаправленных слоистых углепластиков по данным акустической эмиссии // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Сборник трудов. (Уфа, 19-24 августа 2019 г.). – Уфа, 2019. – С. 776-778.

15. Зубова Е.М. Экспериментальное исследование эволюции накопления повреждений в композитах на начальной стадии деформирования с применением метода акустической эмиссии / Е.М. Зубова, В.Э. Вильдеман // XII Всерос. съезд по фундам. пробл. теорет. и прикл. механики. Сборник трудов. – Уфа, 2019. – С. 645-646.

Mechanical Behavior of Active and Passive Strain Sections in CFRP Laminate under Uniaxial Tension

Severov P.B.

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences

Moscow, Russia

alpinprom@yandex.ru

Abstract. This study investigates the nonlinear behavior of quasi-isotropic CFRP laminate under uniaxial tension. To verify the convergence of the calculated and experimental deviations, the approximating nonlinear equations describing the upper and lower hysteresis loop branches were found. The formation of a hysteresis loop in the active and passive strain sections in CFRP laminate has been studied. The open hysteresis loop development stages are shown from maximum expansion to stabilization, and to the tendency of branches to connect and narrow the loop. The point of the maximum angle between the upper and lower branches of the loop is determined – the

apex of the hysteresis loop at maximum deformation. The strain region is found, in which the branches of the loop are parallel. The equations are determined, describing the nonlinear behavior of modules of $E_x(\varepsilon)$ in the sections of increasing and decreasing strain. The dependence between mechanical energy dissipation per unit volume and strain was obtained.

Keywords: quasi-isotropic CFRP laminate, uniaxial tension cycle, nonlinear “stress-strain” dependence, approximating equations, hysteresis loop formation, modulus change, mechanical energy dissipation.

Исследование процессов вспенивания силикатного сырья при использовании смеси порообразователей

Гольцман Б.М., Яценко Л.А., Гольцман Н.С.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова
Новочеркасск, Россия
boriuspost@gmail.com

Аннотация. Склонность силикатных масс к вспениванию позволяет использовать широкий спектр различных природных и техногенных материалов в качестве сырья для вспененных теплоизоляционных силикатных материалов. Показана перспективность изучения возможности интенсификации вспенивания природного силикатного сырья путем введения дополнительного порообразователя (глицерина). Синтез вспененных силикатных материалов осуществлялся по порошковой технологии с использованием гидратного вспенивания, основанном на взаимодействии оксида кремния с раствором щелочи. Установлено, что введение глицерина существенно снижает плотность получаемого материала, что объясняется формированием дополнительного объема вспенивающих газов, которые обеспечивают более интенсивное вспенивание силикатной массы при ее нагревании. Показано изменение цвета образцов при введении глицерина, обусловленное образованием нанодисперсной углеродной сажи в условиях недостатка кислорода во внутренних слоях образца. Изучены физико-химические процессы, происходящие при термообработке (до 1000 °С) исследуемых составов, с применением метода дифференциального термического анализа. Показана непрерывность процесс потери массы для обоих составов. Выделены следующие стадии потери массы образцов: 50–100 °С – удаление физической воды; 100–200 °С – удаление гидратационной воды; 400–450 °С – разложение глицерина; 400–700 °С – удаление химически связанной воды из диатомита; свыше 700 °С – разложение углеродных остатков. Выявлены термические эффекты, общие для всех образцов: 50–200 °С – эндотермический пик удаления адсорбционной воды при 70–80 °С и гидратационной воды при 110–150 °С; 574 °С – эндотермический пик полиморфного превращения β -кварца в α -кварц. В составе с глицерином при 407,4 °С присутствует экзотермический пик разложения глицерина. Работа выполнена при поддержке РФФИ (Соглашения № 19-79-00015).

Ключевые слова: пеностекло, гидратное вспенивание, порообразователь, силикатное сырье, диатомит, пористая структура.

ВВЕДЕНИЕ

Склонность силикатных масс к вспениванию позволяет использовать широкий спектр различных природных и техногенных материалов в качестве сырья для вспененных теплоизоляционных силикатных материалов. Наиболее распространенным видом материала, применяемым в качестве как основного [1–7], так и дополнительного сырья [8–9], является стекло. Следующей группой материалов,

используемых как сырье для синтеза пеностекла, являются различные промышленные отходы. Наиболее популярным среди них является отход сжигания угля на тепловых электростанциях [8–11]. В то же время весьма малое внимание уделяется синтезу вспененных материалов на основе различных природных материалов. Это может быть объяснено тем, что, во-первых, наличие требуемых запасов природного сырья различно для разных регионов, и, во-вторых, переработка промышленных отходов является более перспективным направлением исследований. Однако изучение особенностей вспенивания природного сырья является весьма актуальной задачей для регионов с большими запасами таких материалов [12–16].

Полученные ранее результаты [16] показали возможность получения пористых силикатных материалов на основе широкого спектра силикатного сырья при использовании гидратной технологии вспенивания. Наиболее низкой плотности (≈ 310 кг/м³) удалось добиться только для одного вида сырья – диатомита. Однако современные требования к теплоизоляционным материалам регламентируют показатель плотности ниже 300 кг/м³. В связи с этим актуальным является исследование возможности интенсификации процесса вспенивания за счет введения дополнительного порообразователя. В качестве порообразователя в данной работе был выбран глицерин, показавший высокую эффективность в технологии пеностекла [10]. Таким образом, целью данного исследования является изучение возможности интенсификации вспенивания силикатных материалов путем введения дополнительного порообразователя (глицерина).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Синтез вспененных силикатных материалов осуществлялся по порошковой технологии с использованием гидратного вспенивания [17–21]. Исходное сырье (диатомит с химическим составом, мас. %: SiO₂ – 76,2; Al₂O₃ – 6,8; Fe₂O₃ – 3,5; CaO – 1,0; MgO – 0,9; П.П.П. – 11,6) сушили при 120 °С и измельчали до размера частиц менее 160 мкм. Гидроксид натрия добавляли к силикатному сырью в виде раствора. Для растворения NaOH, интенсификации его взаимодействия с силикатным сырьем и гомогенизации продуктов реакции в смесь вводили воду в количестве 15 мас. % (сверх 100).

Подготовленные компоненты (силикатное сырье, раствор NaOH, глицерин) перемешивали в течение 30 минут

в барабанной мельнице и затем выдерживали при температуре 50 °С в течение 2 часов. Далее из полученной смеси формовали образцы в виде кубов с длиной грани 20 мм. Полученные образцы загружали в электрическую муфельную печь и нагревали до 800 °С для вспенивания по температурно-временному режиму, описанному в [22]. После охлаждения воздуха внутри печи до комнатной температуры образцы извлекали из печи и подвергали механической обработке (опиловке) для получения правильной формы. Затем были определены масса и объем образцов и рассчитана плотность d (кг/м³) в соответствии с формулой (1).

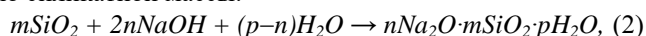
$$d = m / (a \cdot b \cdot c) \cdot 1000, \quad (1)$$

где m – масса образца, г; a – длина образца, см, b – ширина образца, см, c – высота образца, см.

Изучение процессов, происходящих при термообработке сырьевой смеси, проводилось методом дифференциального термического анализа на приборе STA 449 Jupiter. Температурный режим 25–1000 °С; скорость нагрева (10 К⁻¹), среда: воздушная, тип тигля: платиновый с крышкой.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследования вспенивающей активности смесей с дополнительным порообразователем было разработано два состава, мас %: Состав 1 – диатомит – 80; NaOH (сухой) – 20; Состав 2 – диатомит – 80; NaOH (сухой) – 20; глицерин – 5 (сверх 100). Вспенивание с применением раствора щелочи в качестве порообразователя протекает по гидратному механизму. Его суть которой заключается во взаимодействии оксида кремния с раствором щелочи, что приводит к образованию щелочных гидросиликатов по реакции (2) [23]. При нагревании происходит выделение паров воды из гидросиликатов, что ведет к вспениванию силикатной массы.



Была проведена термическая обработка образцов разработанных составов при температурах вспенивания 750, 775, 800 °С. Внутренняя структура синтезированных образцов и их плотность представлено на рис. 1.

Из полученных результатов видно, что введение глицерина существенно снижает плотность получаемого материала. Например, при температуре 800 °С плотность образца без добавки глицерина составляет 476 кг/м³, а при его введении плотность снижается до 269 кг/м³. Также важно отметить, что плотность образцов без глицерина при 825 °С снижается до 313 кг/м³, а при дальнейшем нагреве до 850 °С возрастает до 381 кг/м³. Это объясняется изменением вязкости силикатной массы. Ее вспенивание происходит по достижении вязкости 10⁶ Па·с. Дальнейший нагрев сначала интенсифицирует вспенивание, а затем пена начинает оседать под собственным весом. Температурный диапазон этого процесса зависит от состава массы. В данном случае, он весьма узок (менее 25 °С), что существенно усложняет технологические операции производства. Введение дополнительного порообразователя ведет к формированию дополнительного объема вспенивающих газов, которые обеспечивают более интенсивное вспенивание вязкой силикатной массы.

Кроме того, введение глицерина привело к изменению структуры: цвет образцов стал более серым, и в структуре материала появились области темного цвета. Все эти изменения можно объяснить процессами взаимодействия глицерина с силикатным каркасом при термической обработке. При термической обработке глицерин окисляется кислородом воздуха до CO₂ и H₂O. В условиях недостатка кислорода (например, во внутренних слоях образца) глицерин частично пиролизуется с образованием нанодисперсной углеродной сажи, частично взаимодействующей с силикатным каркасом по схеме (3) [24]:

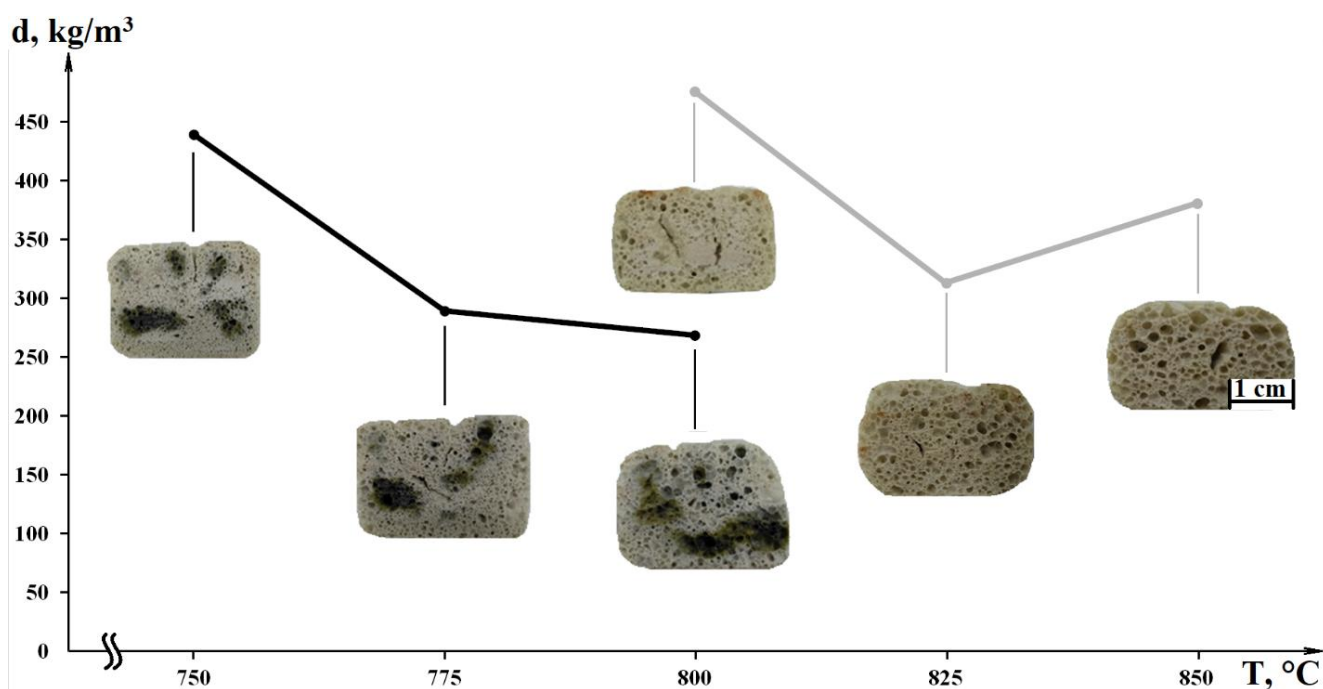
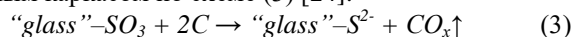


Рис. 1. Динамика вспенивания образцов в зависимости от состава порообразователя

Для сохранения глицерина от преждевременного выгорания в промышленности пеностекла используются добавки на основе силиката натрия (жидкого стекла) [25]. Однако в данном исследовании его введение нецелесообразно, т.к. при взаимодействии силикатного сырья с раствором щелочи формируются щелочные гидросиликаты сходного состава. Вследствие этого глицерин интенсифицирует процесс порообразования за счет формирования дополнительного объема газов, а остаточный углерод, не

вступивший во взаимодействие с силикатной массой, оседает на стенках пор, меняя цвет образца на более серый и формируя темные области внутри материала.

Физико-химические процессы, происходящие при термообработке (до 1000 °С) исследуемых составов, оценивали методом дифференциального термического анализа (дифференциальной сканирующей калориметрии) (рис. 2–3).

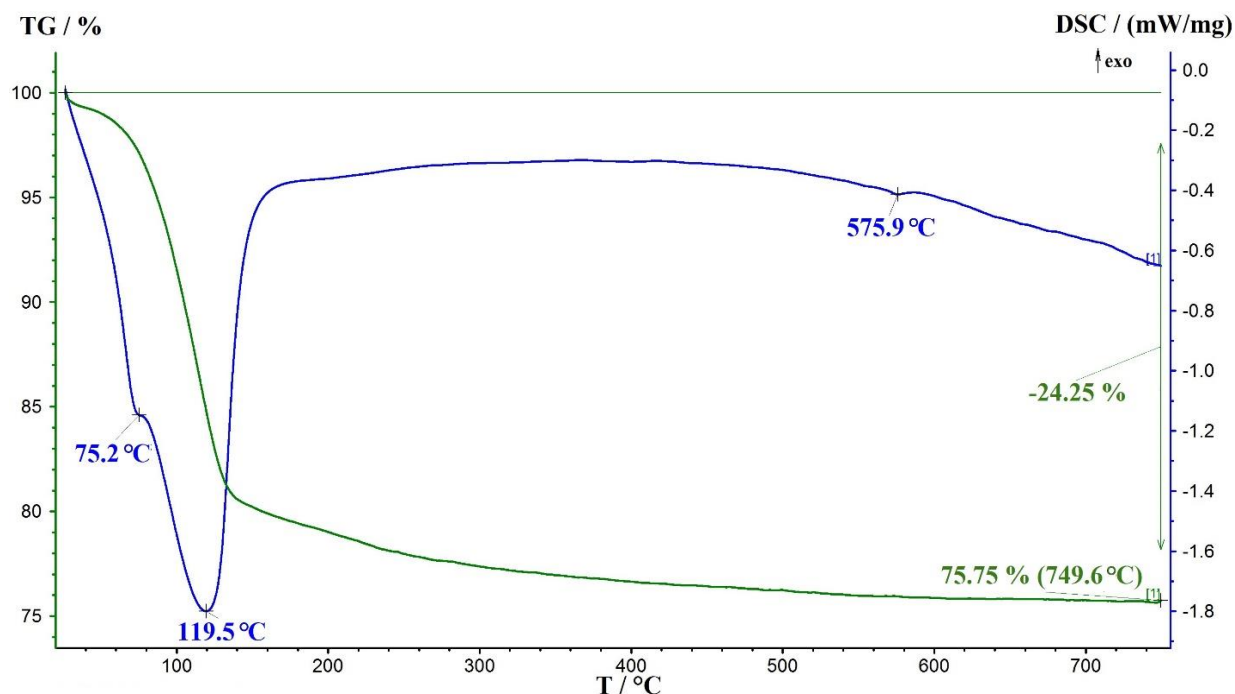


Рис. 2 Результаты ДСК-анализа Состава 1

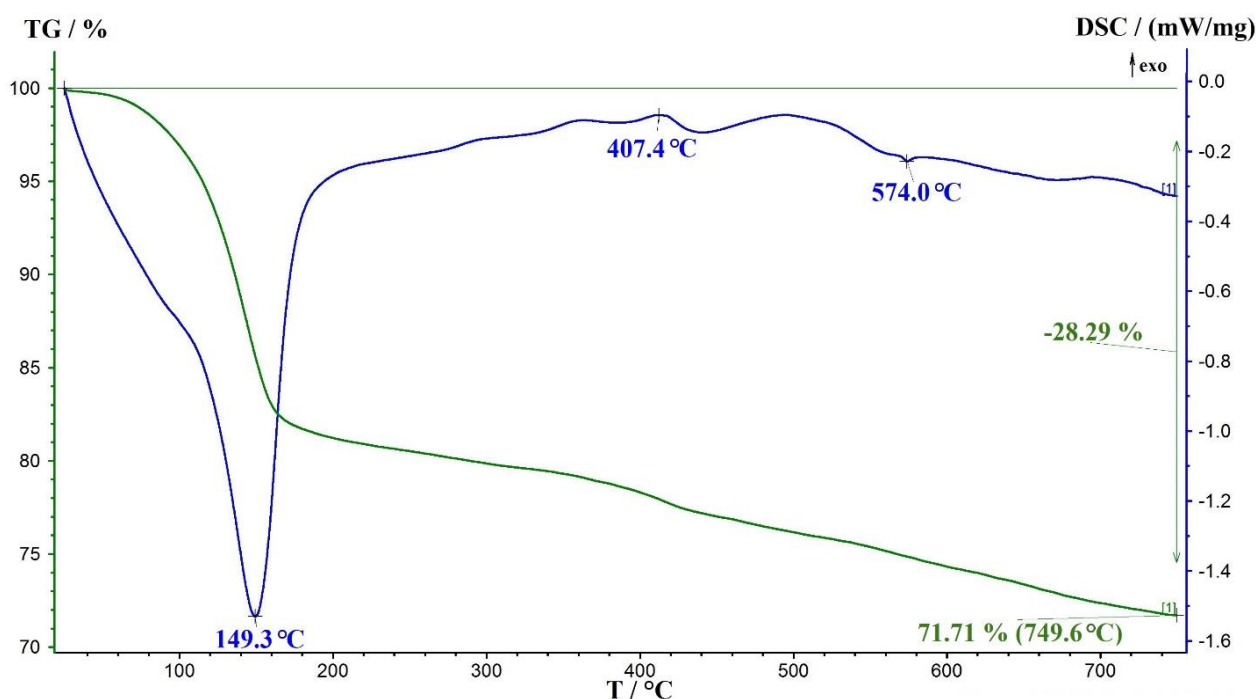


Рис. 3. Результаты ДСК-анализа Состава 2

Сравнение ТГ-кривых показывает, что процесс потери массы для обоих составов является непрерывным. Потеря массы в Составе 1 во время нагрева обусловлена удалением воды, сначала адсорбционной, а затем гидратационной (введенной при насыщении смеси щелочным раствором). За счет этого общая потеря массы составляет 24,25 мас. % с наиболее ускоренной потерей массы в диапазоне 100–200 °С, то есть в диапазоне удаления химически связанной воды во время дегидратации гидратированных щелочных силикатов.

Сравнение ДСК-кривых позволяет выбрать процессы, общие для всех образцов. В диапазоне температур 50–200 °С наблюдается большой эндотермический пик, связанный с удалением воды: при температуре 70–80 °С – адсорбционной; при 110–150 °С – гидратационной. При температуре ≈ 574 °С наблюдается небольшой эндотермический пик, который связан с полиморфным превращением β-кварца в α-кварц [25]. Дальнейшее плавное снижение кривой объясняется процессами твердофазового спекания и плавления составов. В Составе 2 также присутствует экзотермический пик при температуре 407,4 °С, отвечающий разложению глицерина.

Сложность кривых ДСК для всех образцов обусловлена наличием ряда жидкофазных компонентов (вода, глицерин, гидросиликаты), что вызывает значительную потерю массы и дополнительные экзо- и эндо-эффекты во время термической обработки. При этом появляется эффект частичного поглощения, когда высокий пик частично поглощает соседние и снижает их интенсивность на кривой. Это объясняет, в частности, отсутствие выделенных эффектов разложения органических примесей при 300–500 °С, поглощенных эффектом разложения глицерина (≈400 °С) [26–27].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

Склонность силикатных масс к вспениванию позволяет использовать широкий спектр различных природных и техногенных материалов в качестве сырья для вспененных теплоизоляционных силикатных материалов. Показана перспективность изучения возможности интенсификации вспенивания природного силикатного сырья путем введения дополнительного порообразователя (глицерина). Синтез вспененных силикатных материалов осуществлялся по порошковой технологии с использованием гидратного вспенивания, основанном на взаимодействии оксида кремния с раствором щелочи. Установлено, что введение глицерина существенно снижает плотность получаемого материала. Например, при температуре 800 °С плотность образца без добавки глицерина составляет 476 кг/м³, а при его введении плотность снижается до 269 кг/м³. Это объясняется тем, что введение дополнительного порообразователя ведет к формированию дополнительного объема вспенивающих газов, которые обеспечивают более интенсивное вспенивание вязкой силикатной массы. Также введение глицерина ведет к изменению цвета образцов и появлению областей темного цвета. Это объясняется процессами взаимодействия глицерина с силикатным каркасом при термической обработке, в результате которых глицерин частично пиролизуется с образованием нанодисперсной углеродной сажи в условиях недостатка кислорода.

С применением ДСК-анализа описаны различия в физико-химических процессах, протекающих при термической обработке. Общими процессами являются: 50–100 °С – удаление физической воды; 100–200 °С – удаление гидратационной воды; 400–700 °С – удаление химически связанной воды из диатомита; 574 °С – полиморфное превращение β-кварца в α-кварц. При введении глицерина появляются дополнительные эффекты: 400–450 °С – разложение глицерина; свыше 700 °С – разложение углеродных остатков. Таким образом, введение глицерина в качестве дополнительного порообразователя при гидратном вспенивании шихт на основе природного сырья является целесообразным, т.к. позволяет значительно повысить теплоизоляционные характеристики синтезируемых материалов. Полученные результаты могут найти применение в технологии пеностеклянных материалов, поскольку расширяют сырьевую базу и улучшают теплоизоляционные свойства получаемых материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казьмина О.В. Пеностеклокристаллические материалы на основе природного и техногенного сырья. / О.В. Казьмина, В.И. Верещагин, А.Н. Абияка. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2014. – 246 с.
2. Бондаренко Н.И. Технология получения композиционных стеклокристаллических облицовочных материалов на основе смешанного стеклобоя / Н.И. Бондаренко, О.В. Пучка, В.С. Бессмертный, С.А. Чувев, И.А. Изотова, Л.Л. Брагина, Т.А. Яловенко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2020. – № 2. – С. 106-114.
3. König J. Suppressing the effect of cullet composition on the formation and properties of foamed glass / J. König, R.R. Petersen, N. Iversen, Y. Yue // *Ceramics International*. – 2018. – Vol. 44. – P. 11143-11150.
4. Ayadi A. Elaboration and characterization of porous granules based on waste glass / A. Ayadi, N. Stiti, K. Boumchedda et al. // *Powder Technology*. – 2011. – Vol. 208. – P. 423-426.
5. Méar F. Effects of temperature, reaction time and reducing agent content on the synthesis of macroporous foam glasses from waste funnel glasses / F. Méar, P. Yot, M. Ribes // *Materials Letters*. – 2006. – Vol. 60. – P. 929-934.
6. Llaudis A.S. Foaming of flat glass cullet using Si₃N₄ and MnO₂ powders / A.S. Llaudis, M. Tari, F. Garcia Ten et al. // *Ceramics International*. – 2009. – Vol. 35. – P. 1953-1959.
7. Fernandes H.R. Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents / H.R. Fernandes, D.U. Tulyaganov, J.M. Ferreira // *Ceramics International*. – 2009. – Vol. 35. – P. 229-235.
8. Bai J. Preparation of foam glass from waste glass and fly ash / J. Bai, X. Yang, S. Xu et al. // *Materials Letters*. – 2014. – Vol. 136. – P. 52-54.
9. Яценко Е.А. Исследование макро- и микроструктуры пеностекол на основе шлаковых отходов ТЭС / Е.А. Яценко, В.А. Смолий, Б.М. Гольцман, А.С. Косарев // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2012. – № 6 (169). – С. 127-130.
10. Yatsenko E.A. Investigation of the influence of foaming agents' type and ratio on the foaming and reactionary ability

- ties of foamed slag glass / E.A. Yatsenko, B.M. Goltsman, V.A. Smoliy, A.S. Kosarev, R.V. Bezuglov // *Biosciences Biotechnology Research Asia*. – 2015. – Vol. 12, is. 1. – P. 625-632.
11. Li J. Utilization of coal fly ash from a Chinese power plant for manufacturing highly insulating foam glass: Implications of physical, mechanical properties and environmental features / J. Li, X. Zhuang, E. Monfort et al. // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol. 175. – P. 64-76.
12. Reka A.A. New optimized method for low-temperature hydrothermal production of porous ceramics using diatomaceous earth / A.A. Reka, B. Pavlovski, P. Makreski // *Ceramics International*. – 2017. – Vol. 43. – P. 12572-12578.
13. Kazmina O.V. Using quartzofeldspathic waste to obtain foamed glass material / O.V. Kazmina, A.Y. Tokareva, V.I. Vereshchagin // *Resource-Efficient Technologies*. – 2016. – Vol. 2. – P. 23-29.
14. Архипов В.А. Моделирование процесса получения полых частиц кремнезема в плазменном потоке. Часть 1. Динамика движения и нагрева пористых частиц / В.А. Архипов, С.С. Бондарчук, В.В. Шеховцов, О.Г. Волокитин, А.С. Аньшаков, В.И. Кузьмин // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2019. – Т. 26, № 1. – С. 147-160.
15. Вайсберг Л.А. Основы геометаллургии. / Л.А. Вайсберг, О.В. Кононов, И.Д. Устинов. – СПб.: ООО “Русская коллекция СПб”, 2020. – 376 с.
16. Гольцман Б.М. Пористые теплоизоляционные материалы на основе различных видов силикатного сырья / Б.М. Гольцман, Е.А. Яценко, В.С. Геращенко, Н.Ю. Комунжиева, Л.А. Яценко, В.А. Смолий, Ченг Чиа-Чи // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. – 2020. – № 1 (205). – С. 55-60.
17. Радаев С.С. Применение диатомитов в производстве строительных материалов / С.С. Радаев, К.С. Иванов, О.И. Селезнёва, Н.З. Рясная // *Приволжский научный журнал*. – 2011. – № 2 (18). – С. 48–52.
18. Маневич В.Е. Подготовка пенообразующей смеси для получения пеностекла на основе диатомита / В.Е. Маневич, Е.А. Никифоров, А.В. Мешков, Н.А. Сенник, Р.К. Субботин // *Строительные материалы*. – 2012. – № 7. – С. 100-102.
19. Vaisman Ya.I. Cellular glass obtained from non-powder preforms by foaming with steam / Ya.I. Vaisman, A.A. Ketov, Yu.A. Ketov // *Ceramics International*. – 2016. – Vol. 42. – P. 15261-15268.
20. Жикина Л.А. Влияние термообработки на дегидратацию паст полисиликата натрия / Л.А. Жикина, А.М. Минкин, М.П. Красновских, А.А. Кетов // *Вестник Технологического университета*. – 2020. – Т. 23, № 4. – С. 57-59.
21. Голосова А.С. Влияние вида щелочного активатора на структуру и механические свойства композиций на основе отходов ТЭК / А.С. Голосова, Н.Н. Клименко, Л.М. Делицын // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2019. – Т. 33, № 4 (214). – С. 51-53.
22. Yatsenko E.A. Investigation of the raw materials' composition and ratio influence on the structure and properties of the foamed slag glass / E.A. Yatsenko, B.M. Goltsman, L.A. Yatsenko // *Materials Science Forum*. – 2016. – Vol. 843. – P. 183-188.
23. Аппен А.А. Химия стекла. / А.А. Аппен. – Л.: Химия, 1970. – 351 с.
24. da Silva R.C. Foam glass using sodium hydroxide as foaming agent: Study on the reaction mechanism in soda-lime glass matrix / R.C. da Silva, E.T. Kubaski, E.T. Tenório-Neto et al. // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2019. – Vol. 511. – P. 177-182.
25. Shelby J.E. Introduction to Glass Science and Technology. 2nd ed. / J.E. Shelby. – New-York: Royal Society of Chemistry, 2005. – 292 p.
26. PubChem. Compound summary: Glycerol. – URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Glycerol> (дата обращения 15.01.2021).
27. Yatsenko E.A. Peculiarities of foam glass synthesis from natural silica-containing raw materials / E.A. Yatsenko, B.M. Goltsman, L.V. Klimova, L.A. Yatsenko // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2020. – Vol. 142(1). – P. 119-127.

Study of Foaming Processes of Silicate Raw Materials Using a Mixture of Foaming Agents

Goltsman B.M., Yatsenko L.A., Goltsman N.S.
Platov South-Russian State Politechnic University (NPI)
Novocherkassk, Russia
boriuspost@gmail.com

Abstract. The tendency of silicate masses to foam allows the use of a wide range of different natural and man-made materials as raw materials for foamed thermal insulation silicate materials. The prospects of studying the possibility of intensifying the foaming of natural silicate raw materials by introducing an additional foaming agent (glycerol) are shown. The synthesis of foamed silicate materials was carried out by powder technology using hydrate foaming based on the interaction of silicon oxide with an alkali solution. It was found that the introduction of glycerol significantly reduces the density of the obtained material, which is explained by the formation of an additional volume of foaming gases, which provide more intensive foaming of the silicate mass when heated. The change in the color of the samples during the introduction of glycerol due to the formation of nanodispersed carbon black under conditions of lack of oxygen in the inner layers of the sample is shown. Physicochemical processes occurring during heat treatment (up to 1000 °C) of the studied compositions were studied using the method of differential thermal analysis.

The continuity of the weight loss process for both compositions was shown. The following stages of weight loss of samples are allocated: 50–100 °C – removal of physical water; 100–200 °C – removal of hydration water; 400–450 °C – decomposition of glycerol; 400–700 °C – removal of chemically bound water from diatomite; over 700 °C – decomposition of carbon residues. Thermal effects common to all samples were revealed: 50–200 °C – endothermic peak of removal of adsorption water at 70–80 °C and hydration water at 110–150 °C; 574 °C – the endothermic peak of the polymorphic transformation of β -quartz to α -quartz. In the composition with glycerol there is an exothermic peak of glycerol decomposition at 407.4 °C. This work was supported by the Russian Science Foundation (Agreement No, 19-79-00015).

Keywords: foam glass, hydrate foaming, foaming agent, silicate raw materials, diatomite, porous structure.

Прогнозирование прочностных свойств титановых сплавов от эквивалентов по алюминию и молибдену при температурах эксплуатации

Егорова Ю.Б., Шмырова А.В.

Ступинский филиал МАИ
Ступино Московской обл., Россия
egorova_mati@mail.ru, shmyrovaalisa@mail.ru

Давыденко Л.В.

Московский политехнический университет
Москва, Россия
mami-davidenko@mail.ru

Аннотация. Приведены результаты статистических исследований прочностных свойств листов и прутков из α -, псевдо α - и $\alpha+\beta$ -титановых сплавов от химического состава. На основе обобщения литературных данных было исследовано временное сопротивление разрыву после стандартного отжига 30 серийных и опытных сплавов при температурах испытания 20-600°C. Обоснована возможность оценки предела прочности полуфабрикатов с использованием прочностных эквивалентов легирующих элементов и примесей по алюминию и молибдену при разной температуре испытания. Предложены модели, позволяющие провести прогнозирование предела прочности титановых сплавов в зависимости от химического состава при различной температуре эксплуатации с доверительной вероятностью 0,95 и статистическими ошибками, сопоставимыми с регламентируемым разбросом.

Ключевые слова: титановые сплавы, эквиваленты по алюминию и молибдену, прочностные свойства, температура испытания, статистические исследования, прогнозирование свойств.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время понятия об эквивалентах легирующих элементов и примесей по алюминию и молибдену, характеризующие химический состав титановых сплавов, получили широкое распространение в научных исследованиях и технологической практике [1-7]. Для оценки предела прочности при комнатной температуре в зависимости от прочностных эквивалентов по алюминию и молибдену для α -, псевдо α - и $\alpha+\beta$ -сплавов Колачевым Б.А. с соавторами было предложено соотношение [1]:

$$\sigma_B^{расч} = 235 + 60[Al]_{экв}^{np} + 50[Mo]_{экв}^{np} \quad (1)$$

где $\sigma_0 = 235$ МПа – предел прочности чистого титана [1]. Соотношение (1) было получено в результате анализа наиболее типичных значений временного сопротивления разрыву отожженных прутков диаметром 8-10 мм 82 сплавов с глобулярной структурой на основе обобщения литературных данных, опубликованных до 1995 г.

Цель настоящей работы состояла в статистической оценке предела прочности прутков и листов из α -, псевдо α - и $\alpha+\beta$ -титановых сплавов в зависимости от прочностных эквивалентов по алюминию и молибдену при температурах испытания в интервале 20-600°C, сопоставимых с условиями эксплуатации.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходными данными послужили сведения, приведенные в справочниках, монографиях, статьях и различной нормативной документации [1, 8-20]. Преимущество отдавалось статьям, размещенным на официальном сайте ВИАМ [15]. Для статистического анализа были использованы температурные зависимости, полученные на основе обобщения литературных данных, содержащих сведения о пределе прочности при температурах 20-600°C прутков и листов 30 серийных и опытных титановых сплавов после стандартного отжига (табл. 1).

Прочностные эквиваленты по алюминию и молибдену были рассчитаны по номинальному химическому составу с помощью соотношений [1]:

$$[Al]_{экв}^{np} = \% Al + \% Sn / 2 + \% Zr / 3 + 3,3\% Si + 20\% O + 33\% N + 12\% C, \quad (2)$$

$$[Mo]_{экв}^{np} = \% Mo + \% V / 1,7 + \% Mn + \% W + \% Cr / 0,8 + \% Fe / 0,7 + \% Nb / 3,3. \quad (3)$$

При расчете прочностного эквивалента по алюминию эквивалентное содержание примесей было принято равным 3,8% [1].

Статистическую обработку проводили с помощью ППП Statistica. Для оценки прогнозируемого уровня прочностных свойств полуфабрикатов в зависимости от эквивалентов по алюминию и молибдену был проведен корреляционно-регрессионный анализ при доверительной вероятности 0,95.

РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе исследований были сопоставлены зависимости предела прочности титановых сплавов от температуры испытания. Технический титан и малолегируемые α - и псевдо α -титановые сплавы теряют прочностные свойства при сравнительно невысоких температурах (300-350°C). В интервале температур 20-600°C по уровню возрастания прочности их можно расположить в следующий ряд: иодидный титан \rightarrow VT1-00, VT1-0 \rightarrow OT4-0 \rightarrow OT4-1, AT2 \rightarrow OT4, AT3 \rightarrow AT4, VT4 \rightarrow VT5 \rightarrow VT5-1.

Высоколегированные жаропрочные псевдо α - и $\alpha+\beta$ -сплавы с большим содержанием алюминия обладают значительной прочностью при довольно высоких температурах (550-600°C). Высокий уровень кратковременной проч-

ности жаропрочных сплавов обусловлен легированием кремнием, α -стабилизаторами и нейтральными упрочнителями, что эквивалентно $\approx 12\div 14\%$. Наиболее жаропрочными сплавами при этих температурах являются VT18 и VT41. Однако в настоящее время сплав VT18 не применяют из-за низкой технологичности и недостаточной термической стабильности, а сплав VT41 находится на ста-

дии промышленного освоения [16, 17]. Высокие прочностные свойства последнего сплава обусловлены применением многокомпонентного легирования, которое приводит к образованию карбидной фазы на основе вольфрама и дополнительному упрочнению α -твердого раствора железом, введенном в пределах растворимости.

Таблица 1
Прочностные эквиваленты по алюминию и молибдену и максимальные рабочие температуры титана и его сплавов

№ пп	Класс сплава	Марка сплава	$[Mo]_{\text{экв}}^{\text{пр}}$, %	$[Al]_{\text{экв}}^{\text{пр}}$, %	Максимальная рабочая температура, °С
1	α -сплавы	BT1-00	0,1	2,3	200-250
2		BT1-0	0,1	3,8	250-300
3		BT5	0,1	8,8	350-400
4		BT5-1	0,1	10,1	400-450
5	Конструкционные псевдо α -сплавы	AT2	1,0	4,5	300-350
6		OT4-0	0,8	4,6	300-350
7		AT3	1,3	7,8	400-450
8		AT4	1,1	8,8	450-500
9		OT4-1	1,5	5,8	300-350
10		OT4	1,5	7,3	300-350
11	Жаропрочные псевдо α -сплавы	BT4	1,5	7,8	400-450
12		BT18	0,8	15,5	580-600
13		BT18Y	1,0	13,5	550-600
14		BT20	1,6	11,5	450-500
15	BT41	2,5	14,3	500-600	
16	Конструкционные $\alpha+\beta$ -сплавы	BT6C	2,4	8,8	400-450
17		BT6	2,4	9,8	400-450
18		BT14	3,8	8,8	350-400
19		BT23	6,8	8,8	450-500
20		BT16	7,6	6,8	300-350
21	Жаропрочные $\alpha+\beta$ -сплавы	BT25	3,0	12,9	500-550
22		BT9	3,0	11,8	500-550
23		BT36	5,7	12,7	500-550
24		BT8	3,3	11,3	450-500
25		BT8-1	3,5	11,5	450-500
26		BT8M	4,0	10,2	450-500
27		BT8M-1	3,8	11,0	400-450
28		BT46	3,1	12,8	500-550
29		BT25Y	5,0	13,0	500-550
30		BT3-1	5,1	10,8	400-450

По уровню возрастания прочности жаропрочные псевдо α -сплавы можно расположить в следующий ряд: BT20 \rightarrow BT18Y \rightarrow BT41 \rightarrow BT18. Для жаропрочных $\alpha+\beta$ -сплавов предел прочности возрастает в следующей последовательности: BT3-1 \rightarrow BT8, BT36 \rightarrow BT9 \rightarrow BT25Y \rightarrow BT25 \rightarrow BT46. Типичные конструкционные $\alpha+\beta$ -сплавы занимают промежуточное положение между малолегированными псевдо α -сплавами и жаропрочными $\alpha+\beta$ -сплавами.

При комнатной температуре для жаропрочных $\alpha+\beta$ -сплавов достигается более высокий уровень прочности, чем для псевдо α , в то время как при температурах выше 500°С наблюдается обратная зависимость.

Для жаропрочных сплавов выявляется тенденция к снижению прочностного эквивалента легирующих элементов по алюминию с увеличением их эквивалента по молибдену (табл. 2). Чем больше прочностной эквивалент по алюминию и меньше эквивалент по молибдену, тем выше рабочая температура жаропрочных сплавов.

Таблица 2
Химический состав и рабочие температуры жаропрочных титановых сплавов

Рабочая температура, °С	$[Al]_{\text{экв}}^{\text{пр}}$, %	$[Mo]_{\text{экв}}^{\text{пр}}$, %
400-450	10,0-10,5	3,5-6,0
450-500	10,5-11,5	1,5-4,0
500-550	12,0-13,0	2,5-5,5
550-600	13,5-15,5	1,0-2,5

На рис. 1 приведены зависимости предела прочности исследованных сплавов от эквивалента по алюминию при различных температурах. С увеличением прочностного эквивалента по алюминию наблюдается рост предела прочности при всех исследованных температурах. При этом с повышением температуры наклон прямых мало изменяется, что свидетельствует о том, что степень влияния α -стабилизаторов и нейтральных упрочнителей приблизительно одинакова в этом интервале температур. С увеличением прочностного эквивалентов по молибдену с 0 до $\sim (5,0\div 8,0)\%$ предел прочности повышается по практически прямолинейной зависимости, но угол наклона

прямых уменьшается с ростом температуры, следовательно влияние β -стабилизаторов на предел прочности псевдо

α - и $\alpha+\beta$ -сплавов ослабляется.

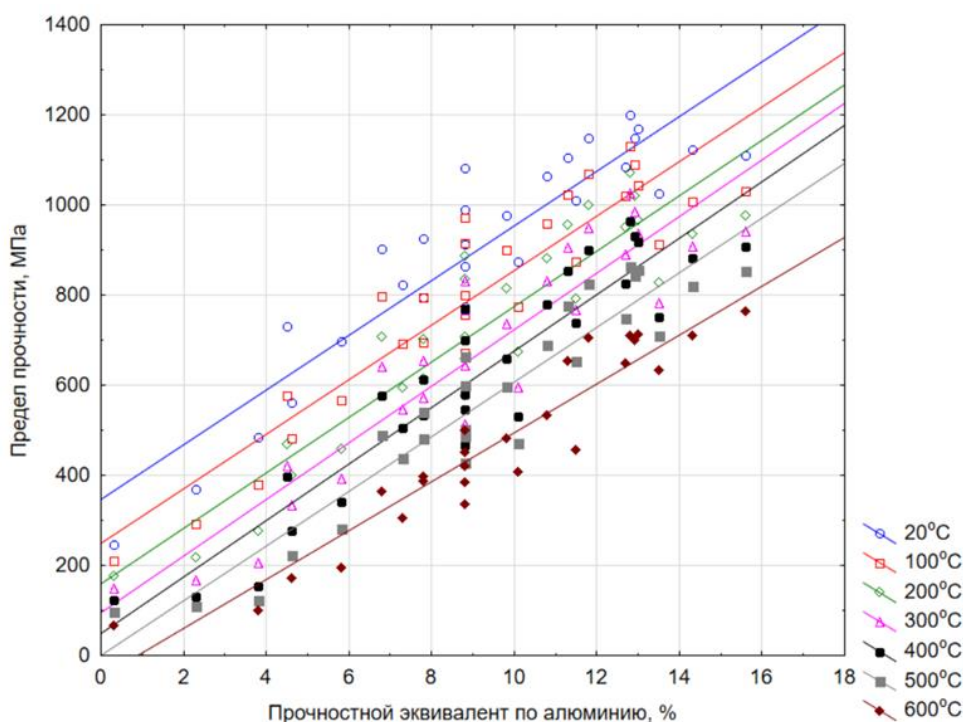


Рис. 1. Зависимость предела прочности отожженных прутков и листов из α -, псевдо α - и $\alpha+\beta$ -титановых сплавов от прочностного эквивалента по алюминию при различных температурах

Регрессионные модели для оценки предела прочности сплавов в зависимости от прочностных эквивалентов по алюминию и молибдену при разных температурах приведены в табл. 3. Модель №1 полностью совпала с соотношением (1). Как следует из проведенного анализа, для получения заданного уровня прочностных свойств с увеличением β -стабилизаторов необходимо меньшее количество эквивалентных алюминию элементов. Так, например, для обеспечения при 300°C предела прочности $\sigma_b \approx 700$ МПа сплав должен иметь $[Al] \approx 10,0\%$ и $[Mo] \approx 1,5\%$ или $[Al] \approx 6,0\%$ и $[Mo] \approx 7,5\%$.

Модели, приведенные в табл. 3, дают возможность оценить среднее типичное значение предела прочности титановых сплавов при различных температурах в зависимости от прочностных эквивалентов по алюминию и молибдену. В работе была проведена проверка предложенных моделей, которая показала удовлетворительное соответствие расчетных и реальных значений механических свойств исследованных полуфабрикатов из титановых сплавов. В зависимости от температуры испытания статистические ошибки составляют от 20 до 35 МПа и сопоставимы с технологическим разбросом, гарантируемым нормативной документацией [10, 11].

Некоторые отклонения расчетных значений от фактических могут быть связаны с различными факторами, например с тем, что при расчете эквивалентов по алюминию было принято содержание примесей. Действительные значения эквивалентов могут быть значительно меньше, если сплавы были изготовлены из титановой губки высокой чистоты, или наоборот больше, если слитки были дополнительно легированы кислородом и углеродом

Таблица 3

Результаты регрессионного анализа зависимости предела прочности прутков и листов от прочностных эквивалентов по алюминию и молибдену при различных температурах для α -, псевдо α - и $\alpha+\beta$ -сплавов

№	Температура испытания, °C	Регрессионная модель	R	S*, МПа
1	20	$\sigma_b = 235 + 60 + [Al]_{\text{экв}}^{pp} + 36 [Mo]_{\text{экв}}^{pp}$	0,96	35
2	100	$\sigma_b = 200 + 56 [Al]_{\text{экв}}^{pp} + 36 [Mo]_{\text{экв}}^{pp}$	0,97	20
3	200	$\sigma_b = 170 + 52 [Al]_{\text{экв}}^{pp} + 34 [Mo]_{\text{экв}}^{pp}$	0,97	25
4	300	$\sigma_b = 150 + 50 [Al]_{\text{экв}}^{pp} + 33 [Mo]_{\text{экв}}^{pp}$	0,96	25
5	400	$\sigma_b = 120 + 49 [Al]_{\text{экв}}^{pp} + 30 [Mo]_{\text{экв}}^{pp}$	0,96	20
6	500	$\sigma_b = 90 + 46 [Al]_{\text{экв}}^{pp} + 23 [Mo]_{\text{экв}}^{pp}$	0,96	25
7	600	$\sigma_b = 70 + 40 [Al]_{\text{экв}}^{pp} + 12 [Mo]_{\text{экв}}^{pp}$	0,95	25

Выводы

1. На основе обобщения литературных данных проведены статистические исследования связи прочностных свойств при различных температурах с химическим составом листов и прутков из титановых сплавов разных классов после стандартного отжига.

2. Обоснованы регрессионные модели для оценки типичных значений временного сопротивления разрыву отожженных прутков и листов от эквивалентов по алюми-

нию и молибдену при температурах $20\div 600^\circ\text{C}$, близких к условиям эксплуатации (с доверительной вероятностью 0,95 и статистическими ошибками, сопоставимыми с регламентируемым разбросом).

3. Полученные результаты дают возможность не только проводить прогнозирование прочностных свойств серийных сплавов при различных температурах, но и обосновать оптимальные составы новых сплавов с учетом требований к условиям их эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильин А.А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник / А.А. Ильин, Б.А. Колачев, И.С. Полькин. – М.: ВИЛС – МАТИ, 2009. – 520 с.
2. Ночовная Н.А. Выбор композиции нового жаропрочного титанового сплава с применением методов математического моделирования / Н.А. Ночовная, В.Г. Анташев, А.А. Ширяев, Е.Б. Алексеев // Титан. – 2015. – № 1. – С. 10-17
3. Кудрявцев А.С. Титан для гражданского судостроения / А.С. Кудрявцев, Э.А. Карасев, Н.Ф. Молчанова // Технология легких сплавов. – 2010. – №1. – С. 85-91.
4. Egorova Yu.B. Influence of chemical composition and heat treatment modes on mechanical properties of titanium alloy VT22 bars / Yu.B. Egorova, L.V. Davydenko, A.V. Shmirova // Solid State Phenomena. – 2020. – V. 229. – P. 582-587.
5. Egorova Yu. B. Use of industrial monitoring results for predicting mechanical properties of titanium alloy semiproducts / Yu.B. Egorova, V.N. Uvarov, L.V. Davydenko, R.A. Davydenko // Metal Science and Heat Treatment. – 2017. – V. 59, № 5-6. – P. 377-383.
6. Скворцова С.В. Влияние структуры на механообработываемость сплава ВСТ2К / С.В. Скворцова, Н.Г. Митропольская, М.А. Герман, Г.В. Гуртовая // Металлы. – 2016. – №4. – С. 79-87.
7. Kolachev V.A. On the relation between the machinability of titanium alloys and their chemical and phase compositions / V.A. Kolachev, Yu.B. Egorova, A.A. Il'in, L.V. Davydenko // Russian Metallurgy (Metally). – 2002. – №3. – P. 284-289.
8. Глазунов С.Г. Конструкционные титановые сплавы / С.Г. Глазунов, В.Н. Моисеев. – М.: Металлургия, 1974. – 368 с.
9. Солонина О.П. Жаропрочные титановые сплавы / О.П. Солонина, С.Г. Глазунов. – М.: Металлургия, 1976. – 448 с.
10. Авиационные материалы. Справочник в 9 т. Т. 5 Магниево-титановые и титановые сплавы / Под общ. ред. А.Т. Туманова. – М.: ОНТИ, 1973. – 560 с.
11. Авиационные материалы: Справочник в 12 т. Т. 6 Титановые сплавы / Под общ. ред. Е.Н. Каблова. – М.: ВИАМ, 2010. – 96 с.
12. Фридляндер И.Н. Машиностроение. Энциклопедия. Т. 2-3. Цветные металлы и сплавы / И.Н. Фридляндер, О.Г. Сенаторова, О.Е. Осинцев. – М.: Машиностроение, 2001. – раздел 5. – С. 585-586.
13. Моисеев В.Н. Сварные соединения титановых сплавов / В.Н. Моисеев, Ф.Р. Куликов, Ю.Г. Кириллов, Л.В. Шохолова, Ю.В. Васькин. – М.: Металлургия, 1979. – 248 с.
14. Микляев П.Г. Механические свойства легких сплавов при температурах и скоростях обработки давлением / П.Г. Микляев. – М.: Металлургия, 1994. – 280 с.
15. Сайт ВИАМ – URL: <http://viam-works.ru/ru/articles> (дата обращения 16.12.2020).
16. Каблов Е.Н. Разработка опытно-промышленной технологии изготовления полуфабрикатов из псевдо- α титанового сплава ВТ41 / Е.Н. Каблов, О.С. Кашапов, Т.В. Павлова, Н.А. Ночовная // Титан. – 2016. – №2. – С. 33-38.
17. Беляев М.С. Механические свойства и структура титанового сплава ВТ41 / М.С. Беляев, М.А. Горбовец, О.С. Кашапов, И.А. Ходинев // Цветные металлы. – 2014. – №8. – С. 66-71.
18. Кашапов О.С. Повышение прочностных характеристик жаропрочных псевдо- α -титановых сплавов / О.С. Кашапов, Т.В. Павлова, А.Р. Истракова, В.С. Калашников. // Авиационные материалы и технологии. – 2014. – № S5. – С. 73-80.
19. Павлова Т.В. Титановые сплавы для газотурбинных двигателей / Т.В. Павлова, О.С. Кашапов, Н.А. Ночовная // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2012. – №5. – С. 8-14.
20. Шарапова Н.А. Использование новых титановых сплавов при формировании конструктивного облика компрессора перспективного авиационного двигателя / Н.А. Шарапова, А.А. Живушкин, А.В. Васильев, О.С. Кашапов, Т.В. Павлова, В.И. Иванов // Современные титановые сплавы и проблемы их развития. – М.: ВИАМ, 2010. – С. 62-68.

Predicting Strength of Titanium Alloys Using Aluminum and Molybdenum Equivalents at Operating Temperatures

Egorova Yu.B., Shmyrova A.V

Moscow Aviation Institute (National Research University)
Stupino branch
Moscow Region, Stupino, Russia
egorova_mati@mail.ru, shmyrovaalisa@mail.ru

Davydenko L.V.

Moscow Polytechnic University
Moscow, Russia
mami-davydenko@mail.ru

Abstract. This study contains the results of statistical studies of strength of sheeted products and bars made from α -, near α -, and $\alpha+\beta$ titanium alloys based on their composition. Based on summarizing the literature data, we have studied the ultimate tensile strength after mill annealing of 30 serial and experimental alloys at testing temperatures between 20 and 600°C. We have also substantiated the possibility to evaluate the tensile strength of semi-finished products using the strength equivalents (such as aluminum and molybdenum) of alloying elements and impurities at various temperatures. We have put forth models that help to

predict the ultimate strength of titanium alloys based on their composition and the operating temperature with a confidence level of 0.95 and statistical errors comparable with the regulated spread.

Keywords: titanium alloys, aluminum and molybdenum equivalents, strength, test temperature, statistical study, predicting properties.

Деформации при угловом прессовании полосы из цилиндрической заготовки

Логинов Ю.Н., Замараева Ю.В.

УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
Екатеринбург, Россия
j.n.loginov@urfu.ru, zamaraevajulia@yandex.ru

Комкова Д.А.

Институт физики металлов им М.Н. Михеева УрО РАН
Екатеринбург, Россия
komkova_d@imp.uran.ru

Аннотация. Подвергнута анализу схема неравноканального углового прессования (НРКУП) магниевой заготовки. Постановку задачи моделирования осуществляли в программном модуле DEFORM 2D. Выявлено, что в процессе НРКУП достигается большой уровень деформации, что ведет к лучшей проработке структуры полосы, увеличению пластичности, что благоприятно скажется на последующей холодной прокатке. Отмечено, что верхняя часть полосы в процессе НРКУП нагартована больше, чем нижняя, что можно объяснить формированием последней в основном деформациями удлинения, а верхняя поверхность формируется при большем участии сдвиговых деформаций. Сделаны выводы о влиянии накопленной степени деформации в процессе НРКУП на прочностные свойства полосы, на основании измерения твердости вырезанных из нее образцов.

Ключевые слова: угловое прессование, магний, степень деформации, пластичность, метод конечных элементов, твердость.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня активно развиваются исследования в области деформации магния и деформируемых сплавов на его основе в связи с расширением их использования в различных отраслях промышленности [1-3].

Магний как материал, имеющий гексагональную плотноупакованную (ГПУ) кристаллическую решетку, обладает ограниченным количеством плоскостей скольжения, что приводит к пониженной пластичности при комнатной температуре [4-6]. В связи с этим его пластическая обработка чаще всего осуществляется в горячем состоянии [7], что позволяет повысить пластические свойства, однако следует отметить недостатки процессов горячей деформации магниевых сплавов: большие затраты энергии на нагрев заготовок, окисление поверхности полуфабрикатов из-за невысокой коррозионной стойкости магния, отсутствие возможности получения мелкозернистой структуры, потерю эффекта нагартовки металла, позволяющего увеличить прочностные свойства конечного продукта. Это является основанием для проведения исследований условий, обеспечивающих деформацию магния и его сплавов без разрушения при пониженных температурах. В работе [8] показано, что деформация материала вызывает в нем значительно меньшие повреждения, если она выполняется в условиях наложения высоких сжимающих напряжений. Сжимающие напряжения могут быть созданы внешним воздействием, например, сжатой жидкостью или пластичным твердым телом или реакциями стенок, ограничивающих деформируемый материал, так, например, в работах [9,10] приведены эксперименты по успешной осадке цилиндрических образцов магния в толстостенной медной

оболочке, а значит процесс прямого прессования, реализующий высокий уровень сжимающих напряжений, аналогично может позволить деформировать сплавы магния, предотвращая образование пор и микротрещин. Однако традиционно экструдированные магниевые листы обладают низкими механическими свойствами из-за сильной базисной текстуры. Следует отметить, что улучшение механических свойств изделий из магниевых сплавов может быть достигнуто за счет измельчения зерен и ослабления базисной текстуры [11,12], что связано с введением сдвиговой деформации [13]. В качестве примера также можно рассмотреть работы [14,15], авторы которых разработали штамповые конструкции и успешно ввели деформацию сдвига в процесс экструзии, что привело к ослаблению базисной текстуры, и, следовательно, улучшению механических свойств полос из магниевого сплава.

Таким образом, исследование напряженно-деформированного состояния в процессе НРКУП, а также свойств отпрессованной по данной схеме полосы, является актуальной задачей.

СХЕМА ДЕФОРМАЦИИ

На рис. 1 представлена схема НРКУП, в которой круглая заготовка 1 помещается в полость контейнера 2 и выдавливается пуансоном 3 в пересекающийся канал прямоугольного сечения.

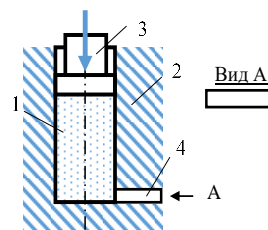


Рис. 1. Схема деформации НРКУП: 1 – круглая заготовка; 2 – контейнер; 3 – пуансон; 4 – канал прямоугольного сечения

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для решения задачи применен программный комплекс DEFORM-2D. В данном случае пришлось ограничиться плоской постановкой задачи при поперечном размере контейнера 42 мм и толщине полосы $h = 1$ мм, что соответствовало условиям физического моделирования.

Материал заготовки – магний марки Mg90 ГОСТ 804-93. Использовали модель изотропной среды с упрочнением, которая описана в работе [16]. Постановка задачи включала в себя описание физических и пластических свойств на основе справочных данных, задание граничных

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90051 и при частичной финансовой поддержке постановления № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.А03.21. Моделирование выполнено при поддержке проекта РФФИ №20-38-90051, экспериментальная часть - в рамках государственного задания по теме "Давление" № АААА-А18-118020190104-3.

условий в перемещениях. На контактной границе заготовки и инструментов сборки задан закон трения по Зибелю с показателем трения равным 0,2.

На рис. 2 представлено распределение поля степени деформации в процессе НРКУП.

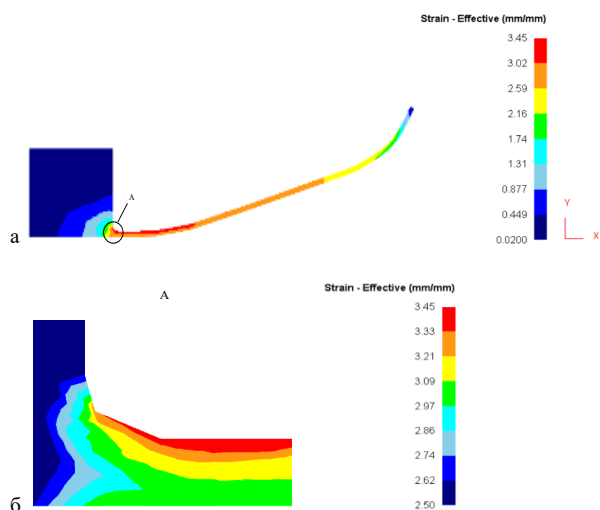


Рис. 2. Распределение степени деформации в процессе НРКУП (а), зона А (б)

Видно, что в процессе НРКУП достигается большой уровень деформации (до 3,45 на верхней поверхности), что можно объяснить наличием трех механизмов создания уровня деформации в схеме НРКУП: наличия сдвигов на границе пересечения двух каналов, за счет коэффициента вытяжки при уменьшении площади поперечного сечения и за счет перевода круглого сечения в прямоугольное, в отличие от прямого прессования, где имеется только два механизма. Высокий уровень деформации ведет к лучшей проработке структуры полосы, увеличению пластичности, что благоприятно скажется при последующей холодной прокатке.

Следует специально отметить, что при формировании полосы в процессе НРКУП в очаге деформации микрообъемы металла перемещаются по различным траекториям, а также видно, что верхняя часть полосы нагартована больше, чем нижняя, по степени деформации, это различие достигает 14%. Пониженную степень деформации на нижней поверхности полосы можно объяснить тем, что материал здесь подвергается в основном деформации удлинения, а верхняя поверхность формируется при большем участии сдвиговых деформаций. Наличие накопленных сдвиговых деформаций приведет к развороту зерен, что является причиной ослабления сильной базисной текстуры, к развитию которой склонны магниевые сплавы [17,18], и, как следствие, к повышению деформируемости полосы в процессе листовой прокатки. Следует отметить, что в магниевых сплавах микроструктурные и текстурные факторы имеют решающее влияние на механические свойства изделий [19].

Как это следует из основных положений механики деформируемых сред [20], повышения пластичности можно ожидать при увеличении по модулю среднего напряжения. Эти напряжения для процесса НРКУП отражены на рис. 3.

Видно, что среднее нормальное напряжение (гидроста-

тическое давление) по модулю достигает больших величин (до -1010 МПа), что позволит добиться отсутствия разрушения в процессе деформации.

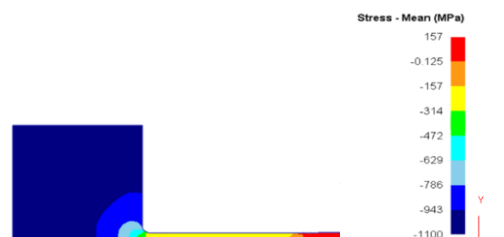


Рис. 3. Распределение среднего напряжения в процессе НРКУП

ЭКСПЕРИМЕНТ: ИЗМЕРЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ

С целью подтверждения результатов моделирования было принято решение произвести измерения твердости по толщине полосы (рис. 4, а), полученной методом НРКУП. Для этого из полосы был вырезан образец в плане прямоугольной формы с размерами 10x15x1 мм на расстоянии 633 мм от переднего торца полосы (рис. 4, б). При этом в контейнере еще оставалась часть заготовки высотой 21 мм. Таким образом, образец был вырезан на участке полосы, соответствующему стационарной стадии прессования.

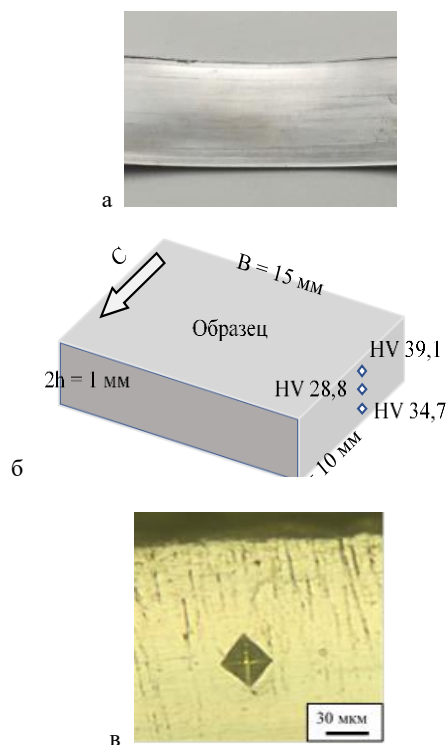


Рис. 4. Полоса, полученная методом НРКУП (а), образец для определения твердости (б) и отпечаток от индентора (в)

Образец заливали в эпоксидную смолу холодного отвердевания. При пробоподготовке торцевые поверхности сначала были отшлифованы на абразивной бумаге разной зернистости, а затем отполированы до зеркального блеска с помощью фетра и алмазной пасты. Известно [21],

что недостатком механической обработки шлифов является наклёп обработанной поверхности, и в результате шлифовки и полировки поверхностный слой упрочняется. Для удаления упрочнённого слоя использовали раствор 97% этилового спирта и 3% азотной кислоты. Образцы после травления промывали в этиловом спирте.

Микротвёрдость определяли по методу Виккерса. Для этого использовали прибор ПМТ-3 с алмазной пирамидой с квадратным основанием с углом при вершине между противоположными гранями пирамиды равным 136° . Для всех измеряемых точек нагрузка составила 0,196 Н (20 Г), время нагружения 10 с. На рис. 4, б приведена схема измерения твёрдости по толщине полосы с указанием размеров образцов и направления. Микротвёрдость измеряли в трёх точках: в верхнем приповерхностном, срединном и нижнем приповерхностном слое. Для измерения в приповерхностных слоях полосы от ребра пластины отступали 60 мкм, для определения твёрдости в срединном слое от ребра отступали 450 мкм. Для определения среднего значения твёрдостей в разных слоях было выполнено не менее 10 измерений на каждую их трёх точек. Чтобы предотвратить влияние зоны наклепа вокруг ранее нанесённого отпечатка, наименьшее расстояние между соседними измерениями составляло не менее удвоенной длины диагонали отпечатка. Значение микротвёрдости выражены в кг/мм^2 . Ошибка при измерениях составляет 4% [21].

По результатам измерений твёрдости по толщине образца средние размеры отпечатков индентора составили 30,8 и 32,7 мкм в приповерхностных слоях и 35,9 мкм в срединном слое. Пример отпечатка после вдавливания индентора представлен на рис. 4, в. Эти отпечатки соответствуют значениям твёрдости HV 39,1, HV 34,7 и HV 28,8 [21]. Как следует из результатов, верхняя часть полосы нагартована больше, чем нижняя (HV 39,1 против HV 34,7), и разница составляет 12%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

Аналізу подвергнута схема неравноканального углового прессования магниевой заготовки. С помощью метода конечных элементов выявлено, что в процессе НРКУП достигается высокий уровень деформации. Отмечено, что верхняя часть полосы в процессе НРКУП нагартована больше, чем нижняя, что можно объяснить формированием последней в основном деформациями удлинения, а верхняя поверхность формируется при большем участии сдвиговых деформаций. Экспериментальным исследованием показано, что в предложенной схеме прессования микротвёрдость верхнего слоя полосы выше микротвёрдости нижней части полосы, что соответствует решению задачи методом конечных элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Joost W.J. Towards magnesium alloys for high-volume automotive applications / W.J. Joost, P.E. Krajewski // *Scripta Materialia*. – 2017. – Vol. 128. – P. 107-112.
2. Chapuis A. Temperature dependency of slip and twinning in plane strain compressed magnesium single crystals / A. Chapuis, J.H. Driver // *Acta Materialia*. – 2011. – Vol. 59. – P. 1986-1994.
3. Liu F. The processing of Mg alloy micro-tubes for biodegradable vascular stents / F. Liu, C. Chen, J. Niu, J. Pei, H. Zhang, H. Huang, G. Yuan // *Materials Science and Engineering C*. – 2015. – Vol. 48. – P. 400-407.

4. Song B. Twinning characteristic and variant selection in compression of a pre-side-rolled Mg alloy sheet / B. Song, R. Xin, Y. Liang, G. Chen, Q. Liu // *Materials Science and Engineering A*. – 2014. – Vol. 614. – P. 106-115.

5. Barnett M.R. Influence of grain size on the compressive deformation of wrought Mg–3Al–1Zn / M.R. Barnett, Z. Keshavarz, A.G. Beer, D. Atwell // *Acta Materialia*. – 2004. – Vol. 52. – P. 5093-5103.

6. Nugmanov D.R. Structure of magnesium alloy MA14 after multistep isothermal forging and subsequent isothermal rolling / D.R. Nugmanov, O.Sh. Sitdikov, M.V. Markushev // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2015. – Vol. 116. – P. 993-1001.

7. Myshlyaev M.M. Twinning, dynamic recovery and recrystallization in hot worked Mg–Al–Zn alloy / M.M. Myshlyaev, H.J. McQueen, A. Mwembela, E. Konopleva // *Materials Science and Engineering A*. – 2002. – Vol. 337, is. 1-2. – P. 121-133.

8. Volkov A.Yu. Improving the mechanical properties of pure magnesium through cold hydrostatic extrusion and low-temperature annealing / A.Yu. Volkov, I.V. Kliukin // *Materials Science and Engineering A*. – 2015. – Vol. 624. – P.56-60.

9. Каменецкий Б.И. Влияние условий бокового подпора на пластичность магния при холодной осадке / Б.И. Каменецкий, Ю.Н. Логинов, Н.А. Кругликов // *Технология легких сплавов*. – 2012. – № 1. – 86-92.

10. Loginov Y.N. Upsetting of cylinder magnesium blanks in copper casing without compression / Y.N. Loginov, Y.V. Zamaraeva, B.I. Kamenetskiy // *Tsvetnye Metally*. – 2020. – Vol. 4. – P. 77-82.

11. Chang L.L. Microstructure and mechanical properties in an AZ31 magnesium alloy sheet fabricated by asymmetric hot extrusion / L.L. Chang, Y.N. Wang, X. Zhao, J.C. Huang // *Materials Science and Engineering A*. – 2008. – Vol. 496, is. 1-2. – P. 512-516.

12. Pan F. An effective approach called the composite extrusion to improve the mechanical properties of AZ31 magnesium alloy sheets / F. Pan, Q. Wang, B. Jiang, J. He, Y. Chai, J. Xu // *Materials Science and Engineering A*. – 2016. – Vol. 655. – P. 339-345.

13. Mukai T. Ductility enhancement in AZ31 magnesium alloy by controlling its grain structure / T. Mukai, M. Yamanoi, H. Watanabe, K. Higashi // *Scripta Materialia*. – 2001. – Vol. 45, is. 1. – P. 89-94.

14. Yang Q. Tailoring texture and refining grain of magnesium alloy by differential speed extrusion process / Q. Yang, B. Jiang, J. He, B. Song, W. Liu, H. Dong, F. Pan F // *Materials Science and Engineering A*. – 2014. – Vol. 612. – P. 187-191.

15. Yang Q. A tilted weak texture processed by an asymmetric extrusion for magnesium alloy sheets / Q. Yang, B. Jiang, Y. Tian, W. Liu, F. Pan // *Materials Letters*. – 2013. – Vol. 100. – P. 29-31.

16. Комкова Д.А. Структура и текстура магния после низкотемпературной мегапластической деформации / Д.А. Комкова, А.Ю. Волков // *Вектор науки ТГУ*. – 2017. – № 3(41). – С. 70-75.

17. Yi S. Mechanical anisotropy and deep drawing behaviour of AZ31 and ZE10 magnesium alloy sheets / S. Yi, J. Bohlen, F. Heinemann, D. Letzig // *Acta Materialia*. – 2010. – Vol. 58, is. 2. – P. 592-605.

18. Каменецкий Б.И., Соколов А.Л., Волков А.Ю., Антонова О.В., Клюкин И.В. Способ изготовления фольги из магния // Патент России №2563077. 2015. Бюл. №26.

19. Suh J.S. Quantitative relationship analysis of mechanical properties with microstructure and texture evolution in AZ series alloys / J.S. Suh [et al.] // Magnesium Technology Symposium held at the 149th Annual Meeting and Exhibition (San Diego, 23-27 February 2020). – San Diego, 2020. – P. 347-353.

20. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. – 836 с.

21. Харитонов Л.Г. Определение микротвёрдости. / Л.Г. Харитонов. – Москва: Металлургия, 1967. – 47 с.

Strains under Angular Pressing of a Strip from a Cylindrical Billet

Loginov Yu.N., Zamaraeva Yu.V.

Institute of New Materials and Technologies
Ural Federal University named after the first President of
Russia B.N. Yeltsin
Yekaterinburg, Russia
j.n.loginov@urfu.ru, zamaraevajulia@yandex.ru

Komkova D.A.

Strength Laboratory
M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch, Rus-
sian Academy of Sciences
Yekaterinburg, Russia
komkova_d@imp.uran.ru

Abstract. The scheme of non-equal channel angular pressing (non-ECAP) of a magnesium billet has been analyzed. The modeling was performed by DEFORM 2D software. A high level of strain is shown to be achieved during non-ECAP. It leads to more homogenous structure refinement of magnesium and plasticity improvement which could favorably affect the subsequent deformation of a Mg-strip by cold rolling. At non-ECAP-process, the upper part of the strip is noted to be hardened more than the lower one. The lower part is supposed to be formed by extensional strain mainly, meanwhile for the upper one, the prime mecha-

nism is likely to be shear deformation. Based on hardness measurement of the samples cut from the obtained Mg-strip, conclusions have been made about the influence of the accumulated strain during non-ECAP on the strength properties of the strip.

Keywords: angular pressing, magnesium, strain, plasticity, finite element method, hardness.

Исследование неравномерности свойств нержавеющей стали 12X18H10T в зависимости от толщины листа

Типалин С.А., Белоусов В.Б., Шпунькин Н.Ф.

Московский Политехнический Университет

Москва, Россия

Tsa_mami@mail.ru, 1736113@rambler.ru, snf48@yandex.ru

Аннотация. Проведены исследования свойств холоднокатаного листа из коррозионностойкой стали 12X18H10T для различной толщины. Построены кривые упрочнения и определены их коэффициенты. Выявлены закономерности влияния толщины на характер упрочнения листового материала 12X18H10T. Проведены измерения микротвердости по толщине листа. Подтверждено предположение, что твердость в середине листа снижается для разных толщин. Приведен сравнительный анализ распределения значений твердости для коррозионностойкой стали 12X18H10T и стали с содержанием углерода 0,08%. Выявлено, что с уменьшением толщины материала изменяются силовые параметры процесса и увеличивается средняя твердость материала. Приведены графики кривых упрочнения для разных толщин листа и зависимость распределения твердости по толщине данных листов.

Ключевые слова: листовой материал, растяжение образцов, микротвердость, накопленная деформация, изменение свойств, механические характеристики листа, различие свойств по толщине.

ВВЕДЕНИЕ

Для расчета технологических параметров разработчики используют свойства материала. В большинстве случаев данные по материалам указываются в справочной литературе и специализированных каталогах. Для каждого марок материала даются значения показателей его механических свойств. В зависимости от термической обработки используются данные для мягкого (с учетом термообработки) или твердого материала. Для некоторых видов проката свойства материала устанавливаются отдельно. Но для листового стального холоднокатаного проката значения показателей механических свойств материала имеют в стандартах и справочниках одинаковые значения и не зависят от толщины. При проведении компьютерных расчетов технологических параметров применяется также база данных по кривым упрочнения в зависимости от марки материала. При этом специалистами, проводящими моделирование, нередко отмечается факт зависимости свойств стального листового проката от толщины. Неравномерность свойств возникает как при горячей, так и при холодной прокатке. Так, Алдунин А.В. в своих работах [1, 2] показал, что при горячей прокатке цветных металлов и стальных полос свойства материала существенно зависят от деформации. В статье [1] показано, что при прокатке стальных полос марки СтЗсп толщиной от 5 мм при средней деформации 15% наружные и внутренние слои деформируются неравномерно. Деформация в по-

верхностном слое составляет около 21%, а уже на глубине 1 мм её значение снижается до 10% [1].

Рассматривая прокатку стали 08пс толщиной менее 2 мм, авторы статьи [3] показывают, что при увеличении скорости деформации происходит изменение как твердости полосы, так и её механических свойств (предела прочности и текучести). Результаты, полученные авторами, отражены в таблице 1.

Таблица 1

Режимы прокатки

Температурно-деформационные режимы прокатки	σ_b , МПа	σ_t , МПа	HRB	Микротвердость вдоль направления прокатки, МПа		Микротвердость поперек направления прокатки, МПа	
				Поверхностная зона	Центральная зона	Поверхностная зона	Центральная зона
$\Sigma\varepsilon = 7,2\%$	460	410	77	1226	1129	1160	1128
$\Sigma\varepsilon = 16,4\%$	450	375	85	1070	1337	1042	1098

Как видно из таблицы 1, твердость распределена неравномерно и по толщине полосы.

Для холоднокатаных сталей 08пс также наблюдается неравномерность свойств в зависимости от толщины листа [4-12]. При исследовании оцинкованной стали с толщиной от 0,4 до 1,5 мм наблюдается увеличение пластичности с 29% до 40% и снижение прочностных характеристик материалов [6]. Изменение характеристик для стали 08пс с учетом параметров кривой упрочнения показано в работе [4]. В этой работе показано, что неравномерность свойств по толщине листа возникает не только при прокатке, но может усиливаться при операциях, предшествующих технологическим операциям, таким как правка [7], выдавливание технологических канавок для последующего гибки листа [8] или в неоднородных по свойствам заготовках [9-10].

Естественно, разнородность наблюдается и у биметаллических листов, что показано Бондаревым А.Б. для листов от 1 мм и меньше [10]. При этом прослеживается тенденция к тому, что у более толстых листов пластичность выше и предел прочности меньше. Подобная картина показана и в работе Алдунина А.В. [2].

Неравномерность по сечению может наблюдаться из-за технологических особенностей, что показано в работе [11] для стали 50. Однако в большинстве случаев неравномерность свойств по толщине вызвана остаточными напряжениями при предварительной деформации материала [5, 6,

8, 12-17]. Изменение неравномерности свойств можно фиксировать различными способами. Так, в работе [15] показано влияние остаточных напряжений в глубине материала 09Г2С от поверхности, выявленных методами неразрушающего контроля. В частности, методом акустолупругости выявлено изменение остаточных напряжений по толщине материала. Неравномерность свойств по толщине может существенно влиять на технологические особенности пластической обработки материала и на эксплуатацию изделия.

В статье [16] приводятся разработанные Японской корпорацией «JFE Steel» стали повышенной износостойкости групп 400 и 450.

Компания «JFE Steel» при изготовлении стального листа очень точно выдерживается соотношение легирующих элементов. Толстолистовые стали толщиной от 10 до 60 мм имеют неравномерную твердость по толщине, что показано на рисунках.

Результаты испытаний EVERHARD C400LE:

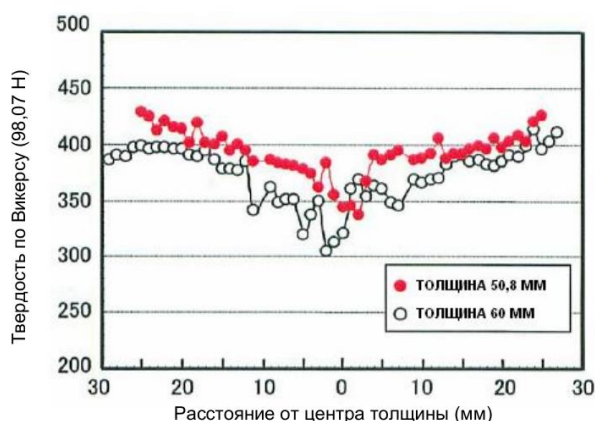


Рис. 1. Твердость по толщине листа C400LE

Результаты испытаний EVERHARD C450LE:

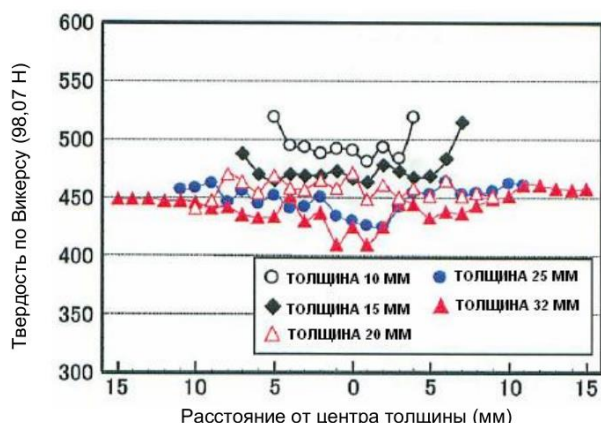


Рис. 2. Твердость по толщине листов C450LE

Наиболее полная информация по изменениям свойств в зависимости от толщины материала была получена для стали 08пс (аналог в США - 1008, странах ЕС - 1.1121), что освещено в работах [4, 5].

Зависимость механических свойств материала от толщины показана в таблицах 2-3. В работе исследованы толщины от 0,5 мм до 3 мм.

Результаты исходных образцов представлены в таблице 2. Коэффициенты кривых упрочнения представлены в таблице 3.

Таблица 2

Механические характеристики образцов различной толщины в состоянии поставки

Толщина образцов, мм	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Предельная деформация
3	264	430	0,18
1,5	257	496	0,18
0,7	277	504	0,16
0,5	327	501	0,13

Кривые упрочнения для толщин 0,5, 0,7, 1,5 и 3,0 мм изображены на рисунке 3. Графики зависимости величин коэффициентов кривых упрочнения от толщины заготовки представлены на рисунках 4-5.

Таблица 3

Значения коэффициентов кривой упрочнения для исходных образцов

Толщина, мм	A, МПа	n
S=3	488,2	0,055
S=1,5	575,7	0,078
S=0,7	623,9	0,087
S=0,5	599,3	0,054

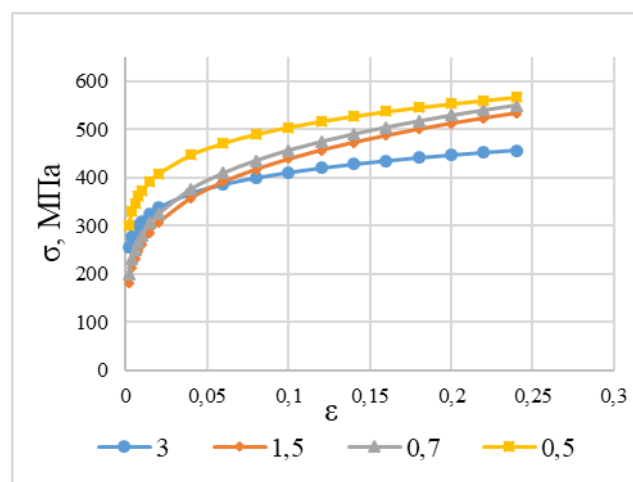


Рис. 3. Кривые упрочнения стали 08пс для различных толщин материала

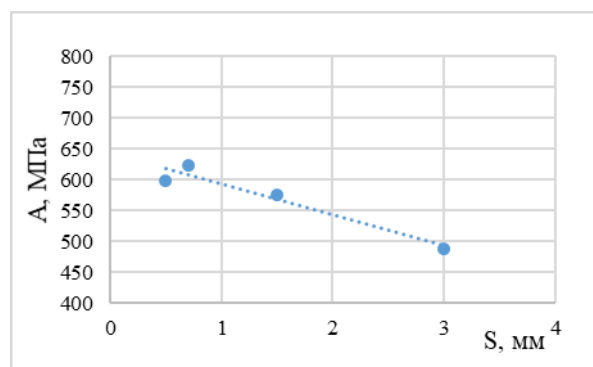


Рис. 4. Зависимость коэффициента A для степенной зависимости от толщины материала s

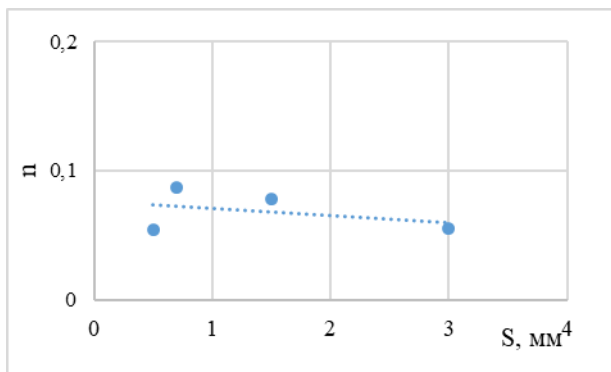


Рис. 5. Зависимость коэффициента степени упрочнения материала n от толщины материала s

На рисунке 6 показано распределение микротвердости в образцах толщиной 0,5; 0,7; 1,5; и 3 мм. Среднее значение микротвердости исходных образцов и растянутых до предельной деформации показано в таблице №4.

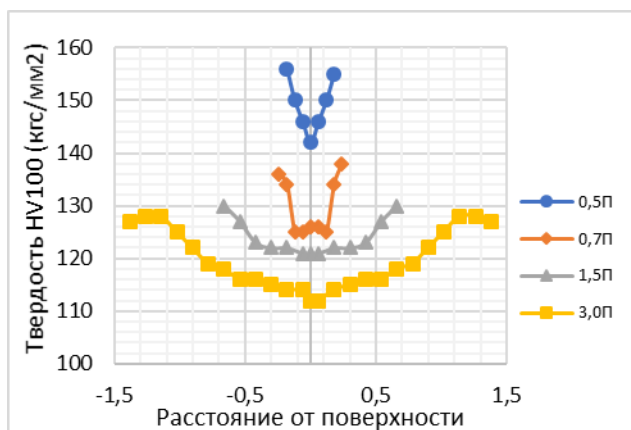


Рис. 6. График распределения микротвердости для образцов после прокатки

Таблица 4

Среднее значение микротвердости

s , мм	0,5	0,7	1,5	3
Материал в состоянии поставки, HV	149,3	130,4	124,2	120,2
После растяжения, HV	173,7	150,5	152,1	158,1

Как видно из таблицы с увеличением толщины листа твердость материала снижается. Увеличение твердости после растяжение связано с возрастанием накопленной деформации в листовом металле.

Как видно из представленного обзора, свойства стали с содержанием углерода 0,08 % в значительной степени зависят от толщины. Для легированных материалов такого вида исследований не проводилось. Однако необходимость в подобных данных для технологических расчётов, несомненно, присутствует [18-24]. Одним из распространенных листовых легированных материалов, широко представленном на современном рынке, является сталь 12X18H10T.

Результаты проведения испытаний стали 12X18H10T.

Материал: Сталь коррозионностойкая 12X18H10T (аналог в США - 321, странах ЕС - 1.4541).

Проведены эксперименты по растяжению стальных холоднокатаных полос 250x20 мм с толщинами 1,0 мм; 1,5 мм; 3 мм.

В ходе эксперимента замерялась сила растяжения и изменение толщины и ширины образца (с последующим вычислением изменения площади поперечного сечения образца). По полученным данным вычислялись интенсивность напряжений и интенсивность деформации и строилась кривая упрочнения с последующей степенной аппроксимацией.

$$\sigma = A(\varepsilon + \varepsilon_0)^n \quad (1)$$

Эксперименты проводились для серии образцов с расчетом среднего значения по каждой толщине.

Кривые упрочнения для листового материала строятся по рассчитанным величинам истинного напряжения и деформации образца. При этом определение деформации может происходить двумя способами:

1) с замером удлинения образца в процессе нагружения;

2) с фиксацией уменьшения площади поперечного сечения образца в зависимости от воздействующей силы.

Первый способ более простой в осуществлении, однако в процессе такого измерения образец должен иметь большую ширину в зоне захвата, чтобы избежать искажений, связанных с влиянием зажимов.

Второй способ требует специальных приспособлений, установленных на испытательную машину, однако позволяет более точно фиксировать деформацию поперечного сечения и через нее определять деформацию удлинения образца. Кроме того, второй способ позволяет определить коэффициент анизотропии материала.

Методика расчета кривых упрочнения, принималась в соответствии с [4]:

Изменение ширины и толщины образца в текущей момент времени определялся по формулам 2 и 3.

$$b = b_0 - \Delta b \quad (2)$$

$$s = s_0 - \Delta s \quad (3)$$

где b_0 и s_0 – ширина и толщина исходного образца соответственно;

Δb и Δs – уменьшение ширины и утонение образца.

Определение деформации в главных направлениях проводилось по формулам:

$$\varepsilon_b = \ln \frac{b}{b_0}, \quad \varepsilon_s = \ln \frac{s}{s_0}, \quad \varepsilon_t = \ln \frac{b_0 s_0}{bs} \quad (4)$$

Напряжение, возникающее при растяжении образца, вычислялось из зависимости:

$$\sigma_t = \frac{P}{bs} \quad (5)$$

Далее определялся коэффициент анизотропии материала:

$$R = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_s} \quad (6)$$

По расчётным данным строятся графики $R=R(\varepsilon_t)$, по графикам определяют коэффициенты анизотропии при $\varepsilon_t=0,15$ для каждого отдельного испытания.

Находится интенсивность деформации и напряжений для каждого момента времени:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{2}{3} \times \frac{2+R}{1+R}} \varepsilon_t \quad \text{и} \quad \sigma = \sqrt{\frac{3}{2} \times \frac{1+R}{2+R}} \sigma_t \quad (7)$$

По результатам вычислений строятся графики $\sigma = \sigma(\varepsilon)$, которые затем аппроксимируются степенной зависимостью.

Полученные данные показаны на рисунке 7.

Свойства материалов часто связаны с многими показателями, но если считать условие деформации стабильными и однородными по толщине, то можно определить среднее значение для конкретного материала. После определения коэффициентов аппроксимации кривых упрочнения по формуле 1, построим график и аппроксимируем изменения данных коэффициентов линейной зависимостью (рис. 8 и 9). Как видно из графиков с увеличением толщины материала степень упрочнения n меняется значительно с 0,35 до 0,24. Изменение коэффициента A степенной функции упрочнения, описанной формулой 1, происходит также со снижением величины (с 710 до 650 МПа).

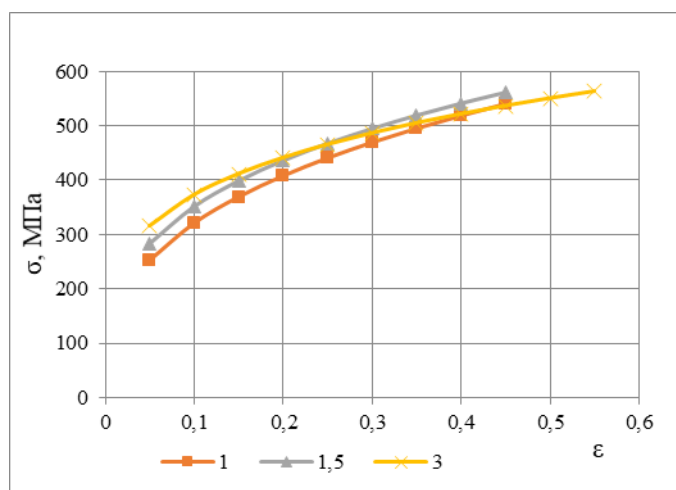


Рис. 7. Кривые упрочнения 12X18H10T для толщин листов 1 мм, 1,5 мм и 3 мм

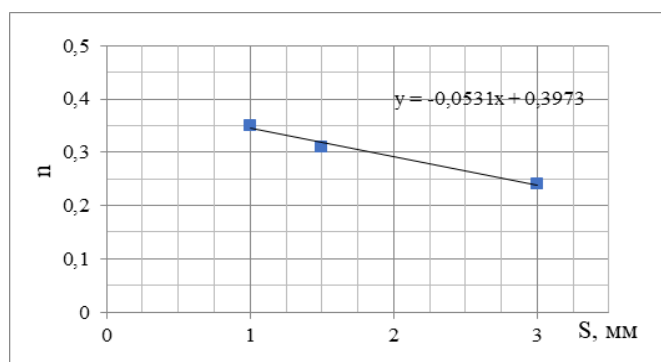


Рис. 8. Изменение степени упрочнения n степенной функции (1) в зависимости от толщины

Методика получения зависимости распределения твердости по толщине листа:

Измерения производились алмазным наконечником при нагрузке 0,05 кгс и выдержкой 10-15 с. Измерения производились на расстоянии 100 мкм (первый отпечаток) с последующим шагом в 60 мкм. Отпечаток получался от

алмазного четырехгранного наконечника с основанием в виде квадрата. Размеры подготовленных образцов 30x20xS (рис. 10), где s – толщина листового металла.

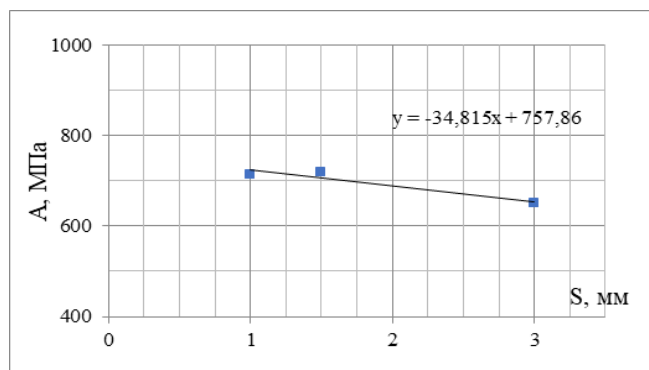


Рис. 9. Изменение коэффициента A степенной функции (1) в зависимости от толщины

Для определения микротвердости измерения производились по ГОСТ 9450-76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников» на приборе МНТ-10.

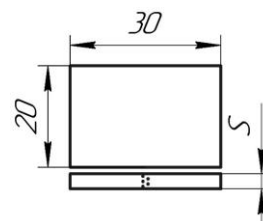


Рис. 10. Образцы для измерения микротвердости

Отпечатки располагались в шахматном порядке. Поверхность, на которой производились измерения, была подновлена снятием наклепанного слоя (1-2 мм) с последующей полировкой до значения шероховатости поверхности $Ra 0,2$. Образец жестко закреплялся на предметном столе испытательного прибора строго перпендикулярно к оси алмазного наконечника. Перед испытанием проводилась очистка поверхности наконечника и поверхности испытуемого образца для удаления посторонних веществ (смазки и т. п.).

На рисунке 11 показано распределение микротвердости в образцах толщиной 1,0, 1,5 и 3 мм. Получение значений микротвердости для графиков проводилось до середины образцов, а на графике было зеркально отображено для наглядности. Измерение твердости проводилось с соблюдением условия, что от последнего отпечатка до края полосы должно оставаться расстояние не менее трех отпечатков. Выполнение данного условия позволяет свести к минимуму искажение от краевого эффекта.

Рассматривая зависимость твердости от толщины листа на рис.11, можно увидеть, что твердость уменьшается от краев к середине образца. Уменьшение твердости к середине образца сохраняется и при деформации растяжения. Области с наименьшей твердостью располагаются посередине толщины листа, а ближе к краям твердость увеличивается.

Для технологических расчетов представляются значимые данные о предварительной накопленной в листе де-

формации [24-26]. Для ее определения можно воспользоваться методом твердости, предложенным Г.Д. Делем в своей работе [26], который показал взаимосвязь твердости и накопленной материалом деформации. Подобная взаимосвязь применялась в работе [5], где авторы, аппроксимируя данные для стали с содержанием углерода 0,08%, получили зависимость интенсивности деформации материала от твердости

$$\varepsilon = \frac{HV}{260} - 0,44. \quad (8)$$

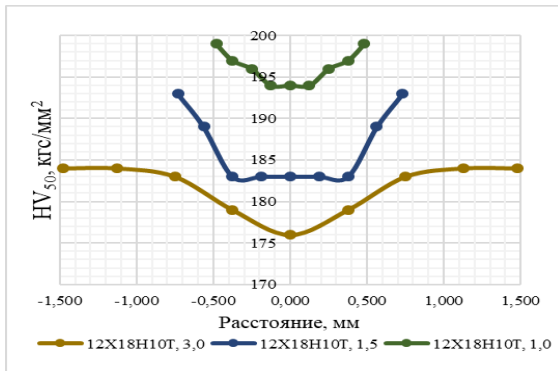


Рис. 11. Распределения микротвердости по толщине материала при толщинах листа 1мм, 1,5мм и 3 мм

Для построения зависимости интенсивности накопленной деформации от твердости применялись данные по растяжению прутка диаметром 20 мм. Измерялась микротвердость данного материала в отожженном и растянутом состоянии до деформации 20%.

В процессе замеров при нагрузке в 50 г у отожженного образца было выявлено среднее значение микротвердости порядка 170 единиц, а у деформированного среднее значение составило 254. Считая, что в данном интервале зависимость интенсивности деформации от твердости линейная, можно написать уравнение для определения накопленной деформации для материала 12X18H10T

$$\varepsilon = \frac{HV}{420} - 0,41 \quad (9)$$

о данной формуле можно определить накопленную деформацию по толщине листа, как среднюю, так и в разных его частях.

Таблица 5

Зависимость распределения накопленной деформации в тонколистовом материале 12X18H10T

	s=1	s=1,5	s=3
Средняя деформация в листе ε_0	0,057	0,035	0,019
Деформация на краю листа ε_0	0,064	0,050	0,028
Деформация в центре листа ε_0	0,052	0,026	0,009

Следует отметить, что в статье [5] приводится микротвердость стали 08 при нагрузке в 100 г, а в данном исследовании распределение твердости по толщине полосы проводилось на нагрузке в 50 г. В связи с этим данные формулы нельзя сравнивать по абсолютным значениям. Однако сопоставление формул для стали 08 и 12X18H10T показывает сходство тенденций их применения для рассматриваемых материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования доказано, что свойства материала 12X18H10T зависят от его толщины. Представлены зависимости изменения параметров кривой упрочнения с увеличением толщины материала. Приведены данные об изменении твердости стальных листов по толщине.

Установлено, что с увеличением толщины материала средняя твердость стали становится ниже. Приведены графики, показывающие, что материал по толщине неоднороден, так как твердость материала неодинакова по его сечению. Наиболее твердые слои находятся на границе с поверхностью листа, а ближе к центру твердость снижается. Для повышения точности расчетов рекомендуется учитывать данную особенность при определении технологических параметров процессов листовой штамповки.

ЛИТЕРАТУРА

- Алдунин А.В. Исследование распределения пластической деформации по толщине стальных полос / А.В. Алдунин, А.В. Шумеев // Технология машиностроения и материалы. Известия МГТУ «МАМИ». – № 4(22). – 2014. – Т. 2.
- Алдунин А.В. Исследование, разработка и внедрение эффективных технологий производства полос и лент из стали и сплавов цветных металлов с заданными структурой и свойствами: автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Москва, 2011. – 40 с.
- Путноки А.Ю. Структура, распределение элементов и свойства горячекатаной листовой низкоуглеродистой стали 08 ПС / А.Ю. Путноки, В.Т. Тилик, В.Г. Иванченко и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2009. – Вып. 20. – С. 196-205.
- Belousov V.B. How the material thickness affects 0.08% carbon cold-rolled sheet steel / V.B. Belousov, S.A. Tipalin, Y.G. Kalpin // Solid State Phenomena. – 2020. – Vol. 299. – P. 409-417.
- Tipalin S.A. Testing the cross-sectional microhardness in sheets with A 0.08% carbon concentration / S.A. Tipalin, V.B. Belousov, S.I. Lyubetskaya // Solid State Phenomena. – 2021. – Vol. 316. – P. 269-275.
- Муравьев В.В. Влияние анизотропии механических свойств тонколистового стального проката на информативные параметры волн Лэмба / В.В. Муравьев, О.В. Муравьева, Л.В. Волкова // Сталь. – 2016. – №10. – С. 75-79.
- Цветков Д.С. Влияние малых пластических деформаций при правке на механические свойства штрипсового проката / Д.С. Цветков, А.М. Корчагин, В.В. Михеев и др. // В сборнике: Научно-технический прогресс в черной металлургии. I Международная научно-техническая конференция. – 2013. – С. 382-390.
- Типалин С.А. Определение накопленной деформации в процессе выдавливания технологической канавки / С.А. Типалин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2013. – №8. – С.22-24.
- Шпунькин Н.Ф. Исследование свойств многослойных листовых материалов / Н.Ф. Шпунькин, С.А. Типалин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2013. – №1. – С.28-31.
- Бондарев А.Б. Листы из нитинола, тонкие, крупногабаритные: Свойства и структура / А.Б. Бондарев //

Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). – 2015. – №4-3 (13). – С. 132-134.

11. Шаталов Р.Л. Распределение обезуглероженного слоя и твердости сосудов из стали 50 после горячей штамповки на прокатно-прессовой линии / Р.Л. Шаталов, С.А. Типалин, В.А. Медведев // Черные металлы. – 2020. – №5. – С. 26-30.

12. Kalpin Yu.G. The study of stamping rod tube parts using eccentrically located head / Yu.G. Kalpin, Yu.K. Filippov, S.A. Tupalin, A.G. Zaitsev // ChernyeMetally. – 2019. – №7. – P. 41-46.

13. Kalpin Yu.G., Sample for mechanical testing of materials by plastic uniaxial upsetting / Yu.G. Kalpin, Yu.K. Filippov, S.A. Egorov, V.I. Mishin // ChernyeMetally. – 2019. – №8. – P. 62-66.

14. Tupalin S.A. Theoretical investigation of the bending process of the pre-strained metal sheet / S.A. Tupalin, M.A. Petrov, Y.A. Morgunov // Solid State Phenomena. – 2020. – Vol. 299. – P. 351-358.

15. Булдакова И.В. Распределение напряжений в образцах труб магистральных газопроводов со сварным соединением / И.В. Булдакова, Л.В. Волкова, В.В. Муравьев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2020. – Том 18, №1. – С. 4-8.

16.

http://www.rbmc.ru/sites/rbmc.ru/files/stal_jfe_series_le_c_cat.3_rus.pdf (дата обращения 12.01. 2021).

17. Коликов А.П. Влияние остаточных напряжений на качество изделий при холодной обработке давлением листовых заготовок / А.П. Коликов, Н.Л. Лисунец, Н.Ф. Шпунькин и др. // Известия МГТУ «МАМИ». 2011. – №2 (12).

18. Smith C.B. Mishra. Friction stir processing for enhanced low temperature formability / C.B. Smith, R.S. Mishra. Butterworth-Heinemann, 2014. – P. 11-124.

19. Song S. Relative contact pressure: dependence upon surface roughness and vickers microhardness / S. Song, M.M. Yovanovich // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. – 1988. – Vol. 2, No. 1. – P. 43-47.

20. Калпин Ю.Г. Сопротивление деформации и пластичность металлов при обработке давлением / Ю.Г. Калпин, В.И. Перфилов, П.А. Петров, В.А. Рябов, Ю.К. Филиппов. – М: МГТУ: «МАМИ», 2007. – 113 с.

21. Brunet M. Failure analysis of anisotropic sheet-metals using a non-local plastic damage model / M. Brunet, F. Morestin, H. Walter-Leberre // Journal of Materials Processing Technology. – 2005. – P. 457-470.

22. Van Houutte P. Anisotropic plasticity / P. Van Houutte, P. Hartley, I. Pillingar, C. Sturgess (eds). Numerical modeling of material deformation process: research, development and applications. – London: Springer-Verlag, 1992.

23. Hill R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals / R. Hill // Proc. R. Soc. Lond. Ser. A. – 1948. – 193.

24. Mott M.A. Micro-indentation hardness testing / Mott M.A. – Butterworths Scientific Publications, 1956.

25. ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. – М: Изд. Стандартов, 1993.

26. Дель Г.Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости / Г.Д. Дель. – М.: Машиностроение, 1971. – 200 с.

Investigation of Uneven Properties of Stainless Steel 12Kh18N10T Depending on the Thickness of the Sheet

Tipalin S.A., Belousov V.B., Shpunkin N.F.

Moscow Polytechnic University

Moscow, Russia

Tsa_mami@mail.ru, 1736113@rambler.ru, snf48@yandex.ru

Abstract. The authors conduct the research of the properties of a cold-rolled sheet made of corrosion-resistant steel 12X18H10T of a variable thickness. Further, they build hardening curves and defined their coefficients. The research identifies the patterns of the thickness impact on the nature of hardening of the sheet material 12X18H10T. The authors conduct the measurements of micro-hardness along the sheet thickness. The article confirms the suggestion that hardness in the sheet center decreases for various thicknesses. The authors further present a comparative analysis of hardness values distribution for the corrosion-resistant steel 12X18H10T and steel containing 0.08% of

carbon. It is revealed that lower material thickness alters the strength parameters of the process and increases the mean material hardness. The authors provide the hardening curves for various sheet thicknesses and the dependence of hardness distribution on the thickness of these sheets.

Keywords: sheet material, specimen expansion, micro-hardness, cumulative strain, change of properties, sheet mechanical characteristics, variability of properties by thickness.

Аспекты сверхпластичности металлов

Калпин Ю.Г., Типалин С.А.
Московский политехнический университет
г. Москва, Российская Федерация
kalpin@inbox.ru, tsa_mami@mail.ru

Рябов В.А.
МГТУ им. Н.Э. Баумана
г. Москва, Российская Федерация
v.a.gyabov@bmstu.ru

Аннотация. Проведена проверка предположения, что устойчивая деформация зависит от скорости деформации. При устойчивой деформации локальная деформация в слабом сечении приводит к упрочнению металла, эффект от которого превосходит эффект от уменьшения площади поперечного сечения, в результате чего деформация переходит на другие сечения, при этом возрастает деформирующая сила. При малых скоростях деформации, характерных для сверхпластичности, напряжение внутри зерен не может достигать больших значений. При горячей деформации имеется сопротивление внутривульчатой деформации, межзеренное скольжение и аккомодация границ зерен. Явление сверхпластичности исследуется и фиксируется при устойчивой и неустойчивой деформации, что приводит к противоречивым результатам. Численно показано, что зависимость сопротивления деформации от скорости устойчивой деформации увеличивается только в том случае, когда деформация осуществляется с ускорением, описано влияние упрочнения поверхностного слоя зерен металла на параметры деформирования.

Ключевые слова: сверхпластичность, фазовые превращения, деформация с ускорением, устойчивая пластическая деформация, неустойчивая распределенная деформация.

ВВЕДЕНИЕ

Сверхпластичностью называют высокие значения относительного удлинения при растяжении, характерные для горячей пластической деформации некоторых металлов в определенном температурно-скоростном интервале. В 1920 году Розенхайн [1], заметил, что холоднокатаный тройной эвтектический сплав цинк: медь: алюминий ведет себя иначе, чем обычные кристаллические материалы, и несколько лет спустя Совер [2], заметил, что железный стержень, скрученный в температурном градиенте, демонстрирует области легкого скручивания при температурах превращения. Термин “сверхпластичность” вошел в широкое употребление с 1945 года и возник в работах Бочвара [3, 4], как описание исключительно пластичного поведения различных цветных эвтектических и эвтектоидных сплавов. Интерес к сверхпластичности сопровождался критикой относительно того, в какой степени это явление можно рассматривать как необычное. Этот термин впервые появился в английской литературе в 1959 году, когда Лозинский и Симеонова описали результаты более сложной версии оригинального эксперимента Совера [5].

Промышленное значение имеет способность материала равномерно формоизменяться до очень высоких деформаций для изготовления сложных деталей с помощью операции сверхпластического формования. Получение деталей со сверхпластической деформацией в настоящее время используется для производства деталей, включая аэрокосмическую, автомобильную промышленность. Промышленный интерес представляют сплавы, обладающие

высокой прочностью при рабочих температурах и высокими технологическими свойствами.

ИЗВЕСТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

При исследовании явления сверхпластичности в ряде случаев не делают различия между деформацией устойчивой (сопровождающейся увеличением силы при растяжении) и неустойчивой распределенной, когда сила растяжения убывает, но нет ярко выраженной шейки на образце, то есть деформация не сосредоточивается в области, прилегающей к минимальному поперечному сечению, а продолжается в других сечениях, достаточно удаленных от минимального. Неустойчивая распределенная деформация характерна для случаев, когда сопротивление деформации металла описывается вязкой моделью, то есть сечения, которые больше минимального, продолжают деформироваться, хотя и с меньшей скоростью, чем минимальное. При неустойчивой деформации образец принимает коническую форму, которая видна невооруженным глазом (рис. 1). Наблюдаемые различными исследователями огромные относительные удлинения (так английский ученый С. Пирсон в 1934 г. на образцах из висмут-алюминиевого сплава установил, что при растяжении относительное удлинение без разрушения составляет 1950%, что соответствует истинной деформации $\epsilon=3,02$), а также внешний вид образцов после деформации (рис. 2) наводят на мысль о том, что сверхпластическая деформация в ее классическом виде является в основном устойчивой [6].

В настоящее время накоплен обширный экспериментальный материал об особенностях структурной сверхпластичности различных металлических сплавов. Большинство экспериментов проводится на цилиндрических образцах, подвергаемых одноосному растяжению;. В литературе различают фазовую сверхпластичность, проявляющуюся при фазовых превращениях в металле, и структурную, характерную для металлов и сплавов с мелкозернистой структурой [8–15].

В настоящее время сверхпластичность чаще всего ассоциируется с исключительно большим удлинением металлов [5]. Сверхпластичность - это способность поликристаллического материала проявлять обычно изотропным образом очень высокое удлинение при растяжении до разрушения [11].

А.П. Гуляев дает свое определение – “сверхпластичность – это особое состояние материала, способного к большой деформации” [16], не делает различия между понятиями “пластичность” и “сверхпластичность” и для изучения явления сверхпластичности использует результаты испытания свойств металла при кручении цилиндрических образцов, таким образом, в публикациях А.П. Гуляева речь идет о пластичности. В теории “субкритической сверхпластичности” А.П. Гуляева основным критерием проявления данного феномена является наличие фазовых превращений. Хорошо известно, что пластичность углеродистых и инструментальных легированных сталей

увеличивается с ростом температуры испытаний до начала перлитно-аустенитного превращения, а затем, при появлении новой фазы, падает. Субкритической сверхпластичностью автор называет максимум пластичности перед началом фазового превращения. Некоторые исследователи дают такое объяснение явления субкритической сверхпластичности: металл “предчувствует” начало фазового превращения и проявляет высокую пластичность. Аномального поведения металла в повышении пластичности с ростом температуры испытания нет: это явление характерно для всех металлов и сплавов (естественно, при отсутствии фазовых превращений) и объясняется интенсификацией тепловых движений атомов в кристаллической решетке.

Многие исследователи полагают, что устойчивая деформация увеличивается, если сопротивление деформации прямо зависит не только от величины деформации, но и от скорости деформации [1, 17–22]. Проверим это предположение.



Рис. 1. Образец из титанового сплава ВТ3-1 с исходной неравномерностью диаметра поверхности рабочей части образца в виде кольцевых проточек:
а – до деформации; б – после деформации в состоянии сверхпластичности [7]

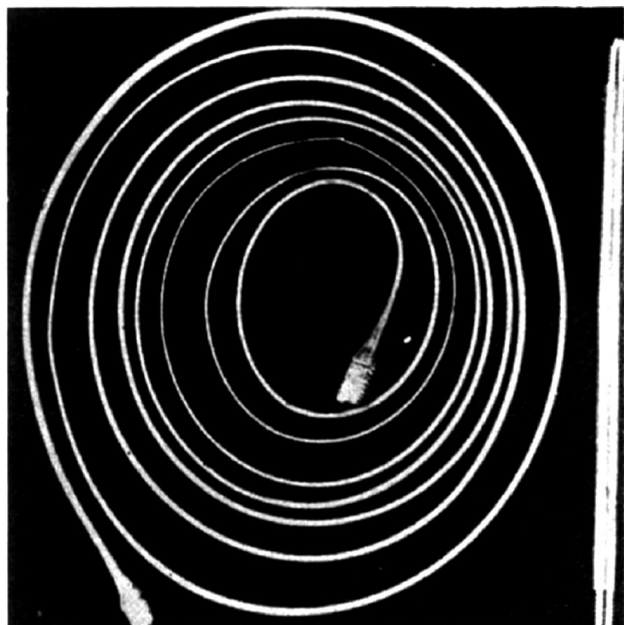


Рис. 2. Образец после пластической деформации в состоянии сверхпластичности [6]

ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

Для устойчивой деформации характерно то, что локальная деформация в геометрически или физически слабом сечении приводит к упрочнению металла, эффект от которого превосходит эффект от уменьшения площади поперечного сечения, в результате чего деформация перебрасывается в другие сечения, а деформирующая сила P при этом возрастает, т.е. выполняется условие:

$$\frac{dP}{d\varepsilon} \geq 0, \quad (1)$$

где ε – линейная деформация вдоль оси образца. Из этого неравенства следует, что условие устойчивой деформации может быть представлено в виде:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \geq \sigma \quad (2)$$

где σ – нормальное напряжение в поперечном сечении образца.

Если принять модель сопротивления деформации для сверхпластичности [7]:

$$\sigma = A\varepsilon^n \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^m, \quad (3)$$

где A , m , n , $\dot{\varepsilon}$ – коэффициенты, то условие (1) принимает вид:

$$n\dot{\varepsilon} + m \frac{\varepsilon \ddot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}} - \varepsilon \dot{\varepsilon} \geq 0. \quad (4)$$

Отсюда устойчивая деформация ε_y определяется формулой:

$$\varepsilon_y = \frac{n\dot{\varepsilon}^2}{\dot{\varepsilon}^2 - m\ddot{\varepsilon}}. \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что при зависимости сопротивления деформации от скорости, устойчивая деформация увеличивается только в том случае, когда деформация осуществляется с ускорением.

Между тем большинство машин для испытания на растяжение имеет постоянную скорость деформирования, и при растяжении образцов скорость деформации уменьшается.

Если представить себе, что устойчивая деформация может быть очень большой, то зависимость напряжения от деформации при упрочнении должна описываться экспоненциальной функцией:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^\varepsilon, \quad (6)$$

где σ_0 – напряжение при $\varepsilon=0$.

При холодной деформации реальных металлов такой закон упрочнения не встречается.

Впервые зависимость напряжения растяжения от деформации, близкую к экспоненциальной, при растяжении свинцово-оловянистых сплавов при комнатной температуре и постоянной скорости деформации наблюдал и описал Т. Седлецки (рис. 3) [17]. Однако он не дал какого-либо объяснения и математической интерпретации обнаруженного им явления.

Многие исследователи обобщают механизм деформации в виде реологических моделей [13]. Установить зависимость изменения напряжения растяжения от деформации можно на основе универсальной реологической модели сопротивления горячей деформации (рис. 4) [18].

В этой модели (рис. 4) элемент 1 описывает сопротивление внутриверенной деформации, сопровождающейся в условиях горячей деформации упрочнением (за счет увеличения плотности дислокационных барьеров) и разупрочнением (за счет возврата и рекристаллизации). Элемент 2 описывает межзеренное скольжение и характе-

ризуется вязкое поведение горячего металла. Межзеренное скольжение не может протекать без аккомодации границ зерен, которое описывает элемент 3.

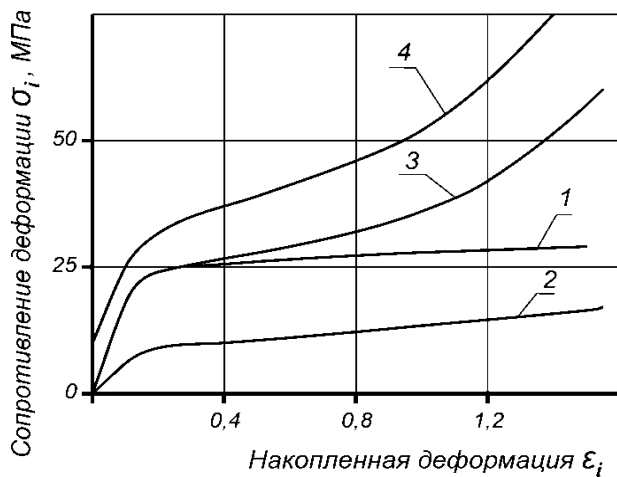


Рис. 3. Кривые упрочнения свинцово-оловянистого сплава при разных скоростях деформации: 1 – 10^{-3} с^{-1} по длине образца; 2, 3, 4 – соответственно $10^{-3.5}$, 10^{-3} , $10^{-2.5} \text{ с}^{-1}$ по сечению образца

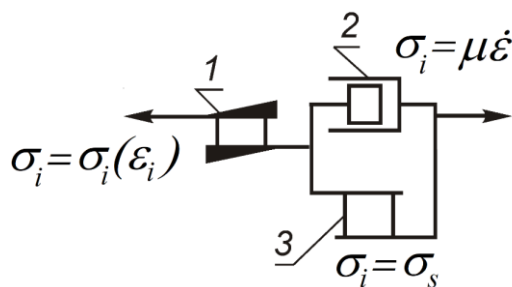


Рис. 4. Универсальная реологическая модель сопротивления деформации

При малых скоростях деформации, характерных для сверхпластичности, напряжение внутри зерен не может достигать больших значений и, очевидно, меньше предела текучести деформируемого металла. Поэтому механизм элемента 1 выключен. Это подтверждается металлографическими исследованиями И.И. Новикова [23] и др. исследователей.

Напряжение, создаваемое элементом 2, резко снижается при уменьшении скорости деформации. В первом приближении примем, что оно близко к нулю. Тогда главным механизмом деформации, определяющим напряжение и силу растяжения, оказывается элемент 3 – аккомодация границ зерен, осуществляемая за счет пластической деформации приграничных областей зерен металла, подвергающихся деформации.

Эффект сверхпластичности проявляется при мелкозернистой структуре материала, определенной скорости и температуре. Характерная особенность материала с большим количеством мелких зерен заключается в значительном увеличении суммарной площади поверхности зерен и увеличенной доле объема межзеренного пространства по сравнению с крупнозернистыми материалами. Имеется различное сопротивление деформации у адгезионно скрепленных тонких слоев на границах крупных зерен и специфического пограничного слоя вокруг шарообразных зерен мелкозернистой структуры.

Создание новых высокотехнологичных материалов с повышенными механическими свойствами может проводиться с учетом формирования не только мелкозернистой структуры, но и свойств составляющих локальных межзеренных компонентов сплава с учетом их взаимодействия при деформации.

При охлаждении из расплава, в первую очередь начинают образовывать кристаллическую решетку компоненты с высокой температурой плавления и мелкозернистая структура формируется при наличии увеличенного количества центров кристаллизации. В итоге, в межзеренном пространстве оказываются компоненты, застывающие в последнюю очередь по причине более низкой температуры плавления. Эффект сверхпластичности в мелкозернистом сплаве проявляется при нагреве до температуры, при которой плавящиеся компоненты межзеренного пространства выполняют роль смазки, облегчая перемещение более тугоплавких компонентов, которые могут находиться на ранних стадиях начала рекристаллизации. При формоизменении происходит дополнительное повышение температуры за счет межзеренного трения при перемещении. Деформация более податливого межзеренного пространства конкурирует с накапливающимися деформациями внутри кристаллической решетки формоизменяемых зерен. Скопления дислокаций межзеренных фракций на границах зерен приводят к ротационной деформации материала между зернами со сдвигом и скольжением вокруг неподвижных очагов скопившихся дислокаций на стыках зерен.

Перекачивание не только зерен, но и укрупненных фрагментов межзеренного пространства облегчает перемещение, снижая энергию сопротивления действующей силе. Энергия деформации кристаллической структуры зерен значительно выше, чем энергия, затрачиваемая на перемешивание податливой вязкой среды разогретого межзеренного материала. Процессы рекристаллизации в зернах протекают при более высоких температурах по сравнению с межзеренным материалом.

По мере прохождения каждого зерна вблизи соседних зерен, деформируемый слой испытывает деформационное воздействие от контактирующих зерен. Таким образом, приграничный упрочненный слой в зерне не только все больше упрочняется, но и становится толще: упрочнение распространяется в глубь зерна, т.е. увеличивается физическое поперечное сечение, участвующее в формировании растягивающей силы.

Попытаемся описать протекающие в растягиваемом образце явления математическими зависимостями.

Пусть напряжение течения изменяется по степенному закону

$$\sigma = \sigma_0 \varepsilon^n, \quad (7)$$

а физическое поперечное сечение F – изменяется по экспоненциальному закону:

$$F = F_1 (1 - e^{-c\varepsilon}), \quad (8)$$

где F_1 – геометрическое поперечное сечение образца;

$$F_1 = F_0 e^{-\varepsilon} \quad (9)$$

F_0 – начальная площадь поперечного сечения; σ_0 , n , c – коэффициенты.

Примем $n = 0,2$ и $\sigma_0 = 20 \text{ МПа}$. Деформацию в упрочняющемся слое примем равной средней деформации по сечению растягиваемого образца.

Выполнив расчеты для $c=0,1$, получаем следующие значения, приведенные в табл. 1.

Зависимость физического поперечного сечения F , растягивающей силы P , напряжения течения S в деформированном слое и среднего по сечению напряжения течения σ при этих значениях от деформации ϵ и коэффициента c показана на рис. 5–7 (начальная площадь поперечного сечения образца принята равной единице).

Таблица 1
Параметры деформации, рассчитанные по универсальной модели сопротивления горячей деформации

$c = 0,1$								
ϵ	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,4	1,6	2
F_1	0,818	0,67	0,549	0,445	0,368	0,246	0,202	0,135
F	0,024	0,032	0,037	0,039	0,039	0,035	0,032	0,025
S	14,49	16,65	18,06	19,13	20,00	21,39	21,97	22,97
P	0,353	0,549	0,676	0,746	0,774	0,742	0,7	0,594
σ	0,432	0,819	1,232	1,662	2,103	3,008	3,468	4,394

Подобные расчеты проведены и для других значений коэффициента c .

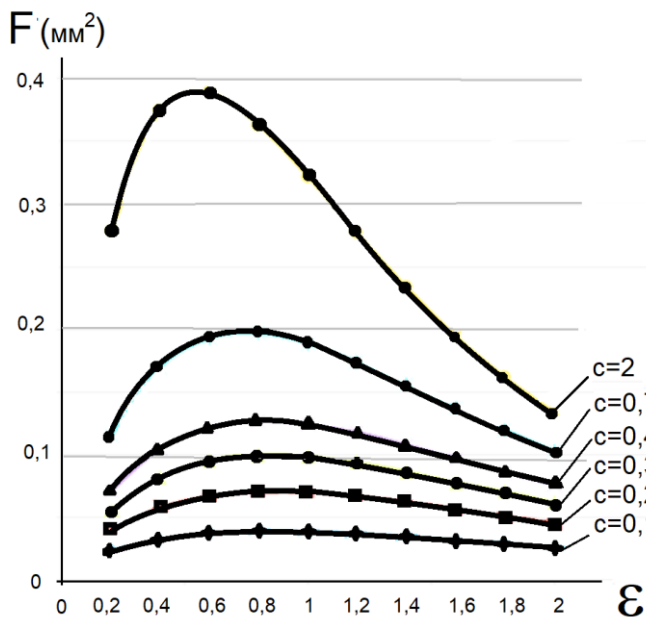


Рис. 5. Зависимость физической площади F от деформации ϵ

Из полученных графиков видно, что упрочнение поверхностного слоя зерен металла существенно влияет на параметры деформирования и устойчивая деформация возрастает до значений 0,5–1,5, особенно при малых значениях коэффициента c .

По мере прохождения каждого зерна вблизи соседних зерен деформируемый слой испытывает воздействие, оказываемое на него ими. Таким образом, приграничный упрочненный слой не только все больше упрочняется, но и становится толще: упрочнение распространяется в глубь зерен, т.е. увеличивается физическое поперечное сечение, участвующее в формировании растягивающей силы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена проверка предположения, что устойчивая деформация зависит от скорости деформации. При устойчивой деформации локальная деформация в слабом сече-

нии приводит к упрочнению металла, эффект от которого превосходит эффект от уменьшения площади поперечного сечения, в результате чего деформация переходит на другие сечения, при этом возрастает деформирующая сила. Численно показано, что зависимость сопротивления деформации от скорости устойчивой деформации увеличивается только в том случае, когда деформация осуществляется с ускорением, описано влияние упрочнения поверхностного слоя зерен металла на параметры деформирования. Установлено, что зависимость сопротивления деформации от скорости устойчивой деформации увеличивается только в том случае, когда деформация осуществляется с ускорением.

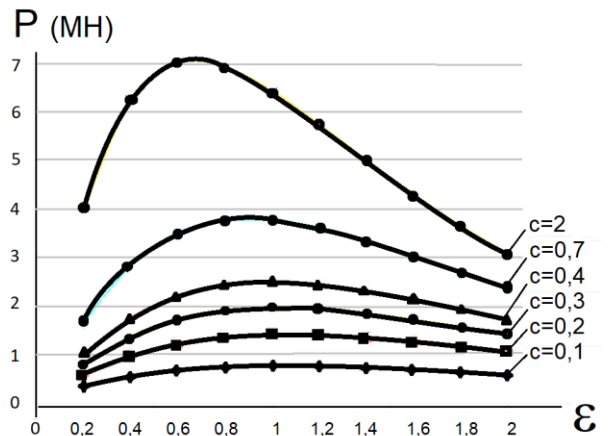


Рис. 6. Зависимость силы P от деформации ϵ

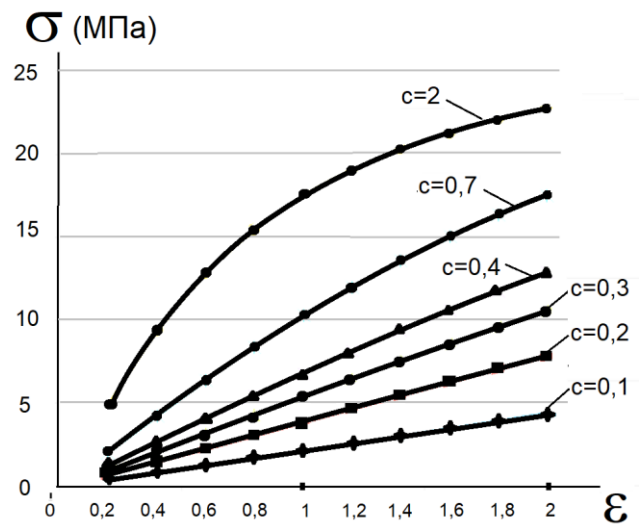


Рис. 7. Зависимость среднего по сечению напряжения течения σ от деформации ϵ

ЛИТЕРАТУРА

1. Rosenhain W. Zinc alloys with aluminum and copper / W. Rosenhain, J.L. Naughton, K.E. Bingham // J. Inst. Met. 1920. – Vol. 23. – P. 261-324.
2. Sauveur A. Iron age / A. Sauveur // 1924. – Vol. 113. – P. 581.
3. Бочвар А.А. Сверхпластичность сплава Zn-22% Al / А.А. Бочвар, З.А. Свидерская // Изв. АН СССР ОНТ. – 1945. – № 9. – С. 821-824.

4. Бочвар А.А. Сверхпластичность металлов и сплавов / А.А. Бочвар. – Москва: АН СССР. Ин-т металлургии им. А. А. Байкова, 1969. – 37 с.
5. Langdon T.G. Mechanism of superplastic flow / T.G. Langdon // Superplasticity: 60 Years after Pearson. Ed. by N. Ridley. – London: The Institute of Materials, 1995. – P. 9-24.
6. Pearson C.E. The viscous properties of extruded eutectic alloys of lead tin and bismuth-tin / C.E. Pearson // Journ. Inst. of Metals. – 1934. – №54. – P. 111-123.
7. Смирнов О.М. Обработка металлов давлением в состоянии сверхпластичности / О.М. Смирнов. – М.: Машиностроение, 1979. – 184 с.
8. Padmanabhan K.A. Superplasticity / K.A. Padmanabhan, G.J. Davis. – Berlin: Springer-Verlag, 1980.
9. Hall E.O. The deformation and ageing of mild steel: III Discussion of results / E.O. Hall // Proc. Phys. Soc. Lond. – 1951. – Vol. 64 (9). – P. 747-753. doi:10.1088/0370-1301/64/9/303.
10. Maehara Y. Superplasticity of ferrite/Austenite Stainless Steels Transactions / Y. Maehara // ISIJ. – 1985. – Vol. 25.
11. Perez-Prado M.-T. Fundamentals of creep in metals and alloys / M.-T. Perez-Prado, M.E. Kassner. 2015. – Third Edition.
12. Kawasaki M. Principles of superplasticity in ultrafine-grained materials / M. Kawasaki, T.G. Langdon // Journal of Materials Science. – 2007. – Vol. 42. – P. 1782-1796.
13. Liu C. Rheological law and mechanism for superplastic deformation of Ti–6Al–4V / C. Liu, G. Zhou, X. Wang // Materials. – 2019. – Vol. 12 (21).
14. Кайбышев О.А. Научные основы, достижения и перспективы сверхпластической деформации / О.А. Кайбышев. – Уфа: Гилем, 2000. – 149 с.
15. Кайбышев О.А. Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов / О.А. Кайбышев, Ф.З. Утяшев. – М.: Наука, 2002. – 438 с.
16. Гуляев А.П. Сверхпластичность стали / А.П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1982. – 56 с.
17. Седлецки Т. Локализация пластической деформации и ее влияние на предельное формоизменение при одноосном растяжении и при раздате конца труб: дис. ... канд. техн. наук. – М.: МАМИ, 1984. – 160 с.
18. Калпин Ю.Г. Сопротивление деформации и пластичность при обработке металлов давлением / Ю.Г. Калпин, В.И. Перфилов, П.А. Петров, В.А. Рябов, Ю.К. Филиппов. – М.: Машиностроение, 2011. – 243 с.
19. Гвоздев А.Е. Деформирование и структурообразование быстрорежущих сталей в условиях сверхпластичности: автореф. дисс. ... докт. техн. наук. – Тула: ТГУ, 1997. – 30 с.
20. Гвоздев А.Е. Из истории эффекта сверхпластичности металлических систем / А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, А.Н. Чуканов и др. // В сб.: Алгебра, теория чисел и дискретная геометрия: современные проблемы, приложения и проблемы истории. Материалы XVI Международной конференции, посвященной 80-летию со дня рождения профессора Мишеля Деза. – 2019. – С. 332-336.
21. Гвоздев А.Е. Состояние сверхпластичности - основа ресурсосберегающих технологий обработки высоколегированных сталей и труднодеформируемых сплавов / А.Е. Гвоздев, С.Н. Кутепов, А.А. Калинин // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2018. – № 9.
22. Шмаков А.К. Влияние средней скорости движения свободной части заготовки на процесс пневмотермической формовки в режиме сверхпластичности / А.К. Шмаков, В.В. Мироненко, К.К. Киришина, А.С. Станиславчик, В.В. Котов // Металлург. – 2013. – № 1. – С. 24-26.
23. Новиков И.И. Сверхпластичность металлических материалов с ультрамелкозернистой структурой / И.И. Новиков, В.К. Портной // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1977. – № 8. – С. 28-34.

Aspects of Superplasticity of Metals

Kalpin Yi.G., Tupalin S.A.
 Moscow Polytechnic University
 Moscow, Russia
 kalpin@inbox.ru, tsa_mami@mail.ru

Ryabov V.A.
 Bauman Moscow State Technical University
 Moscow, Russia
 v.a.ryabov@bmstu.ru

Abstract. The assumption that stable deformation depends on the strain rate is verified. In case of stable deformation, local deformation in a weak cross-section leads to hardening of the metal. Its effect exceeds the effect of reducing the cross-sectional area, as a result of which the deformation affects other sections as well, while the deforming force increases. At low strain rates that are characteristic of superplasticity, the strain inside the grains cannot be really great. During hot deformation, there is resistance to intragrain deformation, intergrain sliding, and accommodation of grain boundaries. The phenomenon of superplasticity is investigated and fixed under stable and unstable de-

formation, which leads to contradictory results. It is shown numerically that the function of deformation resistance and stable deformation rate increases only when the deformation is carried out with acceleration. The effect of hardening of the surface layer of metal grains on the deformation parameters is described.

Keywords: superplasticity, phase transformations, accelerated deformation, stable plastic deformation, unstable distributed deformation.

Влияние термической обработки на структуру и свойства цементованного слоя лап буровых трехшарошечных долот

Петрова О.Н., Беликов С.В.

Уральский Федеральный Университет (УрФУ)
Екатеринбург, Россия
petrova.olga@urfu.ru, s.v.belikov@urfu.ru

Слукин Ю.В.

ОАО «Уралбурмаш»
Верхние Серги, Россия
y.slukin@vbm.ru

Аннотация. Исследовано влияние температурно-временных параметров термической обработки на структуру и свойства цементованного слоя и сердцевины стали 19ХГНМА. Методом дилатометрического анализа определены критические точки: $A_{c1} = 740$ °С, $A_{c3} = 835$ °С. Установлено, что после цементации при 940 °С, подстуживания до 890 °С с охлаждением в масле, закалки при 790 °С и отпуска при 180 °С формируется мартенситная структура цементованного слоя с равномерно-распределенными карбидами и наименьшим количеством остаточного аустенита. При этом твердость цементованного слоя плавно снижается от поверхности вглубь, пропорционально снижению концентрации углерода и составляет 60–50 HRC. Разработан технологический процесс термической обработки лап долот, изготовленных из цементованной стали 19ХГНМА, обеспечивающий в структуре наличие минимального количества остаточного аустенита, отсутствие карбидной сетки, и сочетание оптимальных механических свойств, что доказано проведением реального эксперимента на производстве. Температурные условия проведения цементации, закалки и низкого отпуска рекомендованы для производства лап шарошечных долот.

Ключевые слова: лапа долота, цементация, концентрация углерода, низкоуглеродистая малолегированная сталь, микроструктура, остаточный аустенит, механические свойства

ВВЕДЕНИЕ

При бурении скважин на нефть и газ в общем комплексе оборудования долото имеет важное значение, так как является инструментом, непосредственно разрушающим горную породу и формирующим ствол скважины. В связи с этим повышение эффективности и долговечности буровых долот является актуальной задачей [1, 2].

В работе [3] показано, что одной из причин преждевременного выхода долот из строя является разрушение подшипников скольжения в опоре. Следует отметить, что на долговечность рабочих поверхностей опоры долота существенное влияние оказывает цементация [4–6].

Как показывают исследования [7–9] наиболее эффективным и экономически выгодным методом насыщения сталей углеродом является газовая цементация.

Однако авторами работ [10–13] установлено, что формирование структуры сталей происходит на всех стадиях обработки, и поэтому окончательные свойства деталей зависят от правильного выбора сталей, насыщающей атмосферы, оборудования, температурно-временных и металлургических параметров технологических операций.

В связи с этим в практике работы предприятий в ряде случаев возникает необходимость корректировать процесс

цементации и последующей термической обработки для получения оптимальной структуры слоя и основы стали [10].

Этим и определяется актуальность данной работы, посвященной повышению эксплуатационных характеристик лап буровых долот.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сложное строение диффузионного слоя после термической обработки, состоящее из трех слоев: заэвтектоидного, эвтектоидного и доэвтектоидного, обусловлено плавным снижением концентрации диффундирующего элемента от поверхности к сердцевине детали [14–17]. На данный момент нет единого мнения по оптимальному содержанию углерода в цементованном слое [18, 19]. Концентрацию углерода на поверхности цементованного слоя рекомендуют устанавливать в пределах 0,8–1,2 % С. Нижний предел обусловлен уровнем контактной выносливости стали, верхний - хрупкостью и снижением усталостной прочности изделий.

В результате термической обработки цементованный слой должен иметь структуру мелкоигльчатого мартенсита и изолированных участков остаточного аустенита 15–20 % или мартенсита, остаточного аустенита и небольшого количества избыточных карбидов в виде глобул [15, 18, 20, 21]. Практика машиностроительных заводов показывает, что основными дефектами цементованных слоев, являются остаточный аустенит, избыточные глобулярные карбиды и карбидная сетка, полосчатость структуры, обезуглероживание, окисление границ зерен.

На качество закаленного цементованного слоя оказывают влияние операции и режимы окончательной термической обработки: нагрева и охлаждения при закалке, отпуска, обработки холодом.

Исследования влияния термической обработки после цементации показало, что устанавливать схемы термической обработки и параметры технологических операций необходимо экспериментальным путем, применительно к конкретным деталям, материалам, из которых они изготовлены, адаптировано производственным условиям: оборудованию, размерам садки, периодичностью.

Изучение влияния параметров термической обработки на структуру и свойства лап трехшарошечных долот после цементации представляет научный и практический интерес. Выбор оптимальной схемы процесса и температурно-временных параметров термической обработки обеспечит получение оптимального сочетания структурных составляющих и свойств цементованного слоя и сердцевины, и

как следствие этого, повышение эксплуатационных свойств (проходки) долот.

Наибольший практический интерес представляет возможность реализации выбранной схемы и режимов термической обработки в условиях реального производства.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материал исследования в данной работе – конструкционная малоуглеродистая низколегированная сталь 19ХГНМА состава, мас. %: 0,20 С; 0,86 Мн; 0,59 Сr; 0,57 Ni; 0,30 Si; 0,20 Мо; 0,004 V; 0,032 Al; 0,008 P; 0,006 S; 0,008 Ti; 0,010 W; 0,009 N₂, остальное – Fe.

Для определения критических точек фазовых превращений в стали использовали высокотемпературный dilatометр «Linseis L78» с горизонтальным расположением образцов, оснащенный 30 индукционным датчиком продольного перемещения Schaevitz HR 100 (МС).

Химико-термической обработке подвергались образцы круглого и квадратного сечений размерами Ø 35×80 мм и 38×38×80 мм. Образцы цементировались в проходной цементационной печи IPSEN мод. TQF-2-17-GRM в контролируемой атмосфере эндогаза с добавлением природного газа при температуре 940 °С в течение 15,5 часов. Затем охлаждались с температуры подсуживания 890 °С в масло. Закалка образцов производилась с повторного нагрева. Образцы нагревали в камерной лабораторной печи СНОЛ 120/12-И1 в течение 1,27 часа при температуре 760–810 °С с шагом 10 °С. Охлаждающая среда – масло.

На основании полученных результатов выбрали температуру закалки 790 °С и произвели с этой температуры закалку цементированных образцов, а затем низкий отпуск при температурах 160–220 °С в течение 2-х часов.

Концентрацию углерода определяли кулонометрическим методом на газоанализаторе модели АН-7529М по ГОСТ 12344.

Твердость поверхности измеряли на образцах по методу Роквелла по шкале “С” по ГОСТ 9013 при нагрузке 1471 Н (150 кгс). Прибор для измерения твердости соответствует ГОСТ 23677.

Для измерения градиента твердости на плоскошлифовальном станке послойно снималась стружка на требуемую глубину и производились измерения твердости методом Супер-Роквелла при малых нагрузках по ГОСТ 22975. Нагрузка на конический алмазный индентор 147 Н (15 кгс), HR15N. Числа твердости переводились в числа твердости по шкале HRC.

Микроструктуру изучали, используя оптический микроскоп Olimpus JX51. Количественную характеристику основных элементов микроструктуры: перлита, мартенсита, и карбидов производили на основании сопоставления структуры с эталонами соответствующих шкал по ГОСТ 8233.

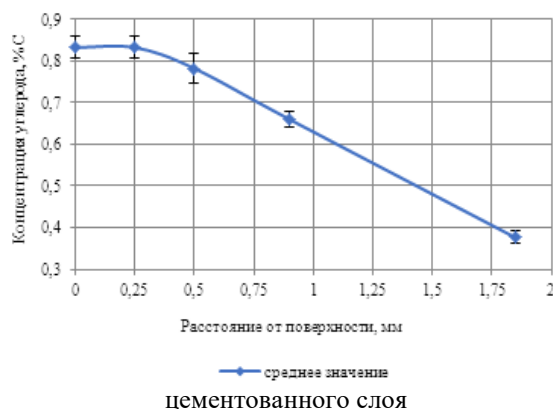
РСФА использовали для определения фазового состава стали после полной химико-термической обработки. Исследования проводили на дифрактометре Bruker D8 Advance в диапазоне углов дифракции $2\theta = 20\text{--}100^\circ$ в излучении $K\alpha$ Cu с шагом $0,05^\circ$ с использованием позиционно-чувствительного детектора LynxEye; общее время записи дифрактограммы 12 ч., эквивалентное время на шаг 4800 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для выбора режима термической обработки проведен dilatометрический анализ стали 19ХГНМА и определены:

- критические точки: $A_{c1} = 740^\circ\text{C}$, $A_{c3} = 835^\circ\text{C}$;
- температура начала бейнитного превращения $B_n = 560^\circ\text{C}$, температура конца бейнитного превращения $B_k = 420^\circ\text{C}$;
- температура начала мартенситного превращения $M_n = 390^\circ\text{C}$, температура конца мартенситного превращения $M_k = 270^\circ\text{C}$.

Свойства цементованного слоя в большой степени зависят от кривой распределения углерода по толщине слоя [7]. Сложное строение диффузионного слоя после термической обработки, состоящее из трех слоев: заэвтектоидного, эвтектоидного и доэвтектоидного, обуславливается снижением концентрации диффундирующего элемента от поверхности к сердцевине детали [12, 17, 22]. Кривая распределения углерода по толщине слоя “рис. 1” иллюстрирует плавное снижение концентрации углерода от 0,83 % С у поверхности до 0,38 % С на полной глубине цементованного слоя. Верхнее значение концентрации соответствует рекомендуемому в литературе значению для конструкционных сталей 0,8–1,1 % С. Как следствие этого изменяются структура и свойства [22].



Свойства стали (детали) определяет конечная термическая обработка, принятая на том или другом заводе [15]. Анализ микроструктур показал, что закалка с температур 760–770 °С не исправляет перегрева сердцевины, поэтому получается достаточно крупнозернистая структура. С повышением температуры закалки уменьшается количество карбидов в цементованном слое, а количество аустенита увеличивается. Это происходит за счет перераспределения углерода в слое: растворение карбидов способствует обогащению аустенита углеродом. Таким образом, снижается температура критической точки M_n , а количество остаточного аустенита в закаленном слое увеличивается.

Авторы работ [23, 24] считают, что в формировании комплекса свойств деталей большое значение имеет микроструктура. Установлено, что наиболее благоприятная структура слоя и сердцевины стали 19ХГНМА формируется при температуре 790 °С. При этом слой состоит из мартенсита, равномерно распределенных избыточных карбидов и небольшого количества остаточного аустенита “рис. 2, а”. Структура сердцевины – нижний бейнит “рис. 2, б”.

Показано, что оптимальной температурой отпуска является 180–200 °С. При этом снижение твердости происходит в среднем на 4 единицы. Твердость всех отпущенных образцов находится в пределах 58–62 HRC.

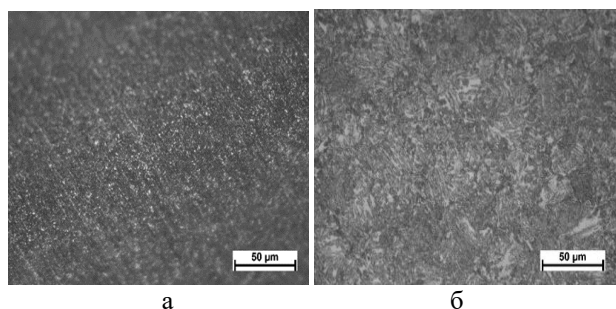


Рис. 2. Микроструктура стали 19ХГНМА после закалки а – цементованного слоя; б – сердцевины

Определен фазовый состав стали после полной химико-термической обработки. Количество остаточного аустенита в цементованном слое, определенное металлографическим и рентгеноструктурным фазовым анализом составляет $17,5 \pm 2,5$ %.

На основании анализа результатов разработана схема термической обработки “рис. 3”, которая позволяет получить в слое оптимальное сочетание структуры и свойств, является экономичной и технологически обоснованной, что доказано проведением реального эксперимента на производстве.

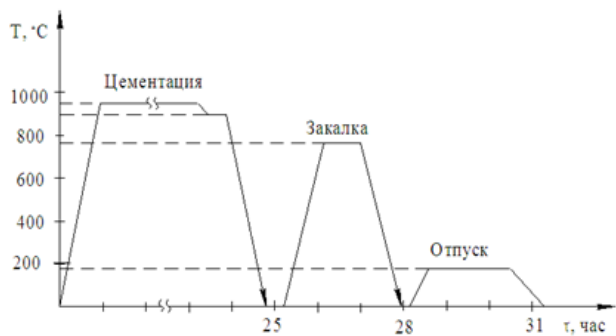


Рис. 3. Схема химико-термической обработки стали 19ХГНМА

Основные операции технологического процесса химико-термической обработки лап долот и температурно-временные параметры указаны в “табл. 1”.

Так как лапы после химико-термической обработки не подвергаются механической обработке, качество поверхностного слоя имеет важное значение. Именно от него зависит работа подшипникового узла долота в начале работы (при приработке). Основное механическое свойство лап долот – твердость.

Твердость поверхности после полной химико-термической обработки составила 61 HRC, сердцевины лапы долота 37 HRC. Микроструктура цементованного слоя – мартенсит, остаточный аустенит, избыточные карбиды “рис. 4, а”, микроструктура сердцевины – бейнит с небольшим количеством феррита “рис. 4, б”.

Результаты механических испытаний, проведенных на образцах стандартного сечения, отражены в “табл. 2”.

Предложенную схему термической обработки после цементации можно рекомендовать для применения в условиях производства деталей буровых долот.

Таблица 1
Режим химико-термической обработки лап долот 250,8 ТКЗ-ПВ

Операции термической обработки	Технологические параметры
1. Подготовительная	Нанесение антицементационной пасты на поверхности, не подлежащие цементации
2. Цементация	940 °С, эндогаз, природный газ, 22 часа
3. Первая закалка	С цементационного нагрева подстуживание 890 °С, охлаждение – масло
4. Мойка	Специальное моющее средство
5. Вторая закалка	790 °С (эндогаз, природный газ), 2,2 час Охлаждение – масло
6. Мойка	Специальное моющее средство
7. Низкотемпературный отпуск	180 °С, 3 часа (воздух)
8. Очистка	Дробь стальная

Таблица 2
Механические свойства сердцевины лапы долота 250,8 ТКЗ-ПВ

Марка стали	σ_r , МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²
19ХГНМА	760	840	16	25	150

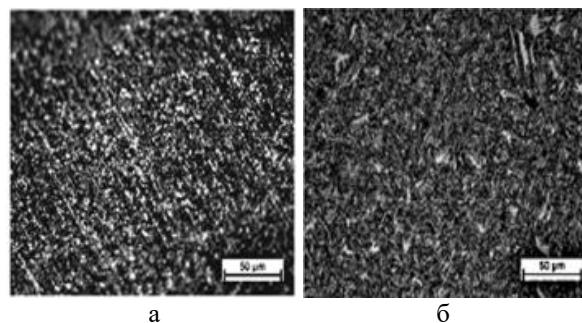


Рис. 4. Микроструктура лапы долота 250,8 ТКЗ-ПВ а – цементованного слоя; б – сердцевины

Выводы

1. Определены критические точки стали 19ХГНМА: $A_{c1} = 740$ °С, $A_{c3} = 835$ °С.

2. Исследована микроструктура стали 19ХГНМА, состоящая из мартенсита, остаточного аустенита и избыточных карбидов. Формирование данной микроструктуры достигается цементацией при 930 °С с подстуживанием до 890 °С, закалкой с температур 790–810 °С при охлаждении в масле и низком отпуске при температуре 180–220 °С.

Твердость цементованного слоя плавно снижается от поверхности вглубь, пропорционально снижению концентрации углерода и составляет 60–50 HRC. Твердость основы стали (сердцевины) зависит главным образом от химического состава стали и скорости охлаждения. При охлаждении стали 19ХГНМА с температуры закалки в масле твердость сердцевины составляет 20–22 HRC.

Количество остаточного аустенита в цементованном слое, определенное металлографическим и рентгеноструктурным фазовым анализом составляет $17,5 \pm 2,5$ %.

3. Предложена схема химико-термической обработки, которая позволяет получить в слое оптимальное сочетание структуры и свойств, являющаяся экономичной и технологически обоснованной, что доказано проведением реального эксперимента на производстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Papsheva N.D. Increasing durability details of drill bits / N.D. Papsheva, O.M. Akushskaya // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. – 2017. – Vol. 5. – P. 24-26.

2. Виноградов В.Н. Долговечность буровых долот / В.Н. Виноградов [и др.]. – М.: Недра, 2009. – 257 с.

3. Блинков О.Г. Анализ процессов разрушения подшипников скольжения шарошечных буровых долот / О.Г. Блинков, Н.И. Сердюк // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. – 2017. – № 4. – С. 15-17.

4. Панченко А.Е. Повышение надежности бурового долота / А.Е. Панченко [и др.] // *Современные фундаментальные и прикладные исследования*. – 2017. – № 3 (26). – С. 12-16.

5. Шестаков В.С. Расчет напряженно-деформированного состояния шарошечного бурового долота / В.С. Шестаков [и др.] // *Теория и практика мировой науки*. – 2017. – № 11. – С. 50-53.

6. Комбаев К.К. Инновации повышения микротвердости стали бурового долота электронно-плазменной закалкой / К.К. Комбаев, Б.А. Токтар // *Достижения вузовской науки 2018: В сб. ст. V Международного научно-технического конкурса*. (Пенза, 20 октября 2018 г.). – Пенза, 2018. – С.17-22.

7. Лахтин Ю.М. Химико-термическая обработка металлов: учеб. пос. / Ю.М. Лахтин, Б.Н. Арзамасов. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.

8. Кирщина Е.И. Структура и свойства поверхностных слоев стали 16CRMNS5, упрочненных цементацией / Е.И. Кирщина, Е.П. Поздняков // *Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: XVII Международная конф.* (Гомель, 27-28 апреля 2017 г.). – Гомель, 2017. – С. 111-114.

9. Балтер М.А. Упрочнение деталей машин. Повышение усталостной и контактной прочности / М.А. Балтер. – М.: Машиностроение, 1968. – 196 с.

10. Герасимова Н.С. Химико-термическая обработка сталей и сплавов: учеб. пос. / Н. С. Герасимова. – Калуга: Издательство МГТУ, 2017. – 48 с.

11. Богданов С.А. Качество цементованных деталей бурового оборудования при различных технологиях химико-термической обработки / С. А. Богданов [и др.] // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2003. – № 2. – С. 220-222.

12. Валько А.Л. Определение толщины цементованного слоя хромоникелевых сталей / А.Л. Валько [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2012. – № 3S (66). – С. 106-109.

13. Астащенко В.И. Совершенствование технологии цементации зубчатых деталей / В.И. Астащенко [и др.] // *Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли: докл. Всероссийской конф.* (Казань, 08-10 августа 2018 г.). – Казань, 2018. – С. 116-119.

14. Циммерман Р. Металлургия и металловедение: справочник / Р. Циммерман, К. Гюнтер. – М.: Металлургия, 1982. – 480 с.

15. Лахтин Ю.М. Материаловедение: учеб. / Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. – М.: ЭКОЛИТ, 2011. – 528 с.

16. Бернштейна М.Л. Металловедение и термическая обработка стали Т. II Основы термической обработки / М.Л. Бернштейна, А.Г. Рахштадт. – М.: Металлургия, 1983. – 368 с.

17. Райцес В.Б. Технология химико-термической обработки на машиностроительных заводах / В.Б. Райцес. – М.: Машиностроение, 1965. – 269 с.

18. Минкевич А.Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / А.Н. Минкевич. – М.: Машиностроение, 1965. – 494 с.

19. Башнин Ю.А. Технология термической обработки стали: учеб. / Ю.А. Башнин, Б.К. Ушаков. – М.: Металлургия, 1986. – 424 с.

20. Скрыбин М.Д. Исследование свойств цементованного слоя хромоникелевых сталей / М.Д. Скрыбин, А.А. Хлыбов // XVIII международная научно-техническая уральская школа-семинар металлургов – молодых ученых "Уральская школа молодых металлургов". (Екатеринбург, 21-23 октября 2017 г.). – Екатеринбург, 2017. – С. 17-20.

21. Майсурадзе М.В. Структурообразование при термической обработке стали 25Г2С2Н2МА / М.В. Майсурадзе [и др.] // *Инновации в материаловедении и металлургии: материалы IV Международной интерактивной научно-практической конференции*. (Екатеринбург, 15-18 декабря 2014 г.). – Екатеринбург, 2015. – С. 314-316.

22. Сагарадзе В.С. Повышение надежности цементуемых деталей. / В.С. Сагарадзе. – М.: Машиностроение, 1975. – 216 с.

23. Корецкий Я. Цементация стали / Я. Корецкий. – Л.: Судромгиз, 1962. – 232 с.

24. Степанов А.И. Особенности формирования структуры и комплекса механических свойств трубной низколегированной Cr-Mo-V стали после аустенизации в межкритическом интервале температур / А.И. Степанов [и др.] // *Сталь*. – 2014. – № 6. – С. 86-90.

Effect of Heat Treatment on the Structure and Properties of the Carburized Layer of the Legs of Three-Ball Drill

Petrova O.N., Belikov S.V.
URFU
Ekaterinburg, Russian Federation
petrova.olga@urfu.me, s.v.belikov@urfu.ru

Slukin Yu.V.
JSC "Uralburmash"
Verkhnie Sergi, Russian Federation
y.slukin@vbm.ru

Abstract. The effect of time-temperature parameters of heat treatment on the structure and properties of carburized case and the core of 19CrMnNiMo steel was studied. The critical points were determined by dilatometric analysis: $A_{c1} = 740$ °C, $A_{c3} = 835$ °C. It was established, that after carburizing at 940 °C, pre-quench to 890 °C with oil cooling, quenching at 790 °C and tempering at 180 °C, martensite structure of carburized case with uniformly distributed carbides and the least amount of retained austenite is formed. The hardness of carburized case decreases smoothly from the surface into the depth, in proportion to the decrease in the carbon concentration and amounts to 60-50 HRC. The technological process of heat treatment of drill bit legs made

of 19CrMnNiMo carburized steel providing minimal amount of retained austenite in structure, absence of carbide network and combination of optimum mechanical properties which is proved by a real on-site experiment is developed. Temperature conditions of carburizing, quenching and low tempering are recommended for the production of legs of roller bits.

Keywords: drill bit leg, carburization, carbon concentration, low-carbon low alloy steel, microstructure, retained austenite, mechanical properties.

Расширение сферы использования мелкодисперсной пыли печей прокаливания нефтяного кокса алюминиевого производства

Тютрин А.А., Бурдонов А.Е., Бушуев К.С.

Иркутский национальный исследовательский технический университет
Иркутск, Россия
an.tu@inbox.ru

Аннотация. Статья посвящена проблеме образования и утилизации мелкодисперсной углеродистой пыли печей прокаливания нефтяного кокса, улавливаемой электрофильтрами. Изучены физико-химические характеристики пыли: материал представляет собой мелкодисперсный порошок классом крупности –60 мкм и плотностью 1,98 г/см³, зольность образцов в среднем составила 0,97 %, а выход летучих – 1,45 %. Данный вид отхода может иметь применение в различных областях промышленности в качестве топлива или восстановителя после предварительного окускования. Предложена методика брикетирования пыли с использованием различных связующих: жидкого стекла, лигносульфоната натрия, карбоксиметилцеллюлозы, цемента и пыли очистки анодных газов электролизеров. Методика включает в себя смешение углеродистой пыли с необходимым количеством связующего и воды до достижения необходимой влажности шихты. Полученная шихта подвергается прессованию в форме с усилием до 250 МПа. Изучено влияние содержания каждого связующего на прочность брикетов при сбрасывании: наилучшие результаты были получены при содержании связующего 5–6 %, а максимальные достигнутые значения сопротивления сбрасыванию брикетов получены при использовании: жидкого стекла – 85,0 %, пыли очистки анодных газов электролизеров – 75 %, лигносульфоната натрия – 94 %, карбоксиметилцеллюлозы – 86 % и цемента – 93 %.

Ключевые слова: коксовая пыль, углеродистая пыль, брикетирование, брикет, связующее, прокаливание кокса, алюминиевое производство.

ВВЕДЕНИЕ

Производство первичного алюминия включает в себя большое количество переделов: получение глинозема [1, 2], производство обожженных анодов или анодной массы [3–5], производство фтористых солей и непосредственно электролиз криолит-глиноземных расплавов [6–10] с последующим производством сплавов с заданными свойствами. На каждом этапе производства образуются различные виды твердых отходов. При электролитическом получении алюминия образуются потери сырья при его разгрузке и транспортировке до цеха [11]; пыль, увлекаемая общеобменной вентиляцией корпуса и отходящими газами от электролизера [12, 13]; угольная пена, снимаемая с поверхности электролита [13–14]; отходы (хвосты) флотации угольной пены и шламы регенерации криолита [14–15]; отработанные аноды; отходы, образующиеся при капитальном ремонте электролизеров (угольная и огнеупорная части футеровки) [16–17], катодные стержни, анодные штыри, металлоконструкции, ошиновка. При

производстве обожженных анодов и анодной массы образующиеся отходы в первую очередь представлены мелкодисперсной углеродистой пылью [4, 18]. Так, например, при прокаливании кокса на ПАО «РУСАЛ Братск» филиале в г. Шелехов улавливается в электрофильтрах до 3000 т/год пыли. Вовлечение электрофильтровой пыли в процесс электролитического получения алюминия невозможно, поскольку качество конечного продукта существенно снижается. Данный вид отхода может иметь применение в различных областях промышленности в качестве топлива или восстановителя. Ввиду того, что применение и транспортировка углеродистого отхода в мелкодисперсной форме ограничена, требуется предварительное его окускование.

Производство анодной массы включает несколько основных операций, такие как подготовка сырого кокса перед прокаливанием, прокаливание сырого кокса, подготовка коксовой шихты, - подготовка пека (связующего), смешение коксовой шихты и пека с получением анодной массы, охлаждение и транспортировка готовой анодной массы в склад [4, 18].

Прокалка сырого нефтяного кокса проводится в барабанной печи. Сырой нефтяной кокс после предварительного дробления крупностью до 75 мм по транспортной линии подается в бункер прокалочной печи и далее с помощью дозатора в прокалочную печь. Прокалка кокса осуществляется в противотоке движения материала и топочных газов при температуре 1225 °С ± 25 °С. Процесс прокаливания сырых нефтяных коксов, в результате высокого содержания мелких фракций и летучих (до 12%), сопровождается значительным выделением газов, имеющих высокую запыленность, что обуславливает, в целях предотвращения их выбросов в атмосферу с дымовыми газами, необходимость установки пылеулавливателей и печей дожига летучих. Поэтому отходящие от печи газы поступают в пылесадительную камеру. Коксовая пыль, осажденная в камере, возвращается в технологический процесс, а газы из осадительной камеры направляются в котел-утилизатор и далее на очистку в электрофильтре.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является углеродистая пыль, улавливаемая электрофильтрами при прокаливании нефтяного кокса с печи № 2 отделения производства анодной массы «РУСАЛ Братск» филиале в г. Шелехов. Пыль представляет собой мелкодисперсный (пылевид-

Работа выполнена по НИР МК-2105.2020.8 при поддержке грантов Президента Российской Федерации

ный) материал темно-серого цвета, который при насыщении влагой приобретает черный оттенок.

Отбор проб и пробоподготовка проводились в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-83 [19]. Основным критерием отбора проб являлась представительность проб, зависящая от дисперсного состава. Так, для пыли электрофильтров объем представительной пробы составлял около 3–5 кг.

Исследования распределения изучаемых образцов по классам крупности проводились на лазерном анализаторе размера частиц Analysette 22 NanoTec plus (Fritsch, Германия). Данный прибор определяет крупность частиц в жидкой среде. Поскольку исследуемые образцы обладают плохой смачиваемостью, для измерений готовились суспензии пыли с добавкой поверхностно-активного вещества Dusazin 901 (Fritsch, Германия). Для получения представительных проб материал предварительно тщательно перемешивался и усреднялся путем квартования. Было проведено 5 параллельных измерений пробы исследуемого материала.

Результаты гранулометрического состава исследуемых образцов пыли печей проковки кокса представлены в виде рис. 1 с интегральной кривой и дифференциальным распределением и в виде табл. 1. Материал представлен классом –60 мкм, 90 % составляет класс –26 мкм, 50 % – класс –10 мкм.

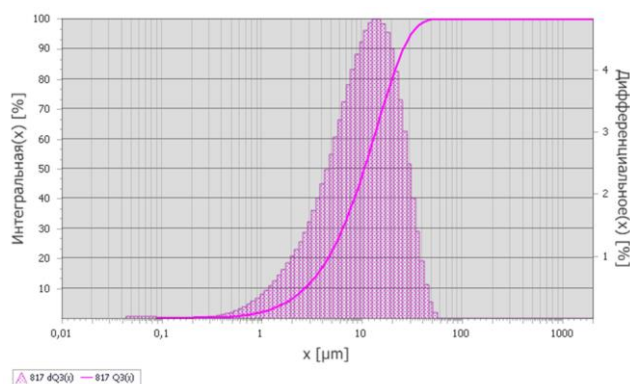


Рис. 1. Распределение частиц углеродистой пыли по классам крупности

Таблица 1
Распределение частиц углеродистой пыли по классам крупности

Крупность, мкм	Выход класса, %					
	Среднее	Номер измерения				
		1	2	3	4	5
0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5
0,8	1,2	0,9	1,1	1,3	1,3	1,3
1,3	3,1	2,6	3,1	3,3	3,3	3,2
2	6,7	6,4	6,9	6,9	6,7	6,5
3,5	15,5	17	16,2	15,4	14,8	14,1
6	30,2	34	31,2	29,7	28,7	27,5
10	50	54	51	49,2	48,3	47,3
15	68	70,6	68,9	67,3	66,7	66,6
25	88,7	89,4	89,2	88,2	88,1	88,7
40	98,6	98,6	98,7	98,4	98,5	98,7
60	100	100	100	100	100	100

При анализе проб, полученном в центральной заводской лаборатории ПАО «РУСАЛ Братск» филиале в

г. Шелехов по стандартным методикам [20–22], получены основные характеристики и состав углеродистой пыли (табл. 2).

Таблица 2

Физико-химические характеристики исследуемых образцов

Зольность, %	Выход летучих веществ, %	S _{общ} , %	ρ, г/см ³			
0,97	1,45	2,16	1,98			
Содержание элементов в пробе, ppm						
Si	Fe	V	Ti	Cr	Mn	Na
735	3852	498	21	6	40	159

МЕТОДИКА БРИКЕТИРОВАНИЯ

При разработке технологии брикетирования пыли электрофильтров с целью минимизации логистических затрат приоритетное значение имел выбор связующих, источниками производства которых могут стать предприятия, расположенные в районах алюминиевого предприятия. В лабораторных испытаниях использовались распространенные связующие вещества: жидкое стекло, лигносульфонат натрия, карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ) и цемент. Также в качестве связующего была применена пыль очистки анодных газов электролизеров (пыль электрофильтров), являющаяся отходом электролитического получения алюминия. Источниками для образования пыли электрофильтров являются выносимые с анодными газами взвешенные вещества: частицы загружаемого в электролизер сырья, твердые продукты разрушения анода, а также сконденсировавшиеся при охлаждении пылегазового потока продукты испарения электролита и его капли, увлеченные конвективными газовыми потоками.

При проведении экспериментов по брикетированию углеродистой пыли прокаточной печи, используемой при производстве анодной массы для придания оптимальных свойств нефтяному коксу, были использованы различные способы подготовки шихты. Основной целью было получение прочных брикетов при экономически оправданном варианте технологии подготовки материала к брикетированию и минимальном расходе связующего, упрочнения брикетов и проведения самого брикетирования.

Одним из способов подготовки шихты является смешение пробы углеродистой пыли со связующим, сушка или увлажнение в зависимости от вида связующего, используемого в эксперименте, и после достижения заданной влажности брикетирование шихты. Во втором способе к сухой углеродистой пыли добавлялось связующее в виде водного раствора, обеспечивающее необходимую влажность шихты и содержание в ней связующего. Шихта направлялась на брикетирование после тщательного перемешивания. В третьем способе к сухой углеродистой пыли в необходимом количестве добавлялось связующее в порошкообразной форме и после тщательного перемешивания шихта разбавлялась водой для получения необходимой влажности для проведения процесса брикетирования.

После проведения подготовительных операций шихта массой 100 г загружалась в пресс-форму диаметром 50 мм

(площадь брикета $78,5 \text{ мм}^2$) и утрамбовывалась. Производилось усилие 250 МПа рабочей поверхности гидравлического пресса на пресс-форму. После чего фиксировали необходимое усилие и извлекали брикет из пресс-формы (рис. 2). По окончании брикетирования снимали качественные характеристики брикетов.



а



б

Далее проба подвергалась сушке в шкафу Binder ED 53 (Германия) при $50 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 30 минут и подвергалась испытаниям на прочность. Поскольку брикеты планируется транспортировать и использовать в качестве восстановителя, они должны обладать достаточной механической прочностью при сжатии и сбрасывании. Механическая прочность брикетов на сбрасывание определялась согласно ГОСТ 21289-75 [23]. Нами была проведена серия экспериментов по испытанию образцов брикетов для определения сопротивления сбрасыванию.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования влияния содержания связующего на прочность брикета представлены на рис. 2.

При брикетировании увлажненной пыли без применения связующего прочность готовых брикетов не превышает 60–70 %. Сушка брикетов приводит к существенному повышению их прочности: более чем в два раза. Тем не менее, наблюдаемые прочностные характеристики брикетов недостаточны для их транспортировки и загрузки в бункера промышленных агрегатов. Для достижения необходимых значений прочности брикетов из углеродистой

пыли необходимо использовать связующие вещества. Также следует отметить, что дальнейшее увеличение количества воды выше 5% приводит не только к снижению прочности брикетов, но и к зависанию шихты в пресс-форме.

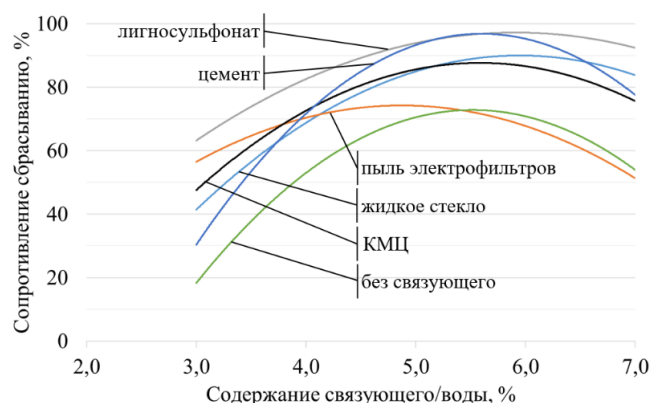


Рис. 2. Зависимость сопротивления сбрасыванию брикетов от содержания связующего

Наилучшие значения сопротивления сбрасыванию достигаются при содержании связующего 5–6 %, дальнейшее повышение связующего практически не влияет прочность брикетов или даже снижает.

Применение пыли очистки анодных газов электролизеров в качестве связующего экономически и логистически наиболее оправдано, так как данный отход образуется при электролитическом получении алюминия и может быть применен в качестве связующего вещества. Однако полученные значения прочности брикетов неудовлетворительны, сопротивление сбрасыванию брикетов максимально достигало 75 %.

При использовании цемента в качестве связующего сопротивление сбрасыванию достигло 93 %. Основным недостатком данного связующего является его повышенная зольность, что ограничивает область применения брикетов в качестве восстановителя в металлургических процессах.

Сопротивление сбрасыванию 85 % имели брикеты, полученные при брикетировании углеродистой пыли с использованием в качестве связующего жидкого натриевого стекла. Содержание связующего в шихте при этом должно быть не менее 5%. При использовании КМЦ в качестве связующего получены схожие результаты, сопротивление сбрасыванию брикета достигло 84 % при содержании связующего 5 %.

Наиболее эффективно брикетирования пыли печей проковки кокса явилось использование жидкого лигносульфоната. Его содержание в шихте для достижения после упрочнительной сушки брикетов необходимой их прочности должно составлять 5–7 %. Лигносульфонат является отходом целлюлознобумажной промышленности [24], и цена его сравнительно невелика. Кроме того, он недефицитен, может быть доставлен речным транспортом (если использовать лигносульфонат с территорий захоронения), достаточно прост в подготовке к использованию в процессах брикетирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

Углеродистая пыль печей прокалки кокса представляет собой мелкодисперсный материал плотностью 1,98 г/см³ и крупностью частиц менее 60 мкм, 90 % составляет класс крупности –26 мкм, 50 % – класс –10 мкм. Зольность пыли составляет 0,97 %, выход летучих веществ – 1,45 %, содержание серы общей – 2.16 %, содержание основных элементов в золе составляет, ppm: 735 Si, 3852 Fe, 498 V, 21 Ti, 6 Cr, 40 Mn, 159 Na.

По результатам испытаний по брикетированию углеродистой пыли, проводимых на гидравлическом прессе при усилии 250 МПа, установлено влияние содержания связующих (жидкое стекло, пыль очистки анодных газов электролизеров, лигносульфонат натрия, карбоксиметилцеллюлоза и цемент) на сопротивление сбрасыванию (прочность) брикетов. Наилучшие результаты были получены при содержании связующего 5–6 %, а достигнутые максимальные значения сопротивления сбрасыванию брикетов (в %) получены при использовании: жидкого стекла – 85,0, пыли очистки анодных газов алюминиевых электролизеров – 75, лигносульфоната натрия – 94, карбоксиметилцеллюлозы – 86, цемента – 93 %.

Полученные брикеты можно рекомендовать к применению в различных областях промышленности в качестве топлива, в частности, для тепловых электростанций или в качестве восстановителя для производства ферросплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Medvedev V.V. Evolution of the technology for the production of alumina from bauxites / V.V. Medvedev, S.N. Akhmedov // *Light Metals*. – 2014. – P. 5-9.
2. Sizyakov V.M. Feasibility study of the use of nepheline-limestone charges instead of bauxite / V.M. Sizyakov, V.Y. Bazhin, E.V. Sizyakova // *Metallurgist*. – 2016. – Vol. 59, is. 11/12. – P. 1135-1141.
3. Yang J. New opportunities for aluminum electrolysis with metal anodes in a low temperature electrolyte system / J. Yang, J.N. Hryn, B.R. Davis, A. Roy // *TMS Light Metals*. – 2004. – P. 321-326.
4. Янко Э.А. Аноды алюминиевых электролизеров. – М.: Руда и металлы, 2001. – 671 с.
5. Tabereaux A. Super-high amperage prebake cell technologies in operation at worldwide aluminum smelters // *Light Metal Age*. – 2017. – Vol. 75(1). – P. 26-29.
6. Kvande H. Production of primary aluminium // *Fundamentals of Aluminium Metallurgy: Production, processing and applications*. – 2011. – P. 49-69.
7. Mann V. Reduction in Power Consumption at UC RUSAL's Smelters 2012–2014 / V. Mann, V. Buzunov, N. Pitertsev, V. Chesnyak, P. Polyakov // *Light Metals*. – 2015. – P. 757-762.
8. Gupta A. Sustainable primary aluminium production: technology status and future opportunities / A. Gupta, B. Basu // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. – 2019. – Vol. 72, is. 8. – P. 2135-2150.
9. Пингин В.В. Перспективы модернизации ошиновки электролизера С-8БМ (С-8Б) / В.В. Пингин, Я.А. Третья-

ков, Е.Ю. Радионов, Н.В. Немчинова // *Цветные металлы*. – 2016. – № 3. – С. 35-41.

10. Alamdari H. Aluminium production process: Challenges and opportunities // *Metals*. – 2017. – Vol. 7, is. 4. – P. 133.

11. Бурдонов А.Е. Результаты исследований рабочих индексов дезинтеграции глиноземсодержащих отходов / А.Е. Бурдонов, В.В. Барахтенко, К.В. Прохоров, А.А. Гавриленко // *Обогащение руд*. – 2018. – № 4. – С. 11-16.

12. Зенкин Е.Ю. О переработке отходов производства первичного алюминия ОАО "РУСАЛ Братск" / Е.Ю. Зенкин, А.А. Гавриленко, Н.В. Немчинова // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2017. – Т. 21, № 3. – С. 123-132.

13. Nemchinova N.V. Experiment for use of Bratsk aluminum plant technogenic waste as a reducing agent during cast iron smelting / N.V. Nemchinova, P.A. Yakushevich, A.A. Yakovleva, L.V. Gavrilenko // *Metallurgist*. – 2018. – Vol. 62, is. 1-2. – P. 150-155.

14. Тимкина Е.В. Термодинамика процесса выщелачивания фтора из отходов алюминиевого производства / Е.В. Тимкина, А.Н. Баранов, В.Н. Петровская, В.А. Ершов // *Вестник иркутского государственного технического университета*. – 2016. – Т. 20, № 12(119). – С. 182-192.

15. Kondrat'ev V.V. New production solutions for processing silicon and aluminum production waste / V.V. Kondrat'ev, N.V. Nemchinova, N.A. Ivanov, V.A. Ershov, I.A. Sysoev // *Metallurgist*. – 2013. – Vol. 57, is. 5-6. – P. 455-459.

16. Nemchinova N.V. Determination of optimal fluorine leaching parameters from the coal part of the waste lining of dismantled electrolytic cells for aluminum production / N.V. Nemchinova, A.A. Tyutrin, V.V. Somov // *Journal of Mining Institute*. – 2019. – Vol. 239. – P. 544-549.

17. Nunez P. Developing guidance to support sustainable spent pot lining (SPL) management across the aluminum industry // *JOM*. – 2020. – Vol. 72, is. 10. – P. 3334-3340.

18. Nemchinova N.V. On the possibility of carbo-naceous dust waste use of prebaked anode production in silicon metallurgy / N.V. Nemchinova, A.A. Tyutrin, N.A. Korepina, S.S. Belskii // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 411, is. 1. – 012052.

19. ГОСТ 14180–80. Руды и концентраты цветных металлов. Методы отбора и подготовки проб для химического анализа и определения влаги. – М., 2010. – 19 с.

20. ГОСТ 22692-77. Материалы углеродные. Метод определения зольности. – М., 2001. – 4 с.

21. ГОСТ 8606-2015. Топливо твердое минеральное. Определение общей серы. Метод Эшка. – М., 2016. – 16 с.

22. ГОСТ Р 55660-2013. Топливо твердое минеральное. Определение выхода летучих веществ. – М., 2014. – 14 с.

23. ГОСТ 21289-75. Брикетты угольные. Методы определения механической прочности. – М., 1985. – 7 с.

24. Дейнеко И.П. Утилизация лигнинов: достижения, проблемы и перспективы // *Химия растительного сырья*. – 2012. – № 1. – С. 5-20.

Expanding the Application Scope of Fine Dust from Petroleum Coke Calcining Furnaces in Aluminum Production

Tyutrin A.A., Burdonov A.E., Bushuev K.S.
Irkutsk National Research Technical University
Irkutsk, Russia
an.tu@inbox.ru

Abstract. This paper discusses the formation and recycling of finely dispersed carbon dust that is captured by electric filters in petroleum coke calcination kilns. The paper analyzes the physical and chemical properties of such dust; it is a fine powder with a particle size of 60 μm and a density of 1.98 g/cm^3 ; the ash content of the samples in this research was 0.97% on average, and the volatile yield was 1.45%. This waste could be of use in a variety of industries as a fuel; it could also be used as a reductant once pelletized. The paper proposes a pelletizing method using various binders: liquid glass, sodium lignosulfonate, carboxymethyl cellulose, cement, and dust produced by cleaning anode gases of electrolysis units. The method involves mixing carbon dust with the required amount of

the binder and adding water to reach the required moisture content in the charge. The resulting charge is then to be pressed in a mold at up to 250 MPa. The research team studied how each of the binders affected the drop strength of the resulting pellets; the best results were obtained with a binder content of 5% to 6%; the drop resistance was best for liquid glass (85.0%), anode gas cleaning dust (75%), sodium lignosulfonate (94%), carboxymethyl cellulose (86%), and cement (93%).

Keywords: coke dust, carbon dust, pelletizing, binder, coke calcination, aluminum production.

Трибологические свойства детонационных покрытий из сплава $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$

Кучумова И.Д.

Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Россия
ivannakz@mail.ru

Кучумова И.Д., Батраев И.С.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева
СО РАН
Новосибирск, Россия
ibatraev@gmail.com

Аннотация. Применение многокомпонентных сплавов на основе железа с высокой стеклообразующей способностью в качестве защитных покрытий поверхности изделий, работающих в условиях износа и агрессивных сред, может способствовать значительному увеличению их срока эксплуатации. Исходный порошок сплава $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$ фракции 20-40 мкм имеет кристаллическую структуру. В процессе детонационного напыления частицы порошка нагреваются до температуры плавления и охлаждаются при соударении с подложкой со скоростью около 10^6 К/с, что позволяет формировать покрытия с аморфной структурой. В данной работе представлены результаты исследования износостойкости покрытий из сплава $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$, полученных методом детонационного напыления, в условиях сухого возвратно-поступательного трения. Средний объем лунки износа покрытия составляет около $0,065$ мм³, что в разы меньше объема лунки износа нержавеющей стали. В работе подробно рассмотрены механизмы износа детонационных покрытий с частично кристаллической структурой.

Ключевые слова: аморфная структура, детонационное напыление, трение, лунка износа, объем.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка новых методов повышения износостойкости рабочих поверхностей деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания и агрессивных сред, является одним из важных направлений в материаловедении. Формирование функциональных газотермических покрытий позволяет улучшить эксплуатационные характеристики деталей при незначительном повышении их стоимости. Группа сплавов на основе железа, химический состав которых соответствует правилам формирования металлического стекла [1], являются перспективными материалами для применения их в качестве защитных покрытий, полученных методами газотермического напыления. Благодаря низкой стоимости, по сравнению с другими металлическими сплавами с высокой стеклообразующей способностью, металлические сплавы на основе железа представляют особый интерес.

Формирование металлических покрытий с аморфной структурой методами газотермического напыления является сложной задачей, так как при напылении должны быть созданы особые условия для получения структуры металлического стекла, а именно быстрый нагрев частиц до температуры плавления и высокая скорость охлаждения за счет отвода температуры в объем материала основы.

Особого внимания заслуживает работа Ксие с соавторами [2], в которой приводится анализ микроструктуры и механических свойств покрытий $Fe_{48}Mo_{14}Cr_{15}Y_2C_{15}B_6$, полученных методами детонационного, плазменного и высокоскоростного газопламенного (high-velocity oxygen fuel – HVOF) напыления. Детонационные покрытия имеют наибольшее содержание аморфной фазы, высокие показатели твердости, износостойкости и наименьшую пористость среди рассмотренных покрытий. Исследование трибологических и коррозионных свойств детонационных покрытий с аморфной структурой и подробное изучение механизмов изнашивания представлено в работе [3]. Вследствие высокого содержания аморфной фазы и низкой пористости покрытий показатели их износостойкости в 5 раз выше материала основы, в качестве которого использовалась углеродистая сталь.

Целью данной работы являлось определение износостойкости и исследование механизмов изнашивания детонационных покрытий из многокомпонентного сплава $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$ в условиях сухого возвратно-поступательного трения и сравнение с износостойкостью стали 12X18H10T.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты по детонационному напылению покрытий из порошка $Fe_{62}Cr_{10}Nb_{12}B_{16}$ с размером частиц 20-40 мкм проводили с использованием детонационного комплекса ССДС2000 [4, 5] с дополнительным воздушным охлаждением со стороны подложки. В качестве подложек использовались пластины из углеродистой стали. Для напыления использовался ствол переменного сечения с камерой сгорания \varnothing 20 мм длиной 700 мм и дульной (разгонной) секцией \varnothing 16 мм длиной 300 мм. Дистанция напыления составляла 200 мм. В качестве продувочного газа использовался азот. Напыление проводилось с использованием ацетиленокислородной взрывчатой смеси (ВС) эквимолярного состава ($O_2/C_2H_2 \approx 1$). При данном соотношении компонентов ВС в составе продуктов детонации практически отсутствует атомарный кислород, который может способствовать окислению частиц в процессе напыления [6]. Объем ВС варьировался в диапазоне 40-60 % от общего объема ствола установки с шагом в 10 %. Ранее были проведены исследования влияния изменения объема ВС и соотношения компонентов ацетиленокислородной ВС на структуру, свойства и фазовый состав покрытий из сплава $Fe_{66}Cr_{10}Nb_5B_{19}$. Исследования показали, что покрытия, полученные при объеме ВС 55-70 %, имеют

наибольшее содержание аморфной фазы (более 98 вес.%), высокую твердость (770-920 HV₁₀₀), низкую пористость (менее 2 %) и адгезию около 150 МПа (рекордная для металлических детонационных покрытий) [7, 8].

Пористость покрытий оценивалась при помощи программы Stream Essentials 1.9.1 по фотографиям микроструктуры покрытий, полученных на оптическом металлографическом микроскопе OLYMPUS GX-51 (Япония). Фазовый состав покрытий из сплава на основе железа исследовали с использованием рентгеновского дифрактометра D8 ADVANCE (Bruker AXS, Германия). Содержание аморфной фазы определялось по полученным дифракционным картинам методом Ритвелда с использованием программного обеспечения TOPAS 4.2 (Bruker AXS, Германия).

Для комплексного исследования механических характеристик детонационных покрытий проводили дюрOMETрические испытания на микротвердомере DuraScan 50 (EMCO-TEST, Австрия) согласно ISO 6507-1:2007 с нагрузкой 0,1 кг. Испытаниям подвергали нетравленные микрошлифы поперечных сечений, подготовленные по стандартной методике.

Испытания на сухое возвратно-поступательное трение покрытий из сплава Fe₆₂Cr₁₀Nb₁₂V₁₆ были проведены на универсальной машине трения UMT-2 (Bruker Nano GmbH, Германия) согласно ASTM G133-05 при комнатной температуре (298 К) с использованием схемы "шар-плоскость". В качестве контр-тела использовались шарики WC-6Co диаметром 6,35 мм. Перед испытаниями образцы покрытия были отшлифованы и отполированы на суспензии оксида кремния. Использовались следующие параметры трения: длина перемещения 5 мм, скорость скольжения 5 мм/с, прилагаемая нагрузка 25 Н и общее расстояние скольжения 100 м. Исследование поверхности трения проводилось с помощью оптической 3D-системы, с использованием Contour GT-K1 (Bruker Nano GmbH, Германия), для определения потери объема лунки трения покрытий после испытаний. Для каждого покрытия было проведено как минимум четыре измерения для расчета среднего значения объема лунки трения. Лунки трения и продукты трения также были изучены методом растровой электронной микроскопии с приставкой для энергодисперсионного микроанализа X-Act (Oxford Instruments, Великобритания) для выявления механизмов изнашивания.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены изображения структуры покрытий, полученных из порошка многокомпонентного сплава Fe₆₂Cr₁₀Nb₁₂V₁₆. Покрытия имеют достаточно плотную структуру и высокую адгезию к материалу основы, о чем свидетельствует отсутствие следов отслоения покрытия от материала подложки. С увеличением объема ВС уменьшается толщина покрытий, что связано с большей степенью нагрева и плавлением основного объема частиц порошка в процессе напыления.

Результаты дюрOMETрических испытаний и оценки содержания кристаллической фазы покрытий из многокомпонентного сплава Fe₆₂Cr₁₀Nb₁₂V₁₆ представлены в таб. 1. Покрытия имеют высокую микротвердость (около 800 HV₁₀₀) и содержат от 6 до 14 вес.% кристаллической фазы.

Основными кристаллическими фазами в покрытиях являются нанокристаллы твердого раствора хрома α-(Fe,Cr) и бориды (Fe,Cr)NbB. Стоит отметить, что в работе были получены покрытия с аморфной структурой из исходного кристаллического порошка.

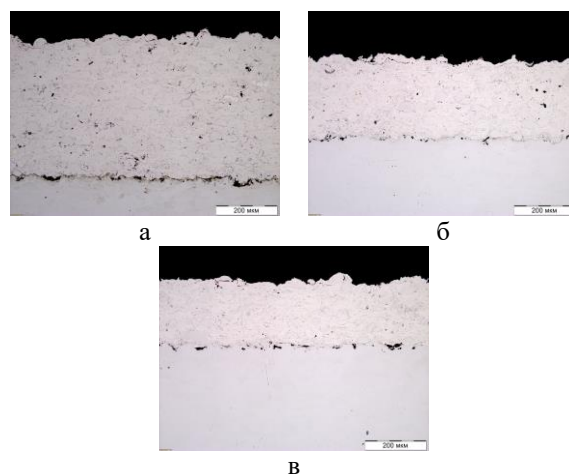


Рис. 1. Структура Fe₆₂Cr₁₀Nb₁₂V₁₆ детонационных покрытий, полученных при различном объеме ВС: а – 40 % ВС; б – 50 % ВС; в – 60 % ВС

Таблица 1
Содержание кристаллической фазы и микротвердость детонационных покрытий из многокомпонентного сплава Fe₆₂Cr₁₀Nb₁₂V₁₆

Объем ВС относительно объема ствола установки, %	Содержание кристаллической фазы, вес.%		Микротвердость, HV ₁₀₀
	α-(Fe,Cr)	(Fe,Cr)NbB	
40	11	3	835±95
50	10	4	750±155
60	4	2	820±110

На рис. 2 приведен график зависимости коэффициента трения от времени для нержавеющей стали и Fe₆₂Cr₁₀Nb₁₂V₁₆ детонационных покрытий, полученных при варьировании объема ВС, в условиях сухого возвратно-поступательного трения. Кривые показывают, что процесс трения можно разделить на режим приработки и стационарный режим. Детонационные покрытия выходят на режим стационарного трения спустя 600 с. Коэффициент трения детонационных покрытий достаточно стабилен в стационарном режиме, чего нельзя сказать о нержавеющей стали. Резкие скачки коэффициента трения нержавеющей стали в стационарном режиме связаны с низкой твердостью материала. Средние значения коэффициента трения покрытий выше (0,66–0,78), по сравнению с нержавеющей сталью (0,57).

Износостойкость детонационных покрытий выше (таб. 2), чем у нержавеющей стали, но ниже, чем у лент из аморфных сплавов на основе железа, исследованных в работе [9]. На рис. 3 представлено изображение поверхности трения покрытия, полученного с

использованием 40 % объема ВС. Видно, что в процессе сухого возвратно-поступательного трения происходило отслоение частиц с поверхности покрытий.

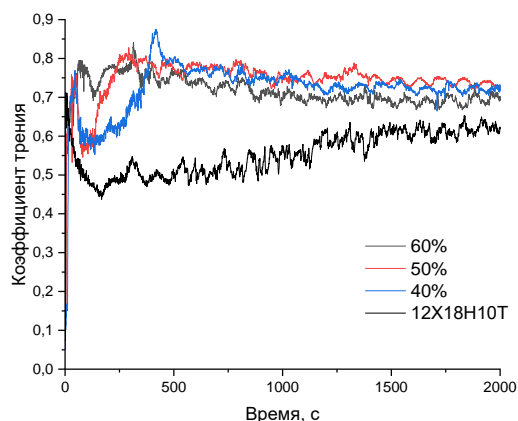


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от времени

Таблица 2
Средние значения коэффициентов трения и объема лунки износа Fe₆₂Cr₁₀Nb₁₂V₁₆ покрытий и 12X18H10T

Объем ВС относительно объема ствола установки, %	Среднее значение коэффициента трения	Объем лунки износа, мм ³
40	0,72	0,8±0,1
50	0,72	0,5±0,1
60	0,66	0,6±0,1
12X18H10T	0,57	3,6±0,1

Отслоившиеся частицы (рис. 4), оставаясь на поверхности трения способствуют увеличению интенсивности изнашивания, выступая в роли абразивных частиц. Продукты износа имеют хлопьевидную форму. В процессе трения механически активированная поверхность изнашивания захватывает кислород из воздуха, в результате чего происходит формирование оксидных пленок элементов, входящих в состав многокомпонентного сплава на основе железа. Помимо элементов, входящих в состав исходного сплава на основе железа на поверхности трения было зафиксировано наличие вольфрама и углерода (таб. 3). Наличие вольфрама и углерода свидетельствует о процессе массопереноса материала контр-тела в лунку износа.

Детонационные покрытия имеют ламеллярную (слоистую) структуру, формируемую преимущественно расплавленными и деформированными частицами, уложенными друг на друга. Между слоями и отдельными частицами могут находиться поры и микротрещины. Покрытия с аморфной структурой обладают низкой пластичностью и вязкостью, а поверхностные слои покрытия имеют тенденцию к отслаиванию при высокой циклической нагрузке за счет постепенного распространения трещин от поверхности вглубь покрытия, что свидетельствует о том, что в процессе изнашивания изначально разрушение происходит по механизму усталостного изнашивания.

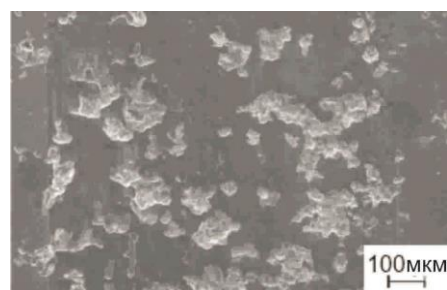


Рис. 3. Морфология поверхности трения детонационного покрытия

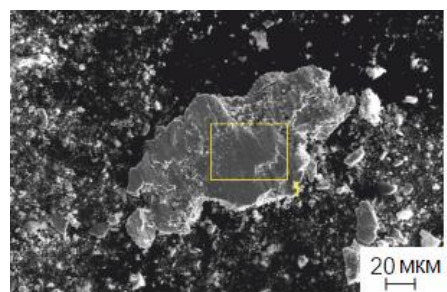


Рис.4. Морфология отслоившихся частиц

Полученные результаты подтверждаются работами [10-12], в которых проводилось исследование износостойкости газотермических покрытий с аморфной или частично кристаллизованной структурой из сплавов на основе железа в условиях трения по схемам «штифт-диск» и «шар-диск». В данных работах так же было обнаружен эффект массопереноса материала контр-тела на поверхность трения.

Таблица 3
Результаты элементного анализа выбранной области на поверхности частицы износа

Химический элемент, вес.%	Выделенная область
C	5.76
O	60.67
Cr	6.07
Al	0.39
Fe	37.29
Nb	12.42
W	1.33
Si	0.90
Totals	100

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

Детонационное напыление порошка сплава Fe₆₂Cr₁₀Nb₁₂V₁₆ фракции 20-40 мкм при использовании ацетиленокислородной смеси эквимолярного состава с варьированием объема взрывчатой смеси 40-60 % относительно объема ствола детонационной установки позволяет формировать качественные покрытия с высоким содержанием аморфной фазы (содержание кристаллической фазы менее 14 вес.%). Полученные в широком диапазоне взрывчатой смеси детонационные покрытия демонстрируют высокую износостойкость в условиях сухого возвратно-поступательного трения при

нормальной нагрузке 25 Н, по сравнению с нержавеющей сталью, и могут быть рекомендованы в качестве защитных покрытий поверхности изделий, работающих в условиях значительного износа. Основными механизмами изнашивания в процессе трения являются окислительное, усталостное и абразивное изнашивание. Однако наибольший вклад в разрушение покрытий вносят механизмы усталостного и абразивного изнашивания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Suryanarayana C. Iron-based bulk metallic glasses / C. Suryanarayana, A. Inoue // *International Materials Reviews*. – 2013. – Vol. 58, is. 3. – P. 131-166.
2. Xie L. Comparison of Microstructure and tribological properties of plasma, high velocity Oxy-Fuel and detonation sprayed coatings from an Iron-Based powder / L. Xie, Y.-M. Wang, X. Xiong, Z.-K. Chen // *Materials Transactions*. – 2018. – Vol. 59. – P.1591-1595.
3. Berger J.E. Wear and corrosion properties of HVOF coatings from Superduplex alloy modified with addition of boron / J.E. Berger, R. Schulz, S. Savoie // *Surface and Coatings Technology*. – 2017. – Vol. 309. – P. 911-919.
4. Ульяницкий В.Ю. CCDS2000 – оборудование нового поколения для детонационного напыления // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2013. – № 10. – С. 36-41.
5. Ulianitsky V. Computer-controlled detonation spraying: from process fundamentals toward advanced applications / V. Ulianitsky, A. Shtertser, S. Zlobin, I. Smurov // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2011. – Vol. 20. – P. 791-801.
6. Batraev I.S. Acceleration and heating of powder particle by gas detonation products in channels with a conical passage / I.S. Batraev, E.S. Prokhorov, V.Yu. Ul'yanitskii // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2014. – Vol. 50. – P. 315-322.
7. Kuchumova I.D. The influence of the O₂/C₂H₂ ratio on the structure and properties of Fe₆₆Cr₁₀Nb₅B₁₉ detonation coatings / I.D. Kuchumova, I.S. Batraev, N.Y. Cherkasova // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 25. – P. 384-386.
8. Kuchumova I.D. Formation of metallic glass coatings by detonation spraying of a Fe₆₆Cr₁₀Nb₅B₁₉ powder / I.D. Kuchumova, I.S. Batraev, V.Yu. Ulianitsky // *Metals*. – 2019. – Vol. 9, is. 8. – URL: <https://www.mdpi.com/2075-4701/9/8/846>.
9. Branagan D.J. Wear-resistant amorphous and nanocomposite steel coatings / D.J. Branagan, W.D. Swank, D.C. Haggard, J.R. Fincke // *Materials Transactions A*. – 2001. – Vol. 32. – P. 2615-2621.
10. Stoica M. Mechanical behavior of Fe_{65.5}Cr₄Mo₄Ga₄P₁₂C₅B_{5.5} bulk metallic glass / M. Stoica, J. Eckert, S. Roth, H.F. Zhang, J. Schultz, W.H. Wang // *Intermetallics*. – 2005. – Vol. 13. – P. 764-769.
11. Ma H.R. Fe-based amorphous coating with high corrosion and wear resistance / H.R. Ma, X.Y. Chen, J.W. Li // *Surface Engineering*. – 2016. – Vol. 33, is. 1. – P. 56-62.
12. Xie L. Effects of oxygen fuel rate on microstructure and wear properties of detonation sprayed iron-based amorphous coatings / L. Xie, Y.-M. Wang, X. Xiong // *Materials Transactions Received*. – 2018. – Vol. 3. – P. 1867-1871.

Tribological Behavior of Fe₆₂Cr₁₀Nb₁₂B₁₆ Detonation Coatings

Kuchumova I.D.
Novosibirsk State Technical University
NSTU
Novosibirsk, Russia
ivannakz@mail.ru

Kuchumova I.D., Batraev I.S.
Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian
Branch of the Russian Academy of Sciences
LIH SB RAS
Novosibirsk, Russia
ibatraev@gmail.com

Abstract. The application of multicomponent Fe-based alloys with high glass forming ability as protective coatings of parts, working in conditions of wear and aggressive environments can contribute a significant increasing of the service life. The feed-stock powders of Fe₆₂Cr₁₀Nb₁₂B₁₆ alloy with a fraction of 20-40 μm have a crystalline structure. During the detonation spraying the powder particles are heated to the melting temperature and cooled down on impact with the substrate at a cooling rate of about 10⁶ K/s, which allows the formation of coatings with an amorphous structure. In the present work the results of the wear resistance of the detonation Fe₆₂Cr₁₀Nb₁₂B₁₆ coatings obtained by

detonation spraying under the conditions of dry reciprocating friction are presented. The average volume loss of the coatings is about 0.065 mm³, which is several times less than the average volume loss of stainless steel. The main wear mechanisms during friction are fatigue and abrasion mechanisms.

Keywords: amorphous structure, detonation spraying, friction, volume loss, volume.

Радиационный контроль объектов малой толщины

Морокина Г.С.

Санкт-Петербургский государственный университет авиационного приборостроения
Санкт-Петербург, Россия
moitpb@guar.ru

Аннотация. В работе проведено исследование источников ионизирующего излучения для применения в качестве излучателя при контроле качества металлических изделий, применяемых в машиностроении. Особенностью применения источников для гамма-контроля является повышенная опасность в условиях отсутствия стационарной защиты при просвечивании объекта. Поэтому к методу просвечивания выдвигается требование минимизация времени контроля объекта в полевых условиях. Тем не менее основное условие при проведении гамма-контроля – это повышение чувствительности метода при контроле на малых толщинах до 30-40 см. Рассмотрено влияние типа взаимодействия излучения с материалом на измеренную величину дозы с учетом рассеянного излучения. Приведена схема проведения контроля с учетом типа источника излучения.

Ключевые слова: контроль, взаимодействие с веществом, Комптон-эффект, выбор источника, рассеянное излучение, меры безопасности.

ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение средств контроля в различных сферах, например, в проходных различных предприятий, для контроля охраняемых объектов в машиностроении, а также в классических методах неразрушающего контроля при проведении дефектоскопии, требует рассмотрения физических параметров источника ионизирующего излучения и испускаемого излучения при оценке чувствительности метода и воздействия на объекты и людей [1-4]. Так как гамма-источники ионизирующего излучения, как правило, имеют высокую энергию, интенсивность и локализацию в пространстве, то их широкое применение требует иного подхода при составлении методик радиационного контроля, аттестации рабочего места оператора и обеспечения безопасности населения [5-10]. Контроль проникающим излучением применяется широко в машиностроении, атомной, горной промышленности и в других важных промышленных отраслях. Поэтому детальное и внимательное изучение основ взаимодействия излучения с веществом дает не только обеспечение безопасности контроля, но и позволит разрабатывать новые методы и методики контроля с применением современных средств регистрации и обработки данных. Наличие источников ионизирующего излучения, способных генерировать импульсное излучение высокой энергии, открывает новые возможности в создании технических сложных систем с выполнением требований обеспечения безопасной работы.

Кроме того, в условиях существования угрозы возникновения террористических актов установки контроля и возникновения взрыва или разрушения, приборы контроля и досмотра могут работать в различных местах, в том числе, и в потоках с большим количеством населения, что

приводит к повышенным требованиям по обеспечению безопасности населения от применяемой техники.

Целью данной работы является изучение радиационных воздействий на объекты в зависимости от энергии излучения и типа переноса радиационных воздействий [3].

ТИПЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ГАММА-КОНТРОЛЯ

Взаимодействие фотонного излучения с веществом отличается от взаимодействия электронов и других заряженных частиц своим случайным характером. Рассмотрим конкретный случай, когда пучок рентгеновского или гамма-излучения (т. е. пучок фотонов) проходит через вещество. Начальный этап этого процесса заключается в столкновении между фотоном и каким-либо электроном атома, в результате чего рассеивается часть энергии фотонного излучения и выбивается электрон, обладающий большой скоростью и, соответственно, большой энергией. Процессы рассеяния включают Комптоновское (неупругое, некогерентное) и упругое (когерентное) рассеяния.

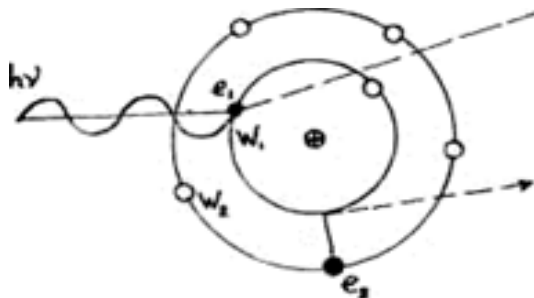


Рис. 1. Схематическое изображение процесса фотоэлектрического поглощения фотонов

Процессы поглощения фотонов. Фотоэлектрическое поглощение (рис. 1-3). Предположим, что фотон с энергией $h\nu = 100 \text{ кВ}$ взаимодействует с атомом вольфрама ($z = 74$) так, что выбивает электрон с K -оболочки (энергия связи $E_k = 70 \text{ кВ}$). Этот электрон будет иметь кинетическую энергию, равную разности $h\nu - E_k$, т. е. $100 - 70 = 30 \text{ кВ}$. Такой электрон называется фотоэлектроном, а весь процесс, заключающийся в передаче квантом всей своей энергии электрону ближайших к ядру оболочек K или L - называется фотоэлектрическим поглощением. Через промежуток времени 10^{-8} с электрон с L -оболочки ($E_L = 10 \text{ кВ}$) заполнит вакантное место на K -оболочке, а разность энергий связи ($E_k - E_L = 60 \text{ кВ}$) испустится в виде рентгеновского характеристического излучения.

Процесс образования электрон-позитронных пар (рис. 2). Наряду с электронами фотонное излучение может взаимодействовать с электрическим полем атомных ядер по-

глутителя. В процессе такого взаимодействия образуются две частицы: электрон и позитрон, а фотон исчезает.

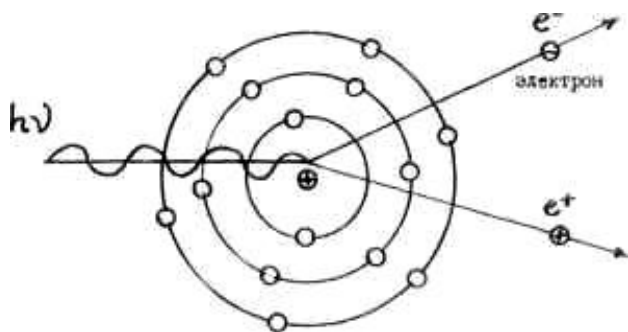


Рис. 2. Процесс образования электрон-позитронных пар

Образование пар может произойти только в том случае, если энергия фотона больше суммы энергий, связанных с массой покоя электрона и позитрона. Как известно, массы покоя электрона и позитрона одинаковы и равны $0,51 \text{ МэВ}$. Таким образом, процесс образования пар может происходить лишь в том случае, если энергия фотонов больше $1,02 \text{ МэВ}$, а энергия выше этого порога уносится электроном и позитроном в виде кинетической энергии. Процесс образования пар в материале начинает играть заметную роль при энергиях квантов более 10 МэВ [18].

Процессы рассеяния фотонов (рис. 3). Комптоновским рассеянием (неупругим или некогерентным) называется процесс, при котором часть энергии фотона передается электрону и появляется рассеянный или вторичный фотон с меньшей энергией.

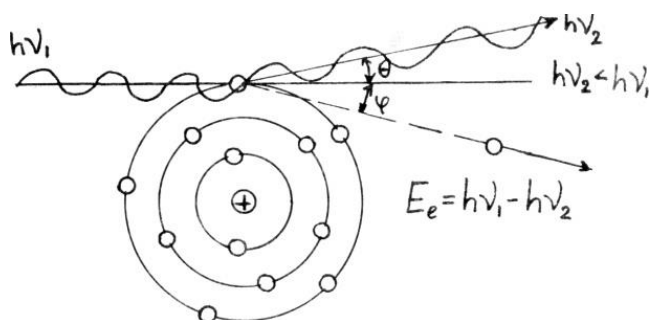


Рис. 3. Комптоновское рассеяние фотонов

В результате взаимодействия фотонного излучения с веществом интенсивность первичного пучка изменяется по экспоненциальному закону:

$$J_x = J_0 e^{-\mu x}, \quad (1)$$

где J_0 — плотность потока энергии (интенсивность) первоначального пучка фотонов,

J_x - плотность потока энергии пучка фотонов после прохождения защиты толщиной x ,

e - основание натуральных логарифмов (2,718);

μ - линейный коэффициент ослабления,

x — толщина защиты.

Этот коэффициент зависит от плотности вещества защиты, его z , энергии фотонного излучения и складывается из трех линейных коэффициентов ослабления, обусловленных фотоэффектом, Комптон-эффектом и образованием пар:

$$\mu = \tau + \sigma + \chi \quad (2)$$

Таким образом, суммарное ослабление высчитывается по формуле, представленной выше.

МЕТОДИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ДОЗОВОГО КОНТРОЛЯ С УЧЕТОМ РАССЕЯННОГО

Как будет изложено далее, именно эквивалентная и эффективная дозы являются основными величинами, нормируемыми при оценке хронического воздействия на организм человека ионизирующей радиации.

Эффективная доза является величиной, которая не может быть непосредственно измерена дозиметрическими приборами. Основной величиной в этой группе величин является эквивалент дозы.

Эквивалент дозы - произведение поглощенной дозы в данном элементе объема биологической ткани стандартного состава D на средний коэффициент качества ионизирующего излучения k в этом элементе объема:

$$H = D \cdot k. \quad (3)$$

Поглощенную дозу и эквивалент дозы нельзя определить в поле излучения, не внося в него предварительно объект определенного размера и формы и не указав, в какой точке объекта определяются эти величины. В случае полевой поглощенной дозы (см. ранее) объектом, вносимым в поле излучения, являлся шар из некоторого вещества с радиусом 1 г/см^2 . Аналогично был определен полевой эквивалент дозы.

Полевой эквивалент дозы - эквивалент дозы в центре шара радиусом 1 г/см^2 из тканеэквивалентного вещества, совмещенном с точкой поля ионизирующего излучения, в которой он определяется. Когда говорят о тканеэквивалентном веществе или тканевой дозе (рис.4), имеют в виду поглощенную дозу в мягкой биологической ткани (мышцах) условного человека, весовой состав которого принимается следующим (%): водород - 10,1; углерод - 11,1; азот - 2,6; кислород - 76,2. Введены две новые величины - амбиентный эквивалент дозы и индивидуальный эквивалент дозы. Для определения первой величины в поле излучения вносится шар из тканеэквивалентного вещества, а второй, параллелепипед размером $300 \times 300 \times 150 \text{ мм}$ из того же вещества. Это позволяет по возможности учесть влияние излучения, рассеянного в теле человека. Амбиентная эквивалентная доза $H(10)$ в данной точке поля излучения есть эквивалентная доза, которая должна была бы быть произведена соответствующим направленным и однородным полем в сфере МКРЕ на глубине 10 мм на радиусе противоположного направления по отношению к направленному полю. Амбиентная эквивалентная доза (или амбиентный эквивалент дозы) величина неудобная по некоторым причинам, поэтому в Руководящем документе Госстандарта она заменена на полевую эквивалентную дозу H^* , которую теперь следовало бы именовать полевым эквивалентом дозы. По сравнению с амбиентной эквивалентной дозой полевая доза в меньшей степени учитывает влияние накопления излучения в теле человека. Однако она существенно проще воспроизводится. При энергиях фотонов, превышающих 500 КэВ , значения амбиентной и полевой эквивалентных доз близки. В диапазоне от 30 до 500 КэВ амбиентная доза на несколько десятков процентов может превышать полевую. Это связано с существенным вкладом излучения, рассеянного в сфере, входящей в определение амбиентной дозы.

Полевая эквивалентная доза - это эквивалент дозы в центре шарика диаметром 20 мм , состоящего из тканеэк-

вивалентного вещества и помещенного в исследуемую точку поля излучения.

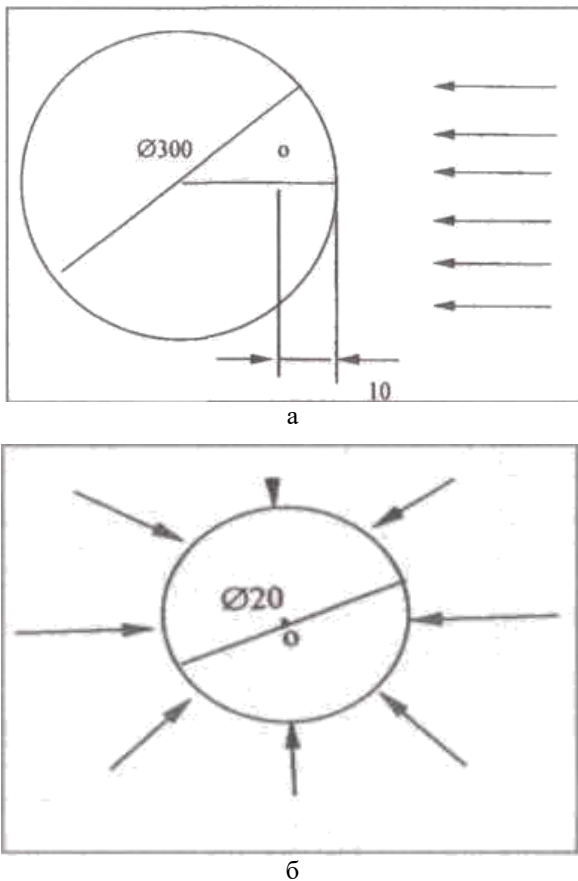


Рис. 4. Иллюстрация принципов определения ambientной (а) и полевой (б) эквивалентных доз при использовании тканезквивалентной сферы МКРЕ, имеющей химический состав: кислород 76,2%, углерод -11,1%, водород -2,65%, азот - 2,65%, и плотность -1 г/см³

Размер тканезквивалентного шара, входящего в определение полевой эквивалентной дозы, выбран исходя из того, что минимальная глубина залегания основных критических органов тела человека составляет 10 мм, а форма выбрана из соображений изотропии.

Для проникающих излучений максимальная эквивалентная доза локализуется обычно на этой глубине или же мало отличается от эквивалентной дозы на глубине 10 мм [1].

Для оценки воздействия на среду косвенно ионизирующих излучений часто используют понятие керма. Керма (K) - это отношение суммы первоначальной кинетической энергии всех заряженных частиц, создаваемых косвенно ионизирующим излучением в элементарном объеме вещества к массе вещества в этом объеме $K = dE/dm$, единица измерения: Грей (Гр).

В качестве вещества, в котором определяется керма используются воздух - для фотонного излучения, ткань - для косвенно ионизирующих излучений, применяемых в медицине и биологии, и любой материал - при изучении радиационных эффектов.

Грей равен керме, при которой сумма начальных значений кинетической энергии всех заряженных частиц, освобождаемых косвенно ионизирующим излучением в веществе массой 1 кг равна 1 Дж [7].

Следует помнить, что сюда включается и энергия, которую заряженные частицы растрачивают на образование тормозного излучения и заряженных частиц во вторичных процессах.

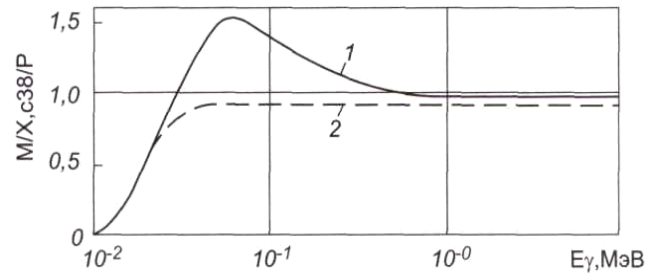


Рис. 5. Зависимость отношения ambientной эквивалентной дозы (1) и полевой эквивалентной дозы (2) от энергии излучения

Приведенный выше перечень радиационных величин и единиц не является полным. Однако, это основные величины которые воспроизводятся соответствующими эталонами и которые подлежат измерению на практике.

Приборы, используемые для дозиметрического контроля, можно классифицировать по различным критериям: по назначению, по типам измеряемых физических величин, по видам регистрируемого ими излучения, по видам детекторов излучений, по форме исполнения и др. Необходимо, однако, иметь в виду, что классификация важна не сама по себе, а лишь в той мере, которая позволяет уяснить возможности применения имеющихся приборов.

При этом необходимо изучение дозового коэффициента с учетом рассмотрение вклада энергетического распределения и определение дозовых параметров при проведении исследований по контролю доз [10-11]. Для учета рассеянного излучения и вторичного излучения использовалось понятие ambientного эквивалента дозы, который по определению был создан в шаровом фантоме МКРЕ (международной комиссии по радиационным единицам) на глубине d , мм, от поверхности по диаметру, параллельному направлению излучения, в поле излучения, идентичном рассматриваемому по составу, флюенсу и энергетическому распределению, но мононаправленному и однородному, то есть ambientный эквивалент дозы $H(d)$ — это доза, которую получил бы человек, если бы он находился на месте, где проводится измерение.

Были проведены исследования на пробах с естественной радиоактивностью. Рассмотрим ниже исследования пробы горных пород при добыче и переработке урановых материалов. Для исследования применялись приборы РСУ-01 «Сигнал» и спектрометр Гамма-1С/НВ. Для оценки эффективной дозы была разработана конструкция детектора с расширенным приемником, позволяющим проводить измерения эквивалентной дозы $H_p(10)$ с учетом пластикового фантома. Измерения проводились детектором из неорганического кристалла - это иодид натрия, активированный таллием. Успешно можно применять в роли сцинтиллятора, также активированные пластмассы и органические жидкости: например, полистирол, активированный пара-терфенилом.

Измерение спектра гамма-излучения от источника проводилось разработанным детектором (рис.6) в точке и оценивались спектральные линии, принадлежащие есте-

ственным радионуклидам (^{40}K , ряды ^{235}U и ^{232}Th) и ^{137}Cs . Для радионуклидов, равномерно распределенных по объёму исследуемого объекта, в случае наличия указанных радионуклидов оценивается их удельная активность.

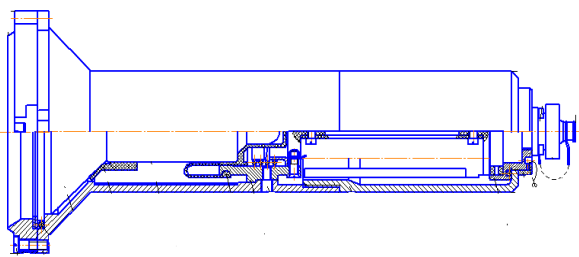


Рис. 6. Конструкция детектора с расширенным приемником

По полученным данным для всех параллельных счетных образцов рассчитываются среднее значение активности каждого радионуклида и полная погрешность определения активности для каждого радионуклида в процентах доверительной вероятности $P=0,95$ по формуле:

$$\sigma = \sigma^{cm} + \sqrt{(\sigma_{ef})^2 + (\sigma_R)^2 + (\sigma_{MET})^2}, \quad (4)$$

где σ^{cm} — относительная статистическая погрешность определения активности каждого радионуклида, которая определяется по формуле:

$$\sigma^{cm} = \frac{1,7}{A} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n A_i^2 - nA^2}{n(n-1)}} 100\%, \quad (5)$$

где A_j , — активность каждого радионуклида для j -го измерения $n=5$ — число измерений счетных образцов; σ_{ef} — погрешность определения эффективности регистрации излучения радионуклидов при снятии кривых в зависимости от веса, не превышающая 10—15 %; δ^R — погрешность пробоподготовки (концентрирование, отбор образца микропипеткой и др.) по свидетельству; $\delta_{мет}$ — методическая погрешность.

Для решения этих задач в радиометре-спектрометре РСУ-01 «Сигнал» и спектрометре Гамма-1С/НВ имеется специальный режим. Затем определяют, нет ли в полученном спектре линий, не относящихся к естественным радионуклидам. При их отсутствии процедуру идентификации радионуклидного состава выявленного источника завершают. Если в полученном гамма-спектре обнаруживаются такие линии, то производится попытка идентификации радионуклидов, которым они могут принадлежать, затем оценивают их удельные либо суммарные активности [6].

При проведении измерений схема последовательности измерения и обработки результатов заключается в предварительном определении методики проведения контроля: подборе масштаба и выборе устойчивости решения. Перед измерениями проб на приборе "Прогресс" спектрометре Гамма-1С/НВ проводится проверка калибровки и стабильности измерительного тракта по точечному источнику ^{137}Cs (рис.7).

Обработка результатов с помощью программного обеспечения заключается в следующем: 1) Кнопка

"Спектр" позволяет ввод спектра счетного образца в программу обработки, 2) Кнопка «Настройка» выводит визуализацию спектра счетного образца на экран монитора, 3) Кнопка "Изотопы" — оператор выбирает изотопный состав из стандартного набора (с учетом результатов гамма-спектрометрии), 4) Кнопка «Расчет» позволяет провести расчеты с учетом калибровки по источнику ^{137}Cs .

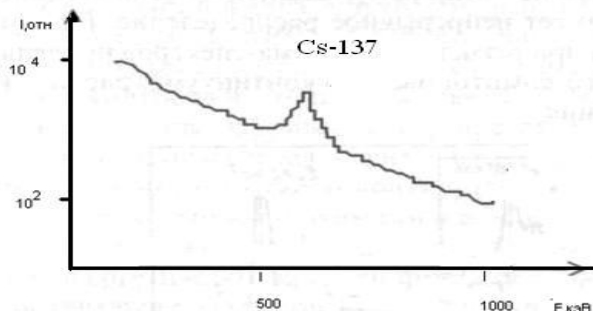


Рис. 7. Аппаратурный спектр пробы, содержащей Cs137

Отечественная программная среда «Gamma_U_Ru» может работать как со спектрами высокого разрешения, так и со спектрами, измеренными на старых детекторах с гораздо худшим разрешением. При создании программы и ее тестировании были проанализированы спектры стандартных образцов урана и плутония, различных по изотопному составу, возрасту и происхождению, снятых на разных детекторах и аппаратуре [12-14].

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Основные меры по снижению дозовой нагрузки при работе на открытых площадках: ограничение времени при проведении работ вне стационарных защитных камер, максимальное увеличение расстояния от источника ионизирующего излучения до рабочего места персонала A при работе в полевых условиях, использование подручных приспособлений для временной стационарной защиты из бетона, металла и т.д. (стен, укреплений, металлических конструкций), минимизация мощности источника излучения при контроле в полевых условиях. Так как снижение энергии и мощности источника излучения приводит к уменьшению степени радиационного воздействия на человека, то необходимо уменьшать эти параметры при выборе источника излучения. Однако необходимо провести исследования о влиянии снижения энергетических параметров на чувствительность контроля. В данной работе проводились исследования чувствительности контроля для двух гамма источников разной энергии: селенового и более жесткого иридиевого источника. Для того, чтобы изменить традиционный источник жесткого гамма-излучения на основе иридия-192 на селеновый источник (рис.8-9) с меньшей энергетической составляющей, был проведен контроль металлической пластины толщиной 10 мм с применением эталона для оценки чувствительности.

В результате проведенного контроля было предложено для небольших толщин использовать селеновый источник с меньшим рассеянием из-за более низкой энергии излучения, что определяется Комптоновским рассеянием.

Результаты исследований показали, что при работе в полевых условиях: на открытых площадках, судах, верфях, стройплощадках замена жесткого иридиевого источ-

ника излучения на селеновый дает улучшение чувствительности контроля при некоторых толщинах.

В результате проведенных исследований было показано, что возможна замена иридиевого источника излучения при работе на открытых площадках менее энергетическим источником на основе селена [15-20].

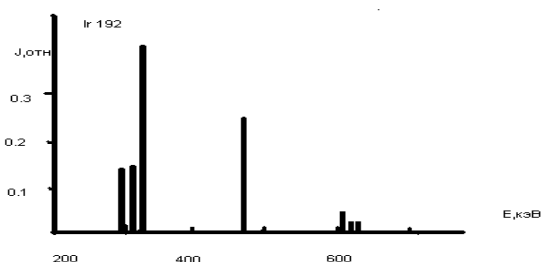


Рис. 8. Спектр иридиевого источника жесткого излучения

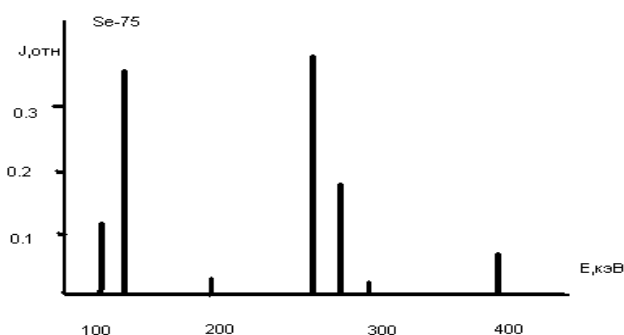


Рис. 9. Спектр селенового источника гамма излучения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты контроля показывают, что при работе в полевых условиях или на открытых площадках машиностроительных цехов, на судах, верфях или на строительных площадках замена жесткого иридиевого источника излучения на селеновый излучатель дает улучшение чувствительности контроля при определенных толщинах. Понятно, что в этом случае увеличивается время проведения контроля. Оно может быть скомпенсировано тщательным инженерным расчетом времен экспозиции, обработки результатов контроля и передачей данных по проведенному контролю на расстояние. Таким образом, грамотная подготовка методики проведения радиационного контроля позволит выполнить проверку объекта контроля с высоким уровнем чувствительности при минимальном радиационном воздействии на персонал и население.

ЛИТЕРАТУРА

1. Умбетов У.У. Радиационная безопасность в промышленности: учеб. пособие // Умбетов У.У., А.И. Потапов, Г.С. Морокина. – Республика Казахстан: Из-во «Формат-Принт» ТИГУ РК, 2017. – 232 с.
2. Морокина Г.С. Методы и средства досмотрового рентгеновского контроля: учеб. пособие / Г.С. Морокина. – Санкт-Петербург: Изд-во СЗТУ, 2009.
3. Морокина Г.С. Методы и приборы таможенного контроля делящихся и радиоактивных материалов: УМК / Г.С. Морокина. – Санкт-Петербург: Изд-во СЗТУ, 2008.

4. Морокина Г.С. Физические факторы в рентгеноматологии: учеб. пособие / Г.С. Морокина. – Санкт-Петербург: Изд-во МАПО, 2003.

5. Кошелев В.Е. Рентгеновские методы и технические средства таможенного контроля: учеб. пособие / В.Е. Кошелев. – М., 2002. – 240 с.

6. Основы таможенного контроля делящихся и радиоактивных материалов /Под ред. В.В. Горчакова. – М.: Изд-во ГТК России, 2001. – 325 с.

7. Сушкевич Е.М. Основы организации таможенного контроля делящихся и радиоактивных материалов: учеб. пособие / Е.М. Сушкевич и др. – М.: Изд-во ГТК России, 1996. – 414 с.

8. Кошелев В.Е. Методы и технические средства таможенного досмотра и поиска: учебное пособие / В.Е. Кошелев. – М.: Изд-во РИО РТА, 2000.

9. Дугин Г.А. Основные оперативные задачи таможенного контроля и технические средства, применяемые для их решения: учебно-методическое пособие/ Г.А. Дугин и др. – М.: Изд-во РИО РТА, 1999. – 80 с.

10. НРБ-99/2009. Нормы радиационной безопасности-99/2009. – М.: Минздрав России, 2009. – 87 с.

11. ОСПОРБ-99. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности. – М.: Минздрав России, 1999. – 100 с.

12. Быстров Ю.А. Ускорительная техника и рентгеновские приборы: учеб. для вузов / Ю.А. Быстров и др. – М.: Высшая школа, 1983.

13. Морокина Г.С. Особенности контроля дозы при гамма-обследовании объектов в горном дел. Горный информационно-аналитический бюллетень / Г.С. Морокина. – М.: Издательство «Горная книга», 2015. – № 11. – С. 166-172.

14. Morokina G.S. The energy influence on the radiation dose of the staff / G.S. Morokina, J.I. Cortez // Journal of Mining Institute. – 2015. – Vol. 215. – P. 91-96.

15. Проблема контроля малых доз облучения для профессиональных работников в машиностроении // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – Т. 2, № 4. – С. 62-66.

16. Морокина Г.С. Влияние рассеянного излучения на дозу при гамма-контроле в машиностроении // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 3, № 2. – С.65-68.

17. Потапов А.И. Радиационная безопасность: УМК / А.И. Потапов, Г.С. Морокина. – Санкт-Петербург: Изд-во НМСУ «Горный», 2013. – 134 с.

18. Морокина Г.С. Методы и приборы таможенного контроля делящихся и радиоактивных материалов / Г.С. Морокина. – Санкт-Петербург: Изд-во СЗТУ, 2008. – 230 с.

19. Шевчук П.С. Теория и практика применения технических средств таможенного контроля: учеб. пособие / П.С. Шевчук и др. – Ростов-на-Дону: изд-во Феникс, 2006. – 290 с.

20. Morokina G.S. Radiation individual control method in engineering / G.S. Morokina, Z. Mungunkhulug // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering, 2018. – P. 2007-2013. doi:10.1007/978-3-319-95630-5_216.

Radiation Control of Low Thickness Objects

Morokina G.S.

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
Saint-Petersburg, Russia
MOITPB@guap.ru

Abstract. In the work it was carried out the investigation of the sources of the ionization of for the application for quality control of the metal materials, used in machine building. The special feature of the application of ionization sources is the higher sensitivity with the absence of stationary protection for radiation control of the object. Therefore to the method of control is advanced requirement the minimization of the time of the control of object under the field conditions. Nevertheless basic condition of the Gamma-controls is an increase in the sensitivity of method

with the control on the small thicknesses to 30-40 cm. Is examined influence of interaction mode emission with the material on the measured value of dose taking into account scattered radiation. There is given the diagram of conducting control taking into account the type of radiation source

Keywords: control, interaction with the substance, Compton effect, choice of source, scattered radiation, safety measures.

Компьютерное моделирование в программе QForm валковой формовки профиля из круглой сварной трубы

Громов Д.В., Ердakov И.Н., Радионова Л.В., Свистун А.С.

Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)
г. Челябинск, Российская Федерация

gromov111999@gmail.com, erdakovin@susu.ru, radionovalv@rambler.ru, svystaryk@mail.ru

Аннотация. В статье представлена компьютерная модель валковой формовки гнутого профиля сложной конфигурации из сварной трубы, реализованная в специализированном пакете QForm. Проверка адекватности компьютерного моделирования показала высокую сходимость с реальным процессом формовки в 24 клетьевом гибочно-прокатном станке. Исследование процесса формовки профиля из стальной электросварной прямошовной трубы Ø120 мм с толщиной стенки 2,2 мм из стали марки 09Г2С показало возможность получения профиля с повышенными механическими свойствами и пониженной металлоемкостью на имеющемся оборудовании. Дефекты присущие профилю, полученному путем моделирования, полностью совпадают с реальным профилем. Компьютерное моделирование валковой формовки в пакете QForm в дальнейшем может быть использовано для изменения калибровки валков с целью повышения качества готовой продукции, за счет улучшения ее геометрии.

Ключевые слова: валковая формовка, профиль, опалубка, монолитное строительство, компьютерное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

В монолитном строительстве зданий, которое стало в последние годы очень популярным, при заливке бетона используется многоразовая опалубка [1-5]. При возведении монолитных зданий чаще всего используется съемная опалубка, состоящая из деревянных, пластмассовых, стальных или алюминиевых элементов. Наиболее распространена стальная и алюминиевая опалубка.

Комплекты опалубки, предназначенные для создания стен, перекрытий, опорных элементов в виде колонн, кольцевых стен, создания туннельных сводов и т.д. по типу конструкции подразделяются на балочные и рамочные. Система рамочной опалубки состоит из каркасных щитов (рис.1), подпоров и креплений [4]. Основные элементы каркасных щитов – несущая рама, поперечные ребра жесткости и плита опалубки. В конструкции рамы используется замкнутый профиль. От качества этого элемента зависит в конечном итоге надёжность всей строительной конструкции. Поэтому к качеству опалубочного профиля предъявляют особые требования.

Стальная опалубка является наиболее распространенной и экономически обоснованной [6]. Производится она из оцинкованного [7] или гальванизированного, покрытого порошковой краской стального листа толщиной от 0,7 мм и выше (зависит от спецификации данного комплекта стальной опалубки). По сравнению с любыми другими материалами, используемыми в создании опалубки для

монолитного домостроения, стальная опалубка обладает наиболее высокими характеристиками. Стойкость стали к механическим воздействиям позволяет применять один и тот же комплект более 500 раз. Недостаток стальной опалубки – значительный вес.

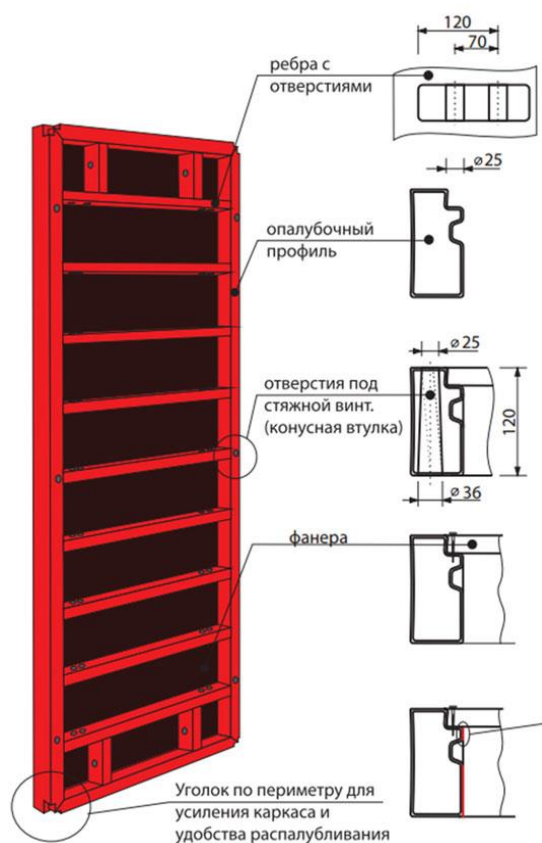


Рис. 1. Каркасный щит рамочной опалубки

Этого недостатка лишена алюминиевая опалубка. По сравнению со сталью, алюминий весит меньше, соответственно, такую опалубку проще транспортировать до стройплощадки и выполнять ее монтаж на месте работ. Однако ее конструкционные элементы утрачивают геометрическую правильность линий уже через 300 циклов использования, причем восстановить их практически невозможно. Еще одним недостатком алюминиевой опалубки является ее низкая стойкость к коррозии при контакте с жидким бетоном, что требует проведения особой антикоррозийной обработки.

Компании, которые занимаются производством опалубки, в качестве каркаса используют гнутый профиль (рис.2), который получают валковой формовкой сварной трубы или формовкой стальной полосы, которую после формовки сваривают.

Повышение стоимости металлопроката, значительный вес стальной опалубки, высокая конкуренция на строительном рынке требуют от производителей этого вида продукции применения инновационных технических решений для снижения затрат. Одним из таких решений может быть переход от применения стали марки Ст3 или 10пс, которая сейчас используется, к стали с повышенными прочностными свойствами, а именно 09Г2С, но меньшей толщины – 2,2 мм. Уменьшение толщины стального проката, используемого для получения гнутого профиля, без снижения прочностных характеристик каркаса позволит экономить не только на металле, но и на последующей транспортировке готовых комплектов опалубки к месту строительства.

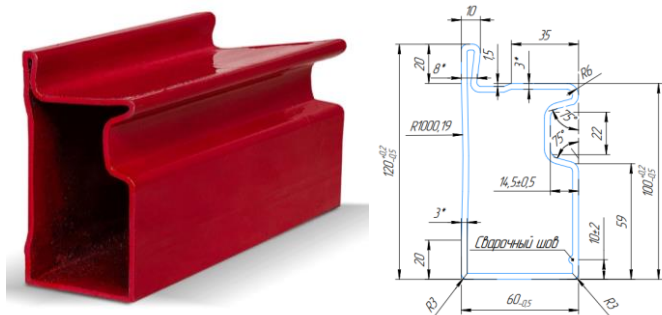


Рис. 2. Гнутый профиль

Целью настоящей работы является разработка компьютерной модели в программе QForm, обеспечивающей возможность моделирования процесса валковой формовки профильных труб из круглых для поиска ресурсосберегающих технических решений изготовления требуемого стального каркаса из проката повышенной прочности меньшей толщины.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГНУТОГО ПРОФИЛЯ

В качестве исходной заготовки для изготовления гнутого профиля используются трубы стальные электросварные прямошовные по ГОСТ 10706-76 Ø120 мм с толщиной стенки от 3,0 до 2,5 мм из стали марки Ст3.

Профилирование трубы осуществляется на автоматизированной линии изготовления профилей, включающей в себя рольганг подающий, гибочно-прокатный станок, пилу отрезную и приемный стол со сбрасывателем [8].

Гибочно-прокатный станок состоит из 24 клетей. Первые две и последние две клетки являются приводными. Скорость прокатки составляет 0,1 м/с. Двадцать клетей имеют горизонтальное расположение валков и четыре – вертикальное.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАЛКОВОЙ ФОРМОВКИ В ПРОГРАММЕ QFORM

Для компьютерного моделирования формовки гнутого профиля используют [9-12] специализированные пакеты,

такие как Ansys, Nastran, Abagus, Ls-dyna в основу которых заложен метод конечных элементов.

В последнее время широкое распространение и доступность для предприятий и учебных заведений получил пакет отечественной разработки – QForm [13]. Программный продукт достаточно хорошо себя зарекомендовал при моделировании процессов штамповки [14], прессования [15], прокатки [16, 17]. В то же время опыт использования этого пакета для операций валковой формовки в литературных источниках обнаружен не был.

Для осуществления моделирования была использована версия QForm 9.0.10.

В первом случае при моделировании задавались следующие параметры:

- длина заготовки 400 мм (деформируемой части 300 мм);
- диаметр 120 мм;
- толщина стенки 3,0 мм;
- марка стали Ст3,
- переразбитие заготовки каждые 100 шагов;
- постоянный шаг по деформации 10 мс.

Расчет осуществляется с учетом упругопластических деформаций. Тепловые процессы не учитываются. Считаем, что деформационный разогрев несущественный, так же как разогрев от трения. Учитывается наследование накопленной деформации между операциями.

Модель разбита по операциям. В каждой последующей операции после второй заготовку в клеть задает толкатель, имитируя валки предшествующей группы. Горизонтальные и вертикальные валки моделируются одной операцией чтобы исключить потерю устойчивости заготовки.

Необходимость моделирования технологии формования профиля из трубы Ø120x3,0 мм вызвана необходимостью проверки адекватности компьютерного моделирования реальному процессу формоизменения. Для гнутого профиля из стали марки Ст3 с толщиной стенки 3,0 мм в нашем распоряжении имеются результаты фотофиксации процесса формоизменения по всем 24 клетям, что позволяет нам путем сравнения сходимость результатов моделирования и профилирования в условиях действующего производства. В качестве примера на рис. 3 приведены поперечные сечения трубы в процессе профилирования в нескольких клетях.

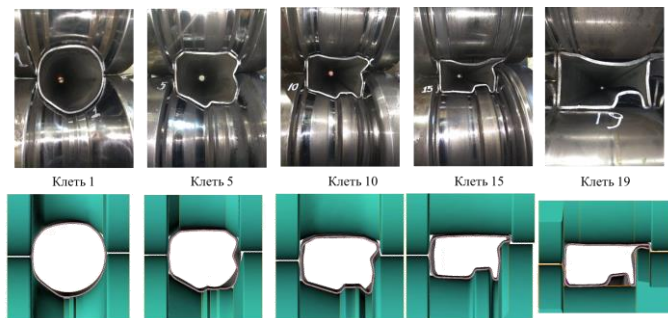


Рис. 3. Сравнение поперечного сечения реального профиля (сверху) и полученного в процессе компьютерного моделирования (снизу)

Анализ полученных изображений показал, сходимость достаточную для проведения компьютерного моделирования с целью выявления особенностей формоизменения

при использовании в качестве заготовки трубы повышенной прочности с уменьшенной толщиной стенки.

Во втором случае при моделировании задавались следующие параметры:

- длина заготовки 400 мм (деформируемой части 300 мм);
- диаметр 120 мм;
- толщина стенки 2,2 мм;
- марка стали 09Г2С.

Для сравнения контакта валков с заготовкой в компьютерной модели с реальным производством была выбрана клеть № 5 (рис. 4, 5).

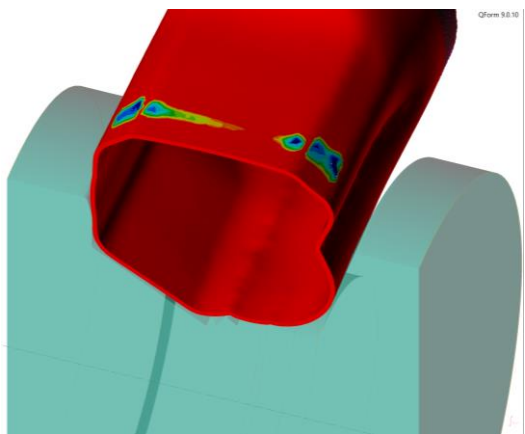


Рис. 4. Зоны контакта верхнего валка с заготовкой в горизонтальной клетей №5

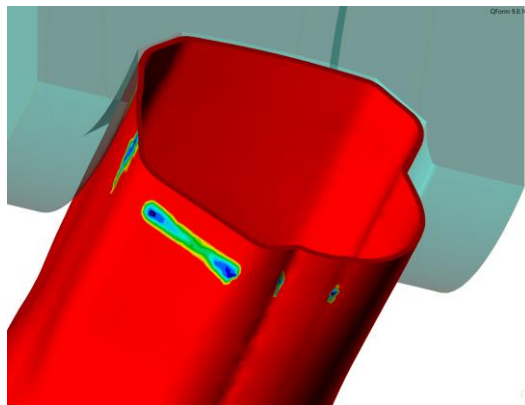


Рис. 5. Зоны контакта нижнего валка с заготовкой в горизонтальной клетей №5

Синим и темно синим цветом показаны зоны контакта заготовки с инструментом в компьютерной модели.

Зоны контакта в шестой и последующих клетях имеют аналогичные области, это частично говорит о достоверности результатов, однако для подтверждения сходимости необходимо также анализировать геометрию полученного профиля, для этого были выгружены данные полученной заготовки в формате «.STL». Оценка геометрических параметров производилась путем разбития 3D-модели заготовки на три случайных сечения и их сравнения для отсеивания ошибок геометрии, полученных в результате компьютерного моделирования. В результате анализа дефекты геометрии, возникшие при моделировании схожи с дефектами, получаемыми на производстве, а именно: за-

вал замковой впадины; точность геометрии паза и примыкающего к нему отгиба (рис. 6).

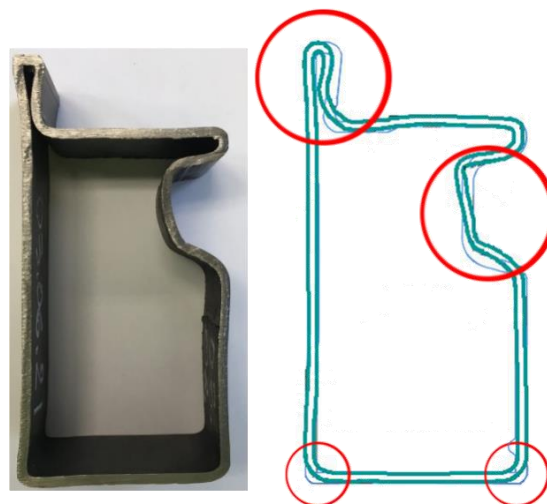


Рис. 6. Профиль с указанием дефектов геометрии

Результаты компьютерного моделирования профиля из стали 09Г2С с толщиной стенки 2,2 мм показаны на рис. 7.

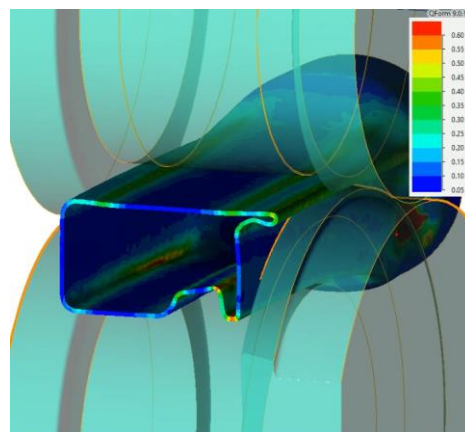


Рис. 7. Результаты компьютерного моделирования профиля из стали 09Г2С с толщиной стенки 2,2 мм

На рис.7 указана степень пластической деформации в сечении профиля, которая позволит определить наиболее опасные с точки зрения разрушения участки профиля при недостаточной пластичности материала заготовки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

Разработанная компьютерная модель валковой формовки гнутого профиля сложной конфигурации из сварной трубы показала высокую сходимость с реальным процессом формовки в 24 клетьевом гибочно-прокатном станке. Исследование процесса формовки профиля из стальной электросварной прямошовной трубы Ø120 мм с толщиной стенки 2,2 мм из стали марки 09Г2С показало возможность получения профиля с повышенными механическими свойствами и пониженной металлоемкостью на имеющемся оборудовании. Дефекты присущие профилю, полученному путем моделирования, полностью совпадают с реальным профилем. Компьютерное моделирование валковой формовки в пакете QForm в дальнейшем может

быть использовано для изменения калибровки валков с целью повышения качества готовой продукции, за счет улучшения геометрии профиля.

ЛИТЕРАТУРА

1. <https://opalubka-expert.ru/oborachivaemost-opalubki/> (дата обращения 10.09.2021).
2. https://zmk.ru/produkcija/stenovaya_opalubka (дата обращения 10.09.2021).
3. <https://rigel-system.ru/opalubka/stenovaya-opalubka> (дата обращения 10.09.2021).
4. <https://ptmonolit.ru/product/krupnoshhitovaja-stenovaja-opalubka/> (дата обращения 10.09.2021).
5. <https://www.opalubka.pro/> (дата обращения 10.09.2021).
6. <http://spbopalubka.ru/info/kakaya-opalubka-luchshe-stalnaya-ili-aluminiumevaya> (дата обращения 10.09.2021).
7. Радионова Л.В. Преимущества и недостатки способа горячего оцинкования стальной полосы. Проблемы цинкования / Л.В. Радионова, Ю.М. Субботина // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – № 2. – С. 3-9.
8. <http://ulniat.ru/production/3/> (дата обращения 10.09.2021).
9. Илюшкин М.В. Моделирование контактных взаимодействий роликового инструмента с полкой профиля швеллерного типа при изготовлении гнутых профилей методом интенсивного деформирования / М.В. Илюшкин, В.И. Филимонов, В.В. Марковцева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, № 1(2). – С. 397-400.
10. Шенюгин В.П. Методика расчета технологических параметров при профилировании / В.П. Шенюгин, Н.В. Тепин, В.А. Храбров, А.С. Постнов // Заготовительные

производства в машиностроении. – 2007. – № 4. – С. 35-37.

11. Akopyan K.E. Mathematical simulation of the forming of a round welded steel tube into a square profile in four-roll passes / K.E. Akopyan, A.V. Kolobov, D.A. Rodichev, M.S. Seleznev, V.S. Trusov, E.S. Fedotov, V.S. Yusupov // Russian Metallurgy (Metally). – 2012. – № 5. – P. 375-379.
12. Скачков С.В. Особенности автоматизированных расчетов элементов из тонкостенных стальных профилей / С.В. Скачков // Интернет-журнал Науковедение. – 2012. – № 3. – С. 1-6.
13. <https://www.qform3d.ru/products> (дата обращения 10.09.2021).
14. Гладков Ю.А. Моделирование технологических процессов штамповки при решении задач авиа- и двигателестроения / Ю. А. Гладков, П. С. Мордвинцев // КШП. ОМД. – 2012. – № 5. – С. 38-46.
15. Радионова Л.В. Компьютерное моделирование температурных режимов при полунепрерывном прямом прессовании легкоплавких материалов / Л.В. Радионова, С.Р. Фаизов, Д.В. Громов, И.Н. Ермаков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 30-38. doi: 10.14529/met200404.
16. Павлова М.А. Исследование влияния точности настройки осей центрователей прошивного стана на разнотолщинность гильз с использованием QForm / М.А. Павлова, Д.Ю. Звонарев, Д.А. Ахмеров, М.А. Зинченко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2021. – Т. 21, № 4. – С. 56-62. doi: 10.14529/met210407.
17. Король А.В. Компьютерное моделирование процесса прошивки в стане винтовой прокатки с бочковидными валками / А.В. Король, А.В. Выдрин, В.В. Широков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 68-74.

Simulation in the QForm Program of Roll Forming for a Profile from a Round Welded Pipe

Gromov D.V., Erdakov I.N., Radionova L.V., Svistun A.S.

South Ural State University
(national research university)
Chelyabinsk, Russian Federation

gromov111999@gmail.com, erdakovin@susu.ru, radionovalv@rambler.ru, svistaryk@mail.ru

Abstract. The article presents a computer model of roll forming of a complex bent profile from a welded pipe, implemented in a specialized program QForm. Checking the adequacy of the model showed a high convergence with the real processes of forming in a 24 stand bending-rolling machine. The study of the process of forming a profile from a steel electric-welded longitudinal-seam pipe Ø120 mm with a wall thickness of 2.2 mm from steel grade 09G2S showed the possibility of obtaining a profile with increased mechanical properties and reduced metal consumption on the existing equipment. The defects inherent in the

profile obtained by modeling completely coincide with the real profile. Computer simulation of roll forming in the QForm package can later be used to change the calibration of the rolls in order to improve the quality of the finished product by improving its geometry.

Keywords: roll forming, profile, formwork, monolithic construction, simulation.

Моделирование и прочностной анализ при проектировании оснастки для прямого прессования легкоплавкого припоя

Фаизов С.Р., Радионова Л.В.

Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)
г. Челябинск, Российская Федерация
faizovsr@susu.ru, radionovalv@rambler.ru

Аннотация. В программном комплексе SOLIDWORKS Simulation выполнен прочностной анализ технологической оснастки, спроектированной для прямого прессования проволоочного припоя $\Phi 2$ мм из литой заготовки $\Phi 22$ мм сплава ПОИн-52. Анализ показал, что для повышения запаса прочности и обеспечения бесперебойной надежной ее работы при мелкосерийном производстве проволоочного припоя необходимо изменить конструктивное исполнение конической части пресс-штемпеля, а также заменить марку стали с 40X на 30XM при изготовлении контейнера. Это позволит обеспечить запас прочности конструкции не менее 2, что является достаточным для технологической оснастки металлургического оборудования. Конструкторское решение по использованию монолитной волоки в качестве матрицы для прессования, с точки зрения прочностного анализа ее работы, оказалось верным. Волока из сплава ВК6 в оправке из стали марки 45 не является элементом, снижающим общий прочностной запас оснастки.

Ключевые слова: легкоплавкий припой, ПОИн-52, прямое прессование, оснастка, гидравлический пресс, прочностной анализ, моделирование

ВВЕДЕНИЕ

Легкоплавкий припой применяется для соединений микропроцессоров с платами при производстве компьютерной техники [1-3]. Технологические особенности монтажа и автоматизированной пайки требуют получения припоя в различном типоразмере поставки: гранулы, проволока и прутки различного диаметра [4]. По состоянию на 2016 год припой из сплава ПОИн-52 является одним из наиболее часто используемых в полупроводниковой технологии. Не содержащий свинца, эвтектический припой из олова (47-49%) и индия (51-53%) имеет очень низкие температуры плавления и хорошо связывается с медными, никелевыми и золотыми подложками [5].

Традиционная технология производства проволоочных припоев состоит из следующих этапов: подготовка сплава, разливка слитков (диаметром 100-200 мм), экструзия, волочение до необходимого диаметра [6]. В некоторых случаях может применяться между экструзией и волочением прокатка заготовки.

Традиционная технология производства припоя требует не только большого парка оборудования, но также часто сопряжена с проблемами, связанными со стабильностью процесса волочения. Частые обрывы проволоки при прокатке и особенно при волочении [7-12] требуют совершенствования технологии ее производства. В то же

время известны методы изготовления проволоки прессованием (экструзией) [13-15], которая используется в медицине.

Для мелкосерийного производства проволоочного припоя нами был предложен [16] способ прямого прессования на гидравлическом прессе (рис. 1) с применением оснастки (рис. 2).

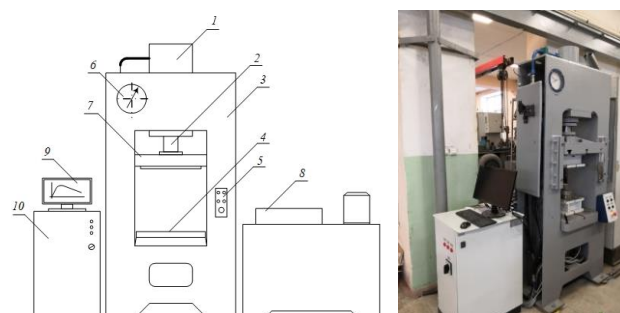


Рис. 1. Схема и фото лабораторного гидравлического пресса: 1 – главный цилиндр; 2 – шток; 3 – станина; 4 – рабочий стол; 5 – пульт управления; 6 – манометр; 7 – ползун; 8 – маслостанция; 9 – монитор; 10 – блок управления и сбора данных

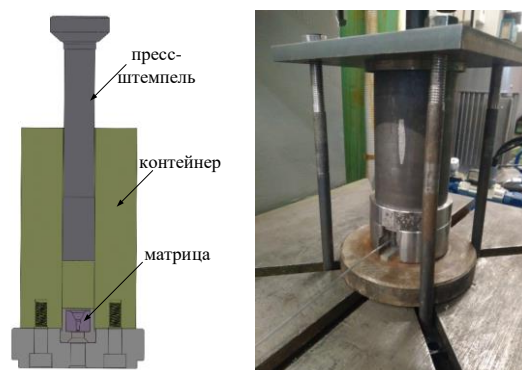


Рис. 2. Эскиз и фото оснастки

Разработка технологии в основе которой лежит процесс прессования требует проектирования оснастки, которая бы обеспечивала стабильность процесса производства проволоочного припоя требуемых геометрических размеров. Основными требованиями к оснастке являются обеспечение необходимого запаса прочности, низкая стоимость изготовления, обусловленная использованием ми-

нимального количества операций механической обработки и использованием в качестве заготовок материалов низкой ценовой категории.

Ранее нами был выполнен ряд работ, в которых разрабатывалась математическая модель энергосиловых параметров процесса прямого прессования легкоплавкого припоя [17-18], решалась оптимизационная задача [19], компьютерным моделированием оценивались температурно-скоростные условия полунепрерывного процесса прессования [20], исследовалось влияние коэффициента трения на энергосиловые параметры [21, 22].

Целью настоящей работы является оценка путем прочностного анализа при моделировании работоспособности и обоснованности конструкторских решений спроектированной оснастки для прямого прессования легкоплавкого проволоночного припоя.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОЧНОСТНОЙ АНАЛИЗ ОСНАСТКИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ SOLIDWORKS SIMULATION

Для моделирования и выполнения прочностных расчетов был использован программный комплекс для проектировщиков, конструкторов и аналитиков SOLIDWORKS. Анализ подверглась оснастка (рис. 2) для прессования проволоночного припоя $\varnothing 2$ мм из литой заготовки $\varnothing 22$ мм сплава ПОИп-52, включающая в себя пресс-штемпель, который передаёт усилие на заготовку от гидравлического пресса (рис.1), контейнер, представляющий собой металлический цилиндр со сквозным отверстием постоянного сечения и имеющий на основании шесть резьбовых отверстий для фиксации матрицы через прижим, непосредственно сам прижим с глухим посадочным отверстием под матрицу с оправкой и саму оправку, необходимую для позиционирования матрицы в контейнере и прижиме.

Основной деталью оснастки является пресс-штемпель. Пресс-штемпели могут быть составными или монолитными. При проектировании оснастки для прессования проволоки из сплава ПОИп-52 был выбран вариант монолитного исполнения (рис.3), т.к. он является более простым в изготовлении.

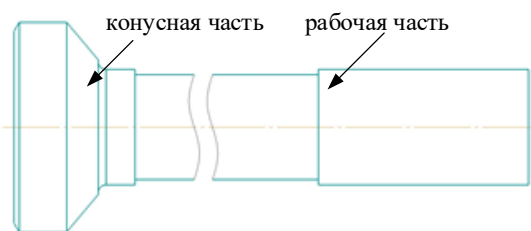


Рис. 3. Эскиз монолитного пресс-штемпеля

Конусная часть (рис.3) необходима для центрирования пресс-штемпеля в момент извлечения его из контейнера для равномерного распределения усилия. Рабочая часть, которая в данном случае представляет из себя шлифованную цилиндрическую поверхность (рис.3), рабочая часть имеет минимальный зазор с каналом контейнера для обеспечения строго вертикального положения пресс-штемпеля. За счет этого уменьшается износ контейнера, а также вероятность образования задиров на поверхности канала контейнера.

В процессе прессования пресс-штемпель испытывает нагрузку сжатия, которая определяется усилием прессова-

ния. Усилие прессования в свою очередь зависит, от коэффициента вытяжки, механических свойств прессуемого материала и трения возникающего в процессе прессования на контакте между обрабатываемым материалом и инструментом.

Максимальное усилие, которое возникает в начальный момент прессования, согласно измерениям, приведенным в работе [18], составляет 150 кН. В качестве материала детали при моделировании была выбрана сталь марки У8, ГОСТ 1435-99 с пределом текучести равным 1200 МПа. На рис.4 показана карта распределения напряжений по всем продольному сечению пресс-штемпеля. Минимальное напряжение составляет 40 МПа и находится цилиндрической поверхности опоры пресс-штемпеля, а максимальное напряжение составляет 795 МПа и находится на галтели под опорой пресс-штемпеля (рис.5). Исходя из результатов анализа максимальный коэффициент запаса прочности будет равен 30, а минимальный составит 1,5 и будет соответствовать галтели на переходе от конусной части опоры к телу стержня.

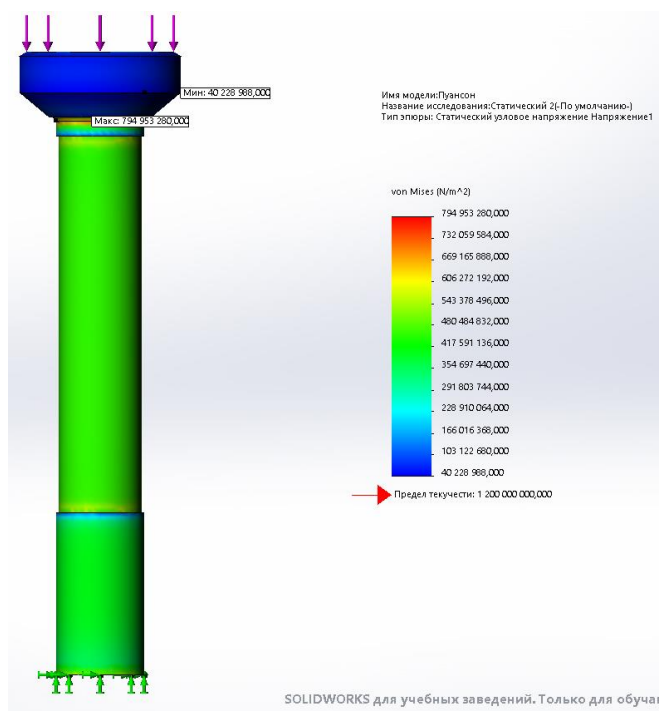


Рис. 4. Прочностной анализ пресс-штемпеля

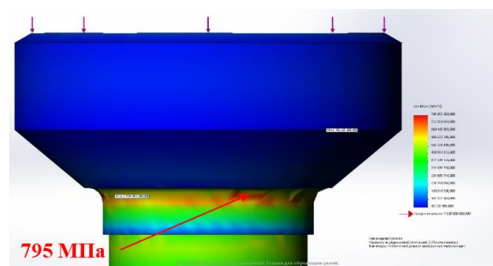


Рис. 5. Участок пресс-штемпеля с максимальным напряжением

Запас прочности 1,5 недостаточен для безаварийной работы, поэтому было принято решение о совершенствовании конструкции пресс-штемпеля. При проектировании

металлургического оборудования и технологической оснастки принято принимать коэффициент запаса прочности не менее 2, а в некоторых случаях вплоть до 10. Это обусловлено высокими требованиями к надёжности и универсальности конструкций, а также возможностью повышения запаса прочности за счёт увеличения металлоёмкости конструкций.

Было проанализировано 4 варианта конструктивного исполнения перехода от опоры пресс-штемпеля к его стержню (рис. 6).

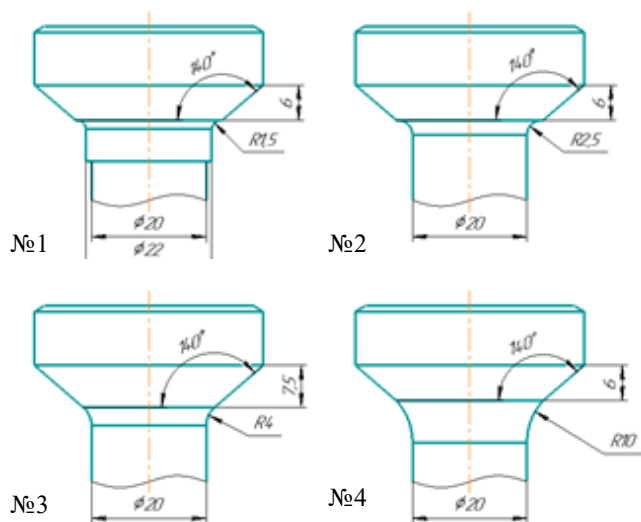


Рис. 6. Варианты конструктивного исполнения перехода от конической части к стержню пресс-штемпеля

В результате исследования установлено, что конструктивное исполнение №4 является более обоснованным, т.к. позволяет увеличить коэффициент запаса прочности в 1,4 раза (табл.1) без применяя более дорогостоящих марок стали. Также у этого варианта более равномерно распределены напряжения по всему объёму детали. Максимальное напряжение составляет 582 МПа (рис. 7).

Таблица 1

Результаты прочностного анализа пресс-штемпеля

Конструктивное исполнение	№1	№2	№3	№4
Мах напряжение, МПа	795,0	788,0	709,0	582,0
Min напряжение, МПа	40,2	40,1	41,3	42,2
Мах коэффициент запаса прочности	29,9	29,9	29,1	28,4
Min коэффициент запаса прочности	1,5	1,5	1,7	2,1

Второй не менее важной и ответственной деталью оснастки является контейнер (см.рис.2). Контейнер представляет собой металлический цилиндр со сквозным отверстием постоянного сечения и имеющий на основании шесть резьбовых отверстий для фиксации матрицы через прижим. В отличие от пресс-штемпеля, при проектировании контейнера нет ограничений на геометрию продольного сечения, кроме размера канала контейнера, обусловленного коэффициентами вытяжки. На основании результатов моделирования процесса прямого прессования в про-

граммном комплексе QForm было установлено [22], что величина давления на поверхность канала контейнера составляет 120 МПа (рис. 8).

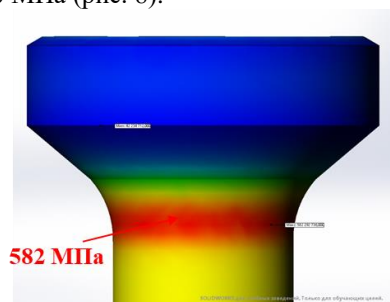


Рис. 7. Участок пресс-штемпеля № 4 с максимальным напряжением

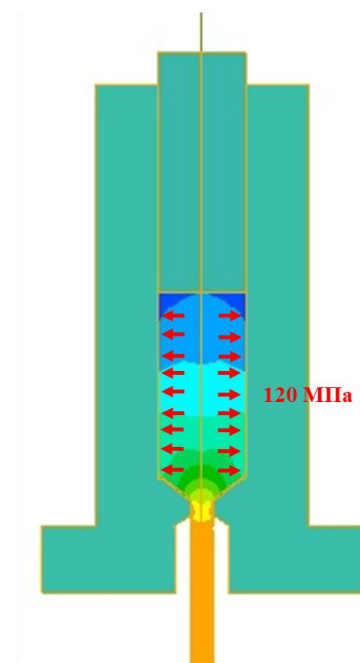


Рис. 8. Результаты компьютерного моделирования прессования припоя в пакете QForm

Исходя из этой информации был произведен прочностной анализ контейнера совместно с прижимом. В качестве материала контейнера и прижима была выбрана сталь марки 40X по ГОСТ 4543-2016 с пределом текучести равным 350 МПа. На рис.9 представлены результаты моделирования напряженно-деформированного состояния контейнера. Исследование показало, что максимальная величина напряжений равна 228,8 МПа и сконцентрированы они в поверхностном слое канала контейнера. Минимальный коэффициент запаса прочности составляет 1,53. В районе резьбовых отверстий для крепления прижима возникающие напряжения не превышают величину 100 МПа.

Для выбора подходящего варианта исполнения контейнера и подходящей марки стали был произведён прочностной расчёт четырёх вариантов контейнера для прессования. Результаты расчётов представлены в табл. 2. Исходя из полученных результатов с уверенностью можно сказать что изменение геометрии контейнера для прессования в сторону увеличения толщины стенок не

даёт значительного эффекта для повышения коэффициента запаса прочности, хотя именно изменение геометрии продольного сечения пресс-штемπεля позволило повысить его запас прочности в 1,4 раза. Связано это в первую очередь с тем, что максимальные напряжения сконцентрированы в поверхностном слое канала контейнера (см. рис. 9). В таком случае остаётся лишь в качестве материала для изготовления контейнера использовать марки стали с более высоким значением предела текучести. При расчёте варианта №2 (табл.2) была выбрана сталь марки 30ХМ по ГОСТ 4543-2016. При использовании данной марки стали удалось повысить коэффициент запаса прочности в 2,1 раза до величины 3,22.

Таблица 2

Результаты прочностного анализа контейнера

Вариант исполнения	№1	№2	№3	№4
Марка стали	40X	30X М	30X М	40X
Диаметр контейнера, мм	78	78	90	90
Мах напряжения, МПа	229	229	226	225
Min коэффициент запаса прочности	1,53	3,22	3,26	1,55

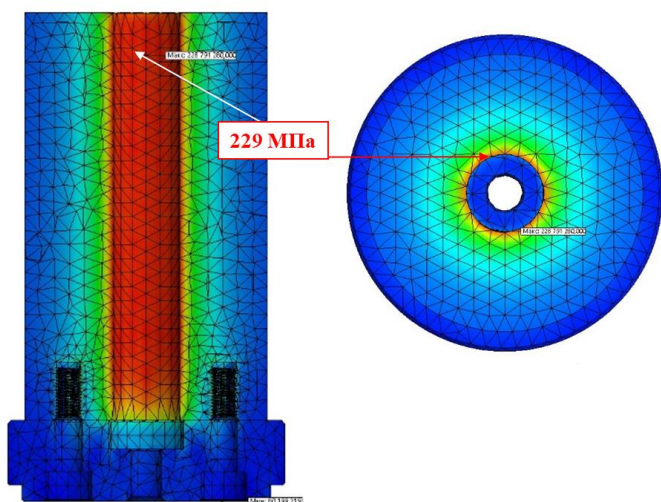


Рис. 9. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния контейнера

Матрица, входящая в оснастку для прессования, является наиболее важным и быстроизнашивающимся технологическим инструментом, в котором совершается формоизменение металла. Она формирует поверхность получаемого проволочного припоя, определяет её шероховатость и точность геометрических размеров. Матрицы изготавливают из штамповых сталей, жаропрочных и твердых сплавов. Основными видами износа являются формоизменение и потеря геометрических размеров канала матрицы, хрупкое разрушение и образование трещин, а также образование задигов на поверхности канала матрицы. Все эти перечисленные факторы влияют на качество получаемого проволочного припоя. В связи с этим целесообразно рассмотреть возможность применять готовые заводские решения в виде монолитных твердосплавных волок для волочения проволоки. Данная возможность, по сравнению с изготовлением матриц позволит сократить затраты на

рабочий инструмент для прессования, а также сократить время простоя оборудования для прессования проволочного припоя из сплава ПОИИ-52.

Проведя поверхностный анализ рынка волочильного инструмента, можно выделить доступность твердосплавных монолитных волок из сплавов ВК6 и ВК8 по ГОСТ 9453-75 с пределом прочности 1519 МПа и 1660 МПа соответственно.

В рамках данного исследования был произведен прочностной анализ твердосплавной монолитной волоки (матрицы) из сплава ВК6, т.к. именно этот сплав из доступных имеет меньший предел прочности.

По результатам проведенного прочностного анализа было установлено, что максимальное напряжение составляет 265,6 МПа и находится на переходе от входной в деформирующую зону, а минимально значение равно 5,2 МПа находится на верхнем основании выходного конуса оправки (рис.10).

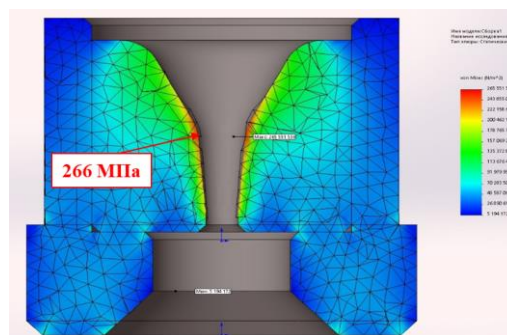


Рис. 10. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния матрицы

В исследовании рассматривалась не только твердосплавная волока, но и совмещённая с ней оправка необходимая для позиционирования волоки в контейнере и прижиме. В качестве материала для оправки была выбрана сталь марки 45 по ГОСТ 1050-2013 с пределом текучести 360 МПа. Так как твердосплавная монолитная волока будет работать совместно с оправкой, то минимальный коэффициент запаса прочности сборочной единицы будет равен 3,4 исходя из результатов моделирования, результаты которого приведены на рис.11, в то время как коэффициент запаса прочности самой твердосплавной волоки будет равен 5,7.

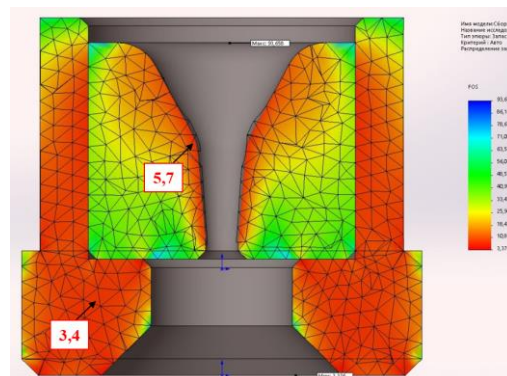


Рис. 11. Результаты расчета запаса прочности сборочной единицы «волока-оправка»

Данный результат позволяет в случае необходимости повысить максимально допустимые напряжения в сборочной единице «волока-оправка», заменив лишь марку стали оправки или подвергнув ее упрочняющей термической обработке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прочностной анализ, проведенный в программном комплексе SOLIDWORKS Simulation, оснастки, спроектированной для прямого прессования проволочного припоя $\varnothing 2$ мм из литой заготовки $\varnothing 22$ мм сплава ПОИн-52 показал, что для повышения запаса прочности и обеспечения бесперебойной надежной ее работы при мелкосерийном производстве необходимо изменить конструкционное исполнение конической части пресс-штемпеля, заменить марку стали с 40X на 30XM при изготовлении контейнера. Это позволит обеспечить запас прочности конструкции не менее 2, что является достаточным для технологической оснастки металлургического оборудования. Конструкторское решение по использованию монолитной волоки в качестве матрицы для прессования, с точки зрения прочностного анализа ее работы, оказалось верным. Волока из сплава ВК6 в оправке из стали марки 45 не является элементом, снижающим общий прочностной запас оснастки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Медведев А.М. Электронные компоненты и монтажные площадки / А.М. Медведев // Компоненты и технологии. – 2006. – № 12.
2. Зенин В.В. Бессвинцовые припои в технологии производства изделий микроэлектроники / В.В. Зенин, В.Н. Беляев, Ю.Е. Сегал, А.А. Колбенков // Микроэлектроника. – 2003. – Т. 32, № 4. – С. 310-320.
3. Шапиро Л. Использование бессвинцовых технологий не избежать / Л. Шапиро // Вестник электроники. – 2007. – № 2.
4. Медведев А.М. Бессвинцовые технологии монтажной пайки. Что нас ожидает? / А.М. Медведев // Электронные компоненты. – 2004. – № 11.
5. Morris J.W. Microstructure and mechanical properties of Sn-In and Sn-Bi solders / J.W. Morris, J.L.F. Goldstein, Z. Mei // J. Miner. Met. Mater. Soc. – 1993. – Vol. 45. – P. 25-27. doi:10.1007/BF03222376.
6. <http://victorymachine.en.hisupplier.com/> (дата обращения 10.09.2021).
7. Харитонов В.А. Проектирование ресурсосберегающих технологий производства высокопрочной углеродистой проволоки на основе моделирования: монография / В.А. Харитонов, Л.В. Радионова. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. – 171 с.
8. Гурьянов Г.Н. Методика расчета оптимального угла рабочего конуса волоки при волочении круглого сплошного профиля / Г.Н. Гурьянов // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – № 6. – С. 58-60.
9. Radionova L.V. New technological lubricants for steel wire drawing / L.V. Radionova, V.A. Kharitonov, V.I. Zyuzin, L.D. Rol'shchikov // Steel in Translation. – 2001. – № 12. – P. 49-50.
10. Добров И.В. Развитие энергетического метода расчета силовых параметров процесса волочения полосы в монолитной волоке с противонапряжением / И.В. Добров // Производство проката. – 2016. – № 2. – С. 36-44.
11. Радионова Л.В. Разработка технологии производства высокопрочной проволоки с повышенными пластическими свойствами из углеродистых сталей: дис. ... канд. техн. наук. – Магнитогорск, 2001. – 137 с.
12. Радионова Л.В. Современное состояние и перспективы развития волочильного производства стальной проволоки / Л.В. Радионова, А.А. Радионов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – Челябинск, 2013. – №1. – С. 3-11.
13. Валиев Р.З. Наноструктурный титан для биомедицинских применений: новые разработки и перспективы коммерциализации / Р.З. Валиев, И.П. Семенова, В.В. Латыш, А.В. Щербаков, Е.Б. Якушина // Российские нанотехнологии. – 2008. – Т. 3, № 9-10. – С. 106-111.
14. Xu H. Influence of texture on the mechanical properties of a Mg-6Al-1Zn-0.9Sn alloy processed by ECAP / H. Xu, Z.-P. Guo, P.-Y. Zhang, Y. Zhou, P.-K. Ma // Materials. – 2021. – Vol. 14 (10). – 2664. doi:10.3390/ma14102664.
15. Liao Q. Microstructure, mechanical properties and texture evolution of Mg-Al-Zn-La-Gd-Y magnesium alloy by hot extrusion and multi-pass rolling / Q. Liao, W. Hu, Q. Le et al. // Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.). – 2020. – Vol. 33. – P. 1359-1368. doi:10.1007/s40195-020-01062-8.
16. Глебов Л.А. Припой ПОИн-52: исследование процесса и разработка технологии мелкосерийного производства проволоки / Л.А. Глебов, Л.В. Радионова, С.С. Фаизов; под ред. А.Г. Корчунова // Magnitogorsk Rolling Practice 2019: материалы IV молодежной научно-практической конференции. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. – С. 54-56.
17. Radionova L.V. Mathematical modelling of low temperature solder direct extrusion / L.V. Radionova, S.R. Faizov, A.E. Sarafanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 969 (1). – 012107.
18. Радионова Л.В. Математическое моделирование энергосиловых параметров прямого прессования легкоплавких материалов / Л.В. Радионова, С.Р. Фаизов, В.Д. Лезин, А.Е. Сарафанов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 71-79. doi: 10.14529/met200207.
19. Радионова Л.В. Оптимизация процесса прямого прессования проволоки из сплава ПОИн-52 методом обобщенного приведенного градиента / Л.В. Радионова, С.Р. Фаизов, И.Н. Ермаков, А.В. Брык // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 54-65. doi: 10.14529/met210106.
20. Радионова Л.В. Компьютерное моделирование температурных режимов при полунепрерывном прямом прессовании легкоплавких материалов / Л.В. Радионова, С.Р. Фаизов, Д.В. Громов, И.Н. Ермаков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 30-38. doi: 10.14529/met200404.
21. Радионова Л.В. Определение показателя трения в процессе прямого прессования проволочного и пруткового припоя ПОИн-52 / Л.В. Радионова, С.Р. Фаизов, Д.В. Громов и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 56-66. doi: 10.14529/met210307.
22. Faizov S. On the direct extrusion of solder wire from 52In-48Sn alloy / S. Faizov, A. Sarafanov, I. Erdakov, D.

Modeling and Strength Analysis of Direct Extrusion Tooling for Fusible Solder

Faizov S.R., Radionova L.V.

South Ural State University (national research university)

Chelyabinsk, Russian Federation

faizovsr@susu.ru, radionovalv@rambler.ru

Abstract. Strength analysis of technological equipment designed for direct extrusion of 2 mm solder wire from a cast billet of 22 mm 52In-48Sn alloy was performed in the SOLIDWORKS Simulation software package. The analysis showed that to increase the safety margin and ensure its uninterrupted reliable operation during the small-scale production of solder wire, it is necessary to change the design of the conical part of the ram, and also to replace the steel grade from 37Cr4 to 25CrMo4 when manufacturing a container. This will ensure the safety margin of the structure equal to at least 2, which is sufficient for the techno-

logical equipment of metallurgical equipment. The structural decision to use a monolithic die as a matrix for extrusion turned out to be correct, according to the results of the strength analysis. The YG6 alloy matrix in the C45 grade steel mandrel is not an element that reduces the overall strength of the tool.

Keywords: fusible solder, 52In-48Sn alloy, direct extrusion, tooling, hydraulic press, strength analysis, modeling.

Расстановка РМУ на вставке постоянного тока в задаче оценивания состояния ЭЭС

Колосок И.Н., Коркина Е.С.
ИСЭМ СО РАН
Иркутск, Россия
kolosok@isem.irk.ru, korkina@isem.irk.ru

Тихонов А.В.
ООО "Русал ИТЦ"
Иркутск, Россия
tikhonovaleks@mail.ru

Аннотация. В статье представлена разработанная в ИСЭМ СО РАН модель вставки постоянного тока на преобразователях напряжения (ВПТН) для решения задачи ОС. Данная модель была использована для включения ВПТН в схему замещения российской подстанции для расчета текущего режима ЭЭС. В настоящее время данная подстанция оборудована как датчиками телеизмерений SCADA, так и РМУ. Применение синхронизированных векторных измерений (СВИ) для ОС рассматриваемой схемы с ВПТН проведено в расчетах по реальным данным SCADA и РМУ. Показано, что для эффективного мониторинга параметров ВПТН по СВИ необходимо провести расстановку РМУ, чтобы обеспечить полную наблюдаемость схемы для выполнения линейного ОС и получения оценок высокой точности.

Ключевые слова: Вставка постоянного тока (ВПТ), РМУ, FACTS, оценивание состояния.

ВВЕДЕНИЕ

Создание интеллектуальной энергосистемы в России (Smart Grid) предусматривает широкое внедрение технологии FACTS - управляемых (гибких) систем передачи переменного тока. Технология FACTS открывает новые возможности для управления электроэнергетическими системами, так как обеспечивает регулирование взаимосвязанных параметров схемы и режима. К категории устройств FACTS относятся ВПТН – вставки постоянного тока на базе преобразователей напряжения (ПН) с использованием современной силовой электроники. Такие ВПТН обладают широкими возможностями управления параметрами режима и обеспечивают регулирование как активной, так и реактивной мощности в широких пределах.

Для решения задачи оценивания состояния энергосистем с ВПТН необходимо включение моделей ВПТН в схему замещения сети и оснащение их измерениями. Традиционно используются телеизмерения (ТИ) SCADA, а с приходом WAMS [1] (Системы мониторинга переходных режимов – СМПР в России [2]) начали применяться измерения нового поколения – синхронизированные векторные измерения (СВИ). ВПТН представляет собой новую подстанцию, которую необходимо спроектировать, построить и оснастить, в том числе и РМУ. Как показано в [3-5 и др.], установка РМУ на устройствах FACTS обеспечивает точную настройку функционирования этих устройств и последующий мониторинг их режимов с помощью методов ОС.

Доклад построен следующим образом. В Секции 2 дано краткое описание задачи ОС ЭЭС – необходимые измерения и базовые алгоритмы. Секция 3 детально пред-

ставляет две модели ВПТН для решения задачи ОС ЭЭС – классическую и упрощенную, разработанную в ИСЭМ СО РАН. Результаты расчетов описаны в Секции 4. Выводы, сделанные в ходе исследований, представлены в Секции 5.

ЗАДАЧА ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ЭЭС. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВИ В ЗАДАЧЕ ОС

Оценивание состояния (ОС) [6] – одна из основных задач подсистемы оперативного управления режимами, используемая для расчета установившегося режима ЭЭС по данным измерений, в качестве которых используются телеизмерения (ТИ) SCADA:

$$\bar{y} = (P_i, Q_i, P_{ij}, Q_{ij}, U_i, I_i, I_{ij})$$

(где U_i - модули узловых напряжений, P_i, Q_i - узловые инъекции активной и реактивной мощности, P_{ij}, Q_{ij} - перетоки мощности в линиях и трансформаторных связях, реже – токи в узлах и линиях I_{ij}, I_{ij}), а также телесигналы (ТС) о состоянии коммутационного оборудования.

С появлением СМПР в задаче ОС стали использоваться СВИ – комплексы узловых напряжений \dot{U}_i и комплексы токов в линиях i_{i-j} , инцидентных узлу, в котором установлено РМУ.

При решении задачи ОС вводится понятие вектора состояния (ВС) x размерностью $2n-1$ (где n - число узлов расчетной схемы), включающего модули U и фазовые углы δ напряжений $x = (\delta, U)$, кроме фиксированной фазы базисного узла. Такой ВС однозначно определяет все остальные переменные режима $y(x)$. Задача оценивания состояния сводится к минимизации критерия:

$$J(x) = [\bar{y} - y(x)]^T R_y^{-1} [\bar{y} - y(x)], \quad (1)$$

т.е. к поиску оценок вектора состояния \hat{x} . Здесь применяется нелинейный алгоритм, задача решается итерационно. Затем полученные оценки \hat{x} используются для расчета оценок измеренных и неизмеренных параметров режима.

В ИСЭМ СО РАН для ОС разработан метод контрольных уравнений (КУ) [7]. КУ – это уравнения установившегося режима, содержащие только измеренные переменные режима y :

$$w_k(y) = 0 \quad (2)$$

При использовании метода КУ задача ОС состоит в минимизации критерия:

$$J(y) = (\bar{y} - \hat{y})^T R_y^{-1} (\bar{y} - \hat{y}) \quad (3)$$

т.е. заключается в расчете оценок измеренных переменных \hat{y} при ограничениях в виде системы КУ (3). Этот метод позволяет проводить проверку достоверности используемых при ОС измерений до расчета их оценок.

Важным показателем эффективности алгоритмов ОС является избыточность измерений, которая показывает, во сколько раз фактическое количество измерений больше базисного количества, необходимого для обеспечения наблюдаемости схемы. Избыточность вычисляется по формуле:

$$\nu = m/(2n-1), \quad (4)$$

где m и n - количество измерений и узлов в схеме. Только достаточная избыточность измерений, порядка 1,8 и выше, обеспечивает возможность обнаружения ошибочных измерений и получение оценок высокой точности. При низкой избыточности возникает проблема критических измерений, ошибки в которых невозможно обнаружить.

Современный комплекс ОС включает решение следующих основных задач:

- достоверизация ТС и оперативное формирование текущей расчетной схемы;
- анализ наблюдаемости текущей расчетной схемы;
- обнаружение грубых ошибок в ТИ (плохих данных);
- расчет оценок ВС, измеренных и неизмеренных параметров режима;
- идентификация параметров моделей, используемых при ОС ЭЭС (параметров схемы замещения, дисперсий измерений, и др.)

Возможны два подхода к использованию СВИ при ОС:

1. *Оценивание состояния на основе совместного исполь-*

зования данных SCADA и СВИ. Это позволяет существенно улучшить наблюдаемость схемы, повысить эффективность методов достоверизации измерений и точность получаемых оценок, проводить обобщенное ОС для проверки правильности ТС и корректного формирования текущей расчетной схемы, имеет ряд преимуществ при ОС схем, разделившихся на подсистемы, поскольку измерения фазовых узлов напряжений в граничных узлах обеспечивают координацию оценок подсистем. К недостаткам этого подхода относится, в первую очередь, необходимость синхронизации измерений, поступающих от разных источников данных.

2. *Оценивание состояния только на основе СВИ.* Это дает возможность выполнения линейного ОС [8] и получение оценок высокой точности, поскольку погрешности СВИ, как правило, на 1-2 порядка меньше погрешностей ТИ SCADA. Но для его реализации требуется установка достаточно большого количества РМУ, что пока трудно реализуемо на российских объектах энергетики.

Для оценки эффективности использования СВИ при ОС схемы сети с ВПТН в данной работе были выполнены расчеты в рамках первого и второго подходов, а также для сравнения расчеты только по ТИ SCADA.

МОДЕЛИ ВПТН И ИХ ВКЛЮЧЕНИЕ В СХЕМУ ЗАМЕЩЕНИЯ ПРИ ОС ЭЭС

Классическая модель. Согласно [9] классическая модель ВПТН для расчета УР и ОС ЭЭС, показанная на рис.1, включает в себя два узла переменного тока (i и j), к которым через понижающие трансформаторы подключены два преобразователя напряжения – выпрямитель и инвертор, и линию постоянного тока между ними.

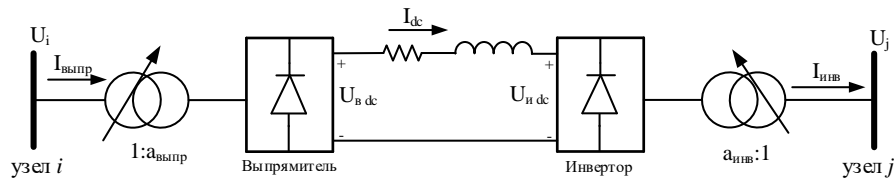


Рис. 1. Классическая модель ВПТН [9]

Такая модель при ОС предполагает включение в вектор состояния 13 компонент, которые должны быть рассчитаны:

- 4 компоненты для узлов переменного тока $U_i, U_j, \delta_i, \delta_j$,
- 4 компоненты интерфейса между переменным и постоянным током $I_i, I_j, \theta_i, \theta_j$
- 5 компонент для линии постоянного тока $U_{Bdc}, U_{Idc}, I_{dc}, \cos \alpha, \cos \beta$, где α и β – углы зажигания/ погасания ПН.

Даже с учетом того, что модули и фазы узлов переменного тока уже включены в ВС, включение такой модели в схему замещения при ОС потребует установки нескольких измерительных устройств для получения измерений, необходимых для расчета оценок оставшихся 9 компонент ВС. Кроме того, уравнения такой модели являются достаточно сложными.

Как было отмечено ранее, ВПТН, использующие в качестве выпрямителей GTO, IGCT или IGBT структуры, обладают широкими возможностями управления параметрами режима и, в дополнение к функции управления активной мощностью, оба ПН могут функционировать как устройства СТАТКОМ. Уравнения установившегося режима для такой ВПТН схожи с уравнениями, описывающими поведение устройств СТАТКОМ [10].

Упрощенная модель. Для моделирования ВПТН, работающей не только в режиме передачи и регулирования активной мощности, но и в режиме СТАТКОМа для поддержания уровней напряжения, в ИСЭМ СО РАН была разработана упрощенная модель для решения задачи ОС [11], в которой ВПТН представлена двумя источниками напряжения [5]. Каждый источник напряжения подключен к системе переменного тока через трансформатор. На рис. 2 показана эквивалентная схема после включения ВПТН.

Переток активной мощности направлен из узла i в узел j . Для моделирования ВПТН к узлу i , осуществляющему передачу мощности, подключаются две ветви, моделирующие трансформатор и выпрямитель. К узлу j , осуществляющему прием мощности, также подключаются две ветви, моделирующие трансформатор и инвертор.

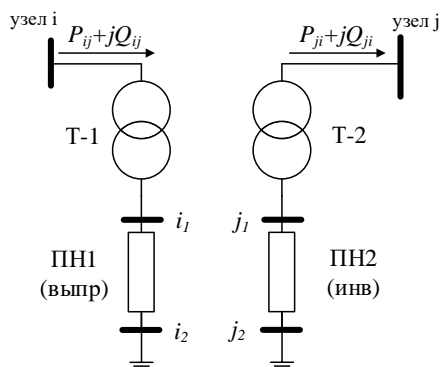


Рис. 2. Схема включения ВПТН для ОС ЭЭС

В этой модели отсутствует линия постоянного тока, она моделируется “разрывом” между двумя ПН – выпрямителем и инвертором. Для описания процесса передачи активной мощности через ВПТН вводится дополнительное уравнение,

$$P_{i_2} + P_{j_2} = 0 \quad (5)$$

учитывающее равенство активной мощности P_{i_2} , потребляемой выпрямителем, и P_{j_2} , выдаваемой инвертором:

СХЕМА ВПТН ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ

В ЭЭС России представлены две вставки постоянного тока:

- Первая реализована на транзисторах (ВПТ Выборг) и служит для связи энергосистемы России с энергосистемой Финляндии в Выборге, введена в эксплуатацию в 1981 году – это самая мощная ВПТ в мире;
- Вторая ВПТН находится в Сибири и служит для синхронизации двух ОЭС и обеспечения обмена резервной мощностью между ними.

Мощность ВПТН, независимо от её технической реализации, принята равной 200 МВт и носит реверсивный характер. Кроме того, вставка несинхронной связи обеспечивает режим работы на выделенную нагрузку, т.е. при разделении ОЭС фрагмент сети с ВПТН выделяется в изолированную энергосистему, которая позволит сбалансировать перетоки и компенсировать аperiodические колебания.

Для получения и преобразования необходимой электрической мощности от существующих сетей напряжением 220 кВ ОЭС 1 и передачи ее в ОЭС 2 (и наоборот) подключение вставки несинхронной связи выполнено на низкой стороне трансформаторов на подстанции.

Для выполнения расчетов использовалась схема подстанции с ВПТН и отходящими ВЛ переменного тока напряжением 220 и 110 кВ, приведенная на Рис.3.

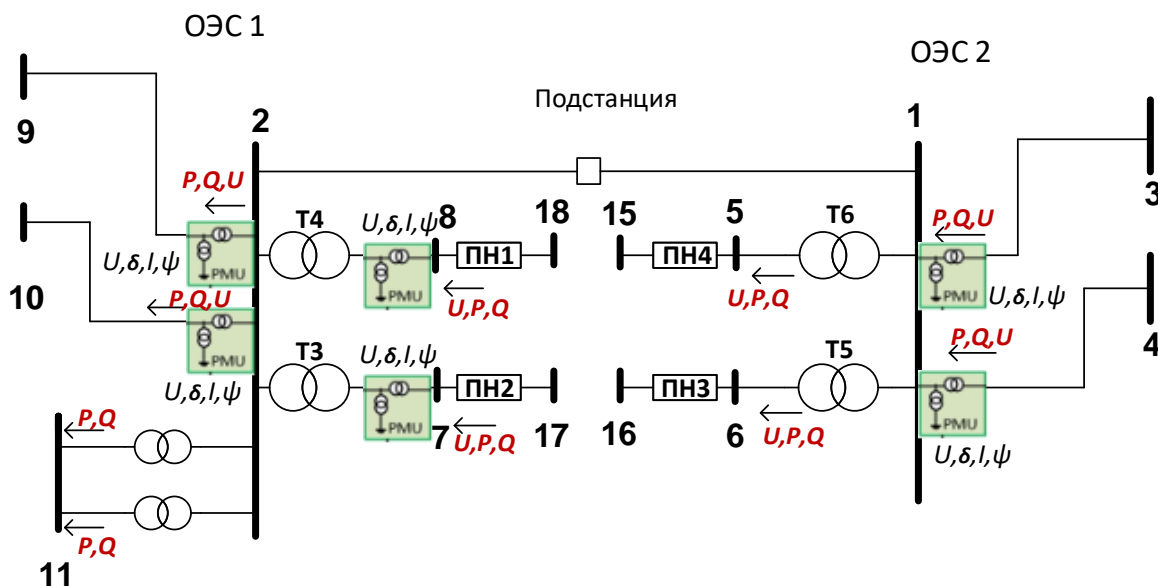


Рис. 3. Расчетная схема подстанции с ВПТН для ОС ЭЭС

Узлы 1 и 2 – это шины 220 кВ подстанции со стороны ОЭС 2 и ОЭС 1 соответственно. Ветви 1-5, 1-6 и 2-7, 2-8 – это понижающие трансформаторы 220/38,5 кВ мощностью 160 МВА. Узлы 15,16 и 17,18 и связи 5-15, 6-16 и 7-17, 8-18 добавлены в схему для моделирования преобразователей напряжений со стороны ОЭС 2 и ОЭС 1 соответственно.

На схеме стрелками показаны ТИ SCADA – перетоки активной и реактивной мощности (P, Q) и указаны изме-

рения напряжения (U). Узлы 1, 2, 7, 8 – это места установки РМУ, каждое из которых измеряет модуль и фазу напряжения в каждой фазе (U, δ) и модуль и фазу тока в каждой фазе (I, ψ) по отходящей от узла ветви 1-3, 1-4, 2-9, 2-10, 7-2, 8-2.

Поскольку мощность в настоящее время передается из ОЭС 2 в ОЭС 1, преобразователи ПН3 и ПН4 выполняют функции выпрямителя, а преобразователи ПН1 и ПН2

функции инвертора. Связи постоянного тока в схему не включены, они моделируются «разрывом» между преобразователями напряжения.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Для анализа эффективности установки PMU на ВПТН была проведена серия расчетов установившегося режима для схемы с использованием метода контрольных уравнений для ОС ЭЭС, реализованного в ПВК «ОЦЕНКА» [7]. Этот метод позволяет проводить проверку достоверности используемых при ОС измерений до расчета их оценок.

Расчеты были выполнены для режима передача активной мощности через ВПТН из ОЭС 2 в ОЭС 1, в этом режиме расчетная схема делится на две подсистемы.

Было выполнено 3 расчета: по ТИ SCADA, по СВИ (см. Рис.4) и при совместном использовании измерений SCADA и СВИ (см.Рис.3). При этом оценивались: наблюдаемость схемы, возможность обнаружения ошибочных измерений, точность полученных оценок. Результаты расчетов приведены в Таблице 1.

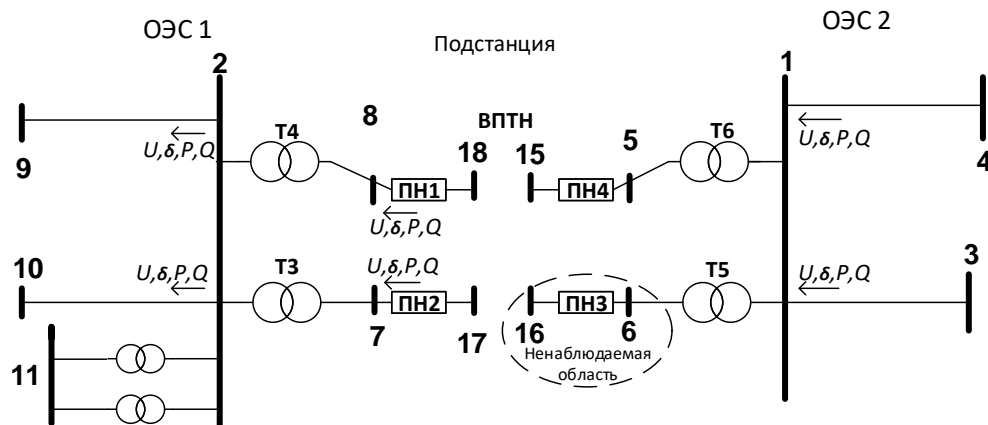


Рис. 4. Неполная наблюдаемость по СВИ

Таблица 1
Результаты расчетов

Состав измерений	ТИ	СВИ	ПИ*	V^{**}	$\hat{\phi}^{***}$	Примечания к расчету
SCADA	46	–	12	2,07	31,2	Схема наблюдаема, все измерения входят в КУ и являются достоверными
СВИ	–	24	12	1,14	11,2	Узел 16 ненаблюдаем. Схема не полностью наблюдаема: 7 СВИ не входят в КУ, они являются критическими, для критических измерений оценки всегда равны измеренным значениям
SCADA+СВИ	26	24	12	2,14	14,4	Для обеспечения наблюдаемости расчетной схемы необходимо добавить СВИ на ПН4 и ПН3. Избыточность измерений возросла

*) ПИ – это псевдоизмерения нулевых инъекций в транзитных узлах 1,2,5,6,7,8.

**) V – избыточность измерений, формула (4)

***) $\hat{\phi}$ – значение целевой функции в точке решения, формула (3).

Как показали расчеты, по достоверным данным SCADA измерений можно проверить измерения PMU, а также организовать взаимную достоверизацию с усреднением СВИ до уровня дискретности SCADA. Особенно это важно на этапе отладки PMU при ведении режима ЭЭС с включенными в неё устройствами FACTS второго поколения, например, ВПТН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Передачи и вставки постоянного тока (ППТ и ВПТ) являются неотъемлемой частью современных ЭЭС и технологий управления ими. ВПТ применяются для согласованной работы электрических сетей переменного и постоянного тока, согласования работы сетей с различной частотой электрического тока, повышения пропускной способности элементов сети, содержащих «слабые» связи.

Установка PMU на ВПТН обеспечивает мониторинг правильности функционирования ВПТН и своевременное извещение оперативного персонала станции и диспетчерского персонала Системного Оператора о возникших изменениях параметров режима.

Применение СВИ для ОС схемы подстанции с ВПТН проверено в расчётах по реальным данным SCADA и СВИ. Показано, что для эффективного мониторинга параметров ВПТН по СВИ необходимо провести расстановку PMU, обеспечивающую полную наблюдаемость схемы, что дает возможность выполнения линейного ОС и получения оценок высокой точности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Phadke A.G. Synchronized phasor measurements and their applications / A.G. Phadke, J.S Thorp. – Springer, 2008. – 248 p. doi: 10.1007/978-0-387-76537-2.

2. Дубинин Д.М. Актуальные задачи развития и применения данных СМТР для задач мониторинга и управления, отечественный и зарубежный опыт // Отчет на заседании Некоммерческого партнерства «Научно-технический совет Единой электрической сети». – Москва, 10.10.2018.

3. Dalali M. PMU placement for HVDC connected network considering united and islanded conditions / M. Dalali, H.K. Kargar // The 9th Power Systems Protection & Control Conference (PSPC20 15). – Iran, 2015. – P.19-24. doi:10.1109/PSPC.2015.7094923.

4. Singh B. Applications of phasor measurement units (PMUs) in electric power system networks incorporated with FACTS controllers / B. Singh, N.K. Sharma, A.N. Tiwari, K.S. Verma, S.N. Singh // International Journal of Engineering, Science and Technology. – 2011. – Vol. 3, № 3.

5. Колосок И.Н. Использование синхронизированных векторных измерений при моделировании устройств FACTS в задаче оценивания состояния ЭЭС / И.Н. Колосок, Е.С. Коркина, А.В. Тихонов // Методические вопросы исследования надежности Больших Систем Энергетики. – Ташкент, 2019. – С. 228-237.

6. Гамм А.З. Развитие алгоритмов оценивания состояния электроэнергетической системы / А.З. Гамм, А.М.

Глазунова, Ю.А. Гришин, И.Н. Колосок, Е.С. Коркина // Электричество. – 2009. – №6. – С. 2-9.

7. Гамм А.З. Обнаружение грубых ошибок телеизмерений в электроэнергетических системах / А.З. Гамм, И.Н. Колосок. – Н-ск: Наука, 2000. – 152 с.

8. Kolosok I. The test equation method for linear state estimation based on PMU data / I. Kolosok, E Korkina., E. Buchinsky // Proc. of the 18th Intern.Power System Computation Conference (PSCC-2014). – Poland: Wroclaw, 2014. doi:10.1109/PSCC.2014.7038473.

9. Acha E. FACTS. Modelling and simulation in power networks / E. Acha, C.R. Fuerte-Esquivel, H. Ambriz-Perez, C. Angeles-Camacho. – England: John Willey&Sons, Ltd, 2004. – 403 p.

10. Колосок И.Н. Алгоритмы моделирования статических тиристорных компенсаторов при оценивании состояния электроэнергетических систем / И.Н. Колосок, А.В. Тихонов // Промышленная энергетика. – 2015. – №10. – С. 30-35.

11. Kolosok I. Modeling of FACTS devices for smart grid state estimation / I. Kolosok, E. Korkina, A. Mahnitko, A. Gavrilovs, A. Tikhonov // RTUCON. – Riga, 2018. doi: 10.1109/RTUCON.2018.8659809.

Placement of PMU at a HVDC-Link in State Estimation of Electric Power System

Kolosok I., Korkina E.

Melentiev Energy Systems Institute,
Irkutsk, Russia
kolosok@isem.irk.ru, korkina@isem.irk.ru

Tikhonov A.

LLC “RUSAL” Engineering and Technological Center
Irkutsk, Russia
tikhonovaleks@mail.ru

Abstract. The paper presents a model of HVDC link based on voltage converters (VDC-HVDC link), which was developed at Melentiev Energy Systems Institute SB RAS for the procedure of state estimation. This model was used to include the VDC-HVDC link in the substation equivalent circuit to calculate the current state of an electric power system (EPS). At present, this substation is equipped with both SCADA telemetry sensors and PMUs. The use of PMU measurements for the state estimation of the considered circuit with the VDC-HVDC link is verified in calcu-

lations using real data from SCADA and PMU measurements. The findings indicate that effective monitoring of the VDC-HVDC link parameters using the measurements of PMUs requires their placement for complete observability of the circuit to perform linear state estimation and obtain highly accurate estimates.

Keywords: HVDC, PMU, FACTS, state estimation.

Оценка коррелированности графиков электрической нагрузки по главным компонентам ортогонального разложения

Надтока И.И.
ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова
Новочеркасск, Российская Федерация
ii_nadtoka@mail.ru

Звозникова И.А.
ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова
Новочеркасск, Российская Федерация
inna-mia@yandex.ru

Аннотация. Изложены способы оценки вклада взаимной коррелированности графиков электрической нагрузки в дисперсию суммарного графика и моделирования суммарного графика с использованием ортогонального разложения метода главных компонент в пространстве, размерность которого равна количеству индивидуальных графиков электрической нагрузки. Предложены расчетные формулы для учета взаимной коррелированности индивидуальных графиков электрической нагрузки с использованием некоррелированных главных компонент. Для моделирования суммарного графика электрической нагрузки предлагается использовать компонентные модели индивидуальных графиков электрической нагрузки, что позволяет упростить оценку суммарного вклада взаимной корреляции индивидуальных графиков электрической нагрузки в дисперсию суммарного графика. Показано с примерами расчетов, что количество учитываемых компонентных моделей индивидуальных графиков нагрузки определяется требуемой точностью моделирования суммарного графика и может быть не более трех.

Ключевые слова: графики электрической нагрузки, дисперсия суммарного графика нагрузки, взаимная корреляция графиков нагрузки, метод главных компонент, компонентная модель графика нагрузки.

ВВЕДЕНИЕ

Экономический рост ведет к увеличению использования электроэнергии, что в свою очередь влечет за собой необходимость развития всей энергосистемы. Которое должно основываться на наиболее точной системе прогнозирования будущей электрической нагрузки.

Электрические нагрузки изменяются в зависимости от различных факторов, таких как время суток, сезона, погоды. Большое количество данных утяжеляет расчет, увеличивает его погрешность, и для получения более точных результатов расчетов больших массивов данных используется метод главных компонент [1-3].

Метод главных компонент - это технология многомерного статистического анализа, используемая для сокращения размерности пространства признаков с минимальной потерей полезной информации, используемый также для описания многомерных объектов, как, например, энергетические системы. Важным преимуществом метода является возможность графического представления его объектов и переменных, обеспечивающего получение наилучшей проекции точек из исходного пространства переменных в новое ортогональное пространство меньшей размерности.

В электроэнергетике метод главных компонент (МГК) применяется при решении следующих задач: моделирование нагрузок узлов электрических сетей при оптимизации систем компенсации реактивной мощности [4-6], классификация и распознавание суточных графиков электрической нагрузки [7-10]; разработка регрессионных многофакторных моделей электропотребления предприятий и энергосистем [11-14]; прогнозирование электропотребления в энергосистемах [7, 14-19], диагностике электрооборудования [9, 20], синхронизация генераторов и сети [21] и других.

МЕТОД ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

В перечисленных выше работах [4-7, 10, 12, 16], использовалось представление индивидуальных графиков электрической нагрузки p_{ji} в матрице наблюдений $P_n(n \times N)$, в виде ее столбцов:

$$P_n(n \times N) = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1j} & \dots & p_{1N} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2j} & \dots & p_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{i1} & p_{i2} & \dots & p_{ij} & \dots & p_{iN} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{n1} & p_{nN} & \dots & p_{nj} & \dots & p_{nN} \end{pmatrix}$$

Ортогональное преобразование в этих работах выполняется в пространстве L_n (n координатных осей разложения) для центрированной по строкам матрицы P_n , которую обозначим \dot{P}_n . Элементы \dot{p}_{ji} центрированной матрицы \dot{P} определяются следующим образом:

$$\dot{p}_{jc} = p_{ji} - p_{cj},$$

где p_{cj} - среднее значение по j -й строке

$$p_{cj} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_{ji}.$$

Корреляционная матрица $K(n \times n)$ определяется по формуле

$$K(n \times n) = K_n = \dot{P}_n \dot{P}_n^T / N,$$

где \dot{P}_n^T - транспонированная матрица центрированной матрицы \dot{P}_n .

Ортогональное преобразование МГК выполняется по формуле [1-7, 22, 23]:

$$\dot{P}_n = U_n \cdot F,$$

где $U_n = U(n \times n)$ - матрица собственных векторов корреляционной матрицы K_n ; $F(n \times N)$ - матрица главных компонент [1-7, 22, 23].

Матрица главных компонент F , определяется с помощью обратного преобразования [1-7, 22, 23]:

$$F = U_n^T \dot{P}_n$$

СУММИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Представляет теоретический и практический интерес использование метода главных компонент в задаче суммирования графиков электрической нагрузки с учетом взаимной коррелированности индивидуальных графиков [22-27]. Формула для суммарного графика электрической нагрузки $P(t)$ через его слагаемые индивидуальные графики $p_j(t)$

$$P(t) = \sum_{j=1}^N p_j(t), \quad j = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

где $p_j(t)$ - j -й индивидуальный ГЭН [6, 10]; N - количество суммируемых индивидуальных графиков.

Если индивидуальные графики электрической нагрузки $p_j(t)$ представлены экспериментальными ступенчатыми или решетчатыми графиками p_{ji} , то формулу (1) можно записать в следующем виде:

$$P(i) = \sum_{j=1}^N p_{ji}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

где p_{ji} - дискретная модель индивидуального графика нагрузки (i - я степень j -го графика).

Дисперсия суммарного графика электрической нагрузки определяется по формуле [25-27]:

$$DP = \sum_{j=1}^N Dp_j + 2 \sum_{i < j} k_{ij}, \quad (3)$$

где Dp_j - дисперсия j -го графика электрической нагрузки; k_{ij} - взаимно корреляционный момент i -го и j -го индивидуальных графиков нагрузки.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ В ПРОСТРАНСТВЕ L_N

Ортогональное преобразование графиков электрической нагрузки в пространстве L_N выполняется при представлении матрицы исходных данных \dot{P}_n в транспонированном виде $\dot{P}_n(N \times n) = \dot{P}_n = \dot{P}_n^T$.

В матрице \dot{P}_n графики нагрузки p_{ji} являются строками. Корреляционная матрица $K(N \times N)$ для матрицы \dot{P}_n имеет вид:

$$K(N \times N) = K_N = \dot{P}_n \dot{P}_n^T / n.$$

Ординаты группового графика P_{Sj} в (2) можно выразить через главные компоненты f_{ij} по формуле [24]:

$$P_{Sj} = \sum_{i=1}^N U_{Sj} f_{ij}, \quad (4)$$

где $U_{Sj} = \sum_{r=1}^N U_{rj}$ - вектор-строка, каждый элемент которой представляет собой сумму элементов j -го столбца матрицы собственных векторов $U_N = U(N \times N)$ в пространстве L_N .

Дисперсия суммарного графика электрической нагрузки (4) может быть определена по дисперсиям главных компонент $Df_i = \lambda_i$ следующим образом [24]:

$$DP_S = \sum_{i=1}^N U_{Si}^2 \lambda_i. \quad (5)$$

Формула (5) может использоваться для вычисления дисперсии суммарного графика электрических нагрузок, что позволяет упростить достаточно трудоемкий процесс суммирования взаимнокорреляционного момента индивидуальных графиков по формуле (3). Исходные N коррелированных в общем случае графиков нагрузки p_{ji} заменяются некоррелированными моделями: $\tilde{p}_{ji} = U_{Sj} f_{ji}$ [24].

Рассмотрим равенство, вытекающее из формул (3) и (5):

$$DP_S = \sum_{i=1}^N U_{Si}^2 \lambda_i = \sum_{i=1}^N Dp_i + 2 \sum_{i < j} k_{ij}. \quad (6)$$

С учетом равенства $\sum_{i=1}^N Dp_i = \sum_{i=1}^N Df_i = \sum_{i=1}^N \lambda_i$ из формулы (8) можно получить выражение для удвоенной суммы взаимно корреляционного момента K_S :

$$K_S = 2 \sum_{i < j} k_{ij} = \sum_{i=1}^N \lambda_i (U_{Si}^2 - 1). \quad (7)$$

Формулы (5), (7) могут использоваться для вычисления характеристик суммарного процесса при учете $m < N$ главных компонент, что позволяет упростить достаточно трудоемкий процесс суммирования взаимнокорреляционных моментов индивидуальных графиков по формуле (4).

Тогда формулы для приближенной компонентной модели суммарного графика электрической нагрузки \tilde{P}_{Sj} и его дисперсии DP_S будут иметь вид:

$$\tilde{P}_{Sj} \approx U_{S1} f_{1j} + U_{S2} f_{2j} + \dots + U_{Sm} f_{mj} = \tilde{p}_{1j} + \tilde{p}_{2j} + \dots + \tilde{p}_{mj} \quad (8);$$

$$DP_{Sm} \approx U_{S1}^2 \lambda_1 + U_{S2}^2 \lambda_2 + \dots + U_{Sm}^2 \lambda_m = D\tilde{p}_1 + D\tilde{p}_i + \dots + D\tilde{p}_m \quad (9).$$

Так при учете первых трех главных компонент ($m = 3 < N$) формула (8) для ординат модели группового графика P_{Sj} будет иметь вид:

$$\tilde{P}_{S3} \approx U_{S1} f_{1j} + U_{S2} f_{2j} + U_{S3} f_{3j} = \tilde{p}_{1j} + \tilde{p}_{2j} + \tilde{p}_{3j} \quad (10)$$

Соответственно, формула для дисперсии (9) тогда принимает вид:

$$DP_{S3} \approx U_{S1}^2 \lambda_1 + U_{S2}^2 \lambda_2 + U_{S3}^2 \lambda_3 = D\tilde{p}_{1i} + D\tilde{p}_{2i} + D\tilde{p}_3.$$

Таким образом, исходные N графиков нагрузки $p_j(t)$ заменяются тремя обобщенными моделями $\tilde{p}_{1j} = U_{S1} f_{1j}$, $\tilde{p}_{2j} = U_{S2} f_{2j}$, $\tilde{p}_{3j} = U_{S3} f_{3j}$ и получается приближенная модель группового графика $\tilde{P}_{Sj} \approx P(j)$.

Таким образом, формула (7) может служить для оценки суммарного вклада взаимной коррелированности индивидуальных графиков в дисперсию суммарного графика. При $m < N$ эту формулу можно использовать для приближенной оценки суммы взаимнокорреляционных моментов K_S в формуле (3).

ПРИМЕР РАСЧЕТА

Пусть заданы 6 ступенчатых графиков электрической нагрузки $p_{1i} - p_{6i}$, представленных в виде матрицы исходных данных P , в которой графики нагрузки являются строками:

$$P(6 \times 8) = \begin{pmatrix} 3 & 7 & 9 & 9 & 5 & 3 & 2 & 1 \\ 2 & 6 & 8 & 10 & 6 & 4 & 2 & 2 \\ 4 & 6 & 10 & 8 & 4 & 2 & 1 & 1 \\ 2 & 4 & 6 & 8 & 8 & 6 & 2 & 1 \\ 4 & 2 & 6 & 10 & 8 & 4 & 6 & 2 \\ 8 & 6 & 4 & 0 & 6 & 8 & 8 & 10 \end{pmatrix}$$

Графики нагрузки показаны на рис. 1. Из рис.1 видно, что график p_{6i} отличается по форме от остальных тем что его максимумы совпадают по времени с минимумами первых пяти графиков, формы которых практически одинаковы.

Числовые характеристики графиков нагрузки (среднее значение $p_{jс}$, дисперсия Dp_j , среднее квадратическое отклонение σ_j) приведены в таблице 1. Среднее значение и дисперсия 6-го графика p_6 сопоставимы с соответствующими характеристиками первых пяти графиков (см. таблицу 1), но по своей форме он является «противоположным» по отношению к графикам $p_1 - p_5$ (см. рис.1).

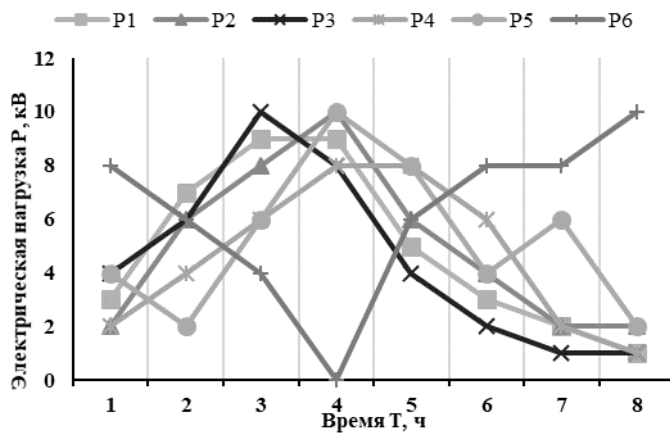


Рис. 1. Графики нагрузки p_1-p_6

Это свойство формы графика p_6 может быть выявлено при отображении образов графиков p_1-p_6 в пространстве главных компонент f_1, f_2 представленном на рис.2. Как видно из рис.2 образ шестого графика удален от области, в которой находятся образы графиков p_1-p_5 . Образы графиков p_1-p_6 в пространстве главных компонент f_1 и f_2 получены в пространстве L_n по матрице $F(8 \times 6)$, то есть для транспонированной матрицы $P(6 \times 8)$.

Таблица 1

Числовые характеристики графиков нагрузки

№ графика	Числовые характеристики графиков		
	Среднее значение P_{jG} кВт	Дисперсия Dp_j кВт ²	Средн. квадрат. отклонение $ср_j$ кВт
1	4,87	8,61	2,93
2	5,00	8,00	2,83
3	4,50	9,50	3,08
4	4,62	6,73	2,59
5	5,25	6,94	2,63
6	6,25	8,44	2,90

Корреляционная матрица K централизованных индивидуальных графиков нагрузки имеет вид:

$$K = \begin{bmatrix} 8.61 & 7.88 & 8.69 & 5.33 & 3.91 & -7.72 \\ 7.88 & 8.00 & 7.50 & 6.13 & 4.75 & -7.75 \\ 8.69 & 7.50 & 9.50 & 4.56 & 3.38 & -7.38 \\ 5.33 & 6.13 & 4.56 & 6.73 & 4.97 & -5.66 \\ 3.91 & 4.75 & 3.38 & 4.97 & 6.94 & -5.81 \\ -7.72 & -7.75 & -7.38 & -5.66 & -5.81 & 8.44 \end{bmatrix}$$

Как это видно в матрице K взаимнокорреляционные моменты 6-го графика нагрузки с остальными пятью графиками являются отрицательными.

Матрица главных компонент $F(8 \times 6)$ для матрицы данных $P(6 \times 8)$ имеет вид:

$$F = \begin{bmatrix} -4,45 & 0,99 & 7,31 & 10,99 & 2,37 & -3,07 & -5,62 & -8,51 \\ -1,10 & -3,94 & -2,94 & 1,91 & 3,43 & 1,42 & 2,12 & -0,89 \\ -1,43 & 1,07 & -0,22 & -1,22 & 1,43 & 2,38 & -1,92 & -0,08 \\ 0,93 & -0,98 & 1,24 & -1,15 & 0,88 & -0,15 & -0,16 & -0,61 \\ 0,49 & 0,25 & -0,32 & 0,03 & -0,15 & 0,28 & 0,05 & -0,64 \\ 0,32 & -0,36 & -0,03 & 0,26 & -0,22 & 0,24 & -0,48 & 0,26 \end{bmatrix}$$

Образы индивидуальных графиков электрической нагрузки $p_{1i} - p_{6i}$ на плоскости главных компонент f_1 и f_2 представлены на рис.2.

Матрица собственных векторов U вычисленная по методу Якоби в MatLab [28]:

$$U = \begin{bmatrix} -0.449 & 0.320 & 0.036 & 0.037 & -0.235 & -0.799 \\ -0.443 & 0.032 & 0.228 & 0.417 & 0.757 & 0.070 \\ -0.441 & 0.507 & -0.174 & -0.598 & 0.066 & 0.396 \\ -0.343 & -0.395 & 0.751 & -0.239 & -0.292 & 0.143 \\ -0.299 & -0.690 & -0.487 & -0.337 & 0.205 & -0.206 \\ 0.449 & 0.089 & 0.339 & -0.545 & 0.491 & -0.371 \end{bmatrix}$$

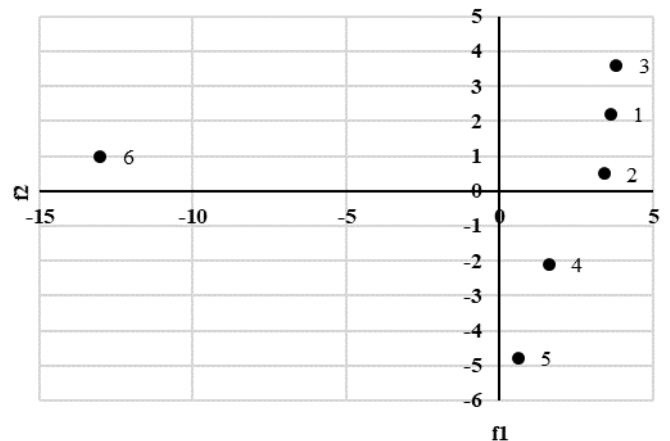


Рис. 2. Образы графиков в пространстве f_1 и f_2

Упорядоченные в порядке убывания величин собственные числа λ_i в именованных единицах: $\lambda_1=39,25$ кВт²; $\lambda_2=6,02$ кВт²; $\lambda_3=2,02$ кВт²; $\lambda_4=0,73$ кВт²; $\lambda_5=0,11$ кВт²; $\lambda_6=0,09$ кВт². В соответствии с данным порядком в матрице U упорядочены собственные векторы.

Собственные числа λ_i^* в относительных единицах: $\lambda_1^*=0,814$; $\lambda_2^*=0,125$; $\lambda_3^*=0,042$; $\lambda_4^*=0,015$; $\lambda_5^*=0,002$; $\lambda_6^*=0,002$. Сумма первых трех собственных чисел равна $\lambda_{33}^* = \lambda_1^* + \lambda_2^* + \lambda_3^* = 0,814 + 0,125 + 0,042 = 0,981$. Следовательно, первые три компонентные модели $\tilde{p}_{1i}, \tilde{p}_{2i}, \tilde{p}_{3i}$ будут учитывать 98% дисперсии суммарного графика электрической нагрузки (10).

График изменения значений собственных чисел в относительных единицах λ_i^* в зависимости от номера представлен на рис. 3

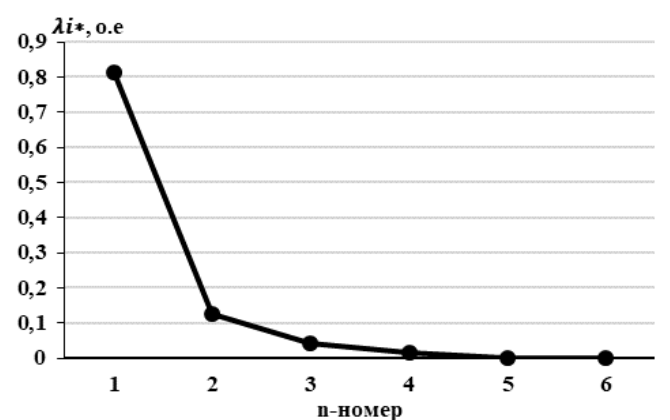


Рис. 3. График изменения собственных чисел λ_i^*

На рис. 4 показаны примеры суммарного графика нагрузки, полученные по первой главной компоненте $P_{m1} = \tilde{p}_{1i}$, первым трем компонентам $P_{m3} = \tilde{p}_{1i} + \tilde{p}_{2i} + \tilde{p}_{3i}$ и фактический суммарный график P_ϕ .

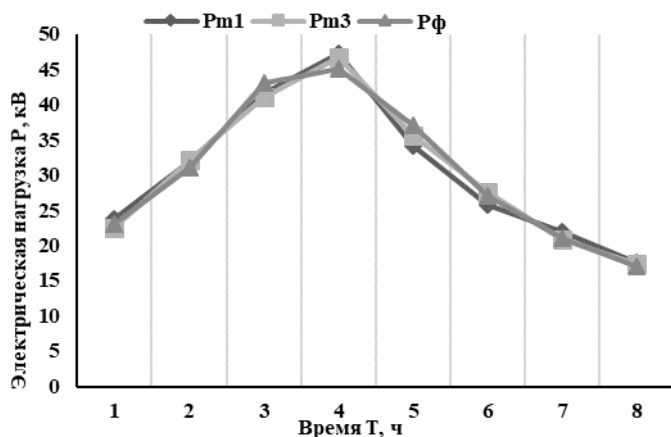


Рис. 4. Модели P_{m1} , P_{m3} и фактический P_{ϕ} суммарные графики

Оценим погрешность моделирования суточного графика электрической нагрузки δ_m , используя для этого применяемую при краткосрочном прогнозировании суточных графиков активной мощности энергосистем среднюю абсолютную погрешность в процентах - MAPE (Mean Absolute Percentage Error), которая определяется по формуле [29]:

$$\delta_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|p_{\phi i} - P_{mi}|}{p_{\phi i}} 100\%,$$

где $p_{\phi i}$ — фактическое значение активной мощности для i -ой ступени; P_{mi} — значение для i -ой ступени модели графика; n — количество ступеней в графике.

Средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE), также известная как среднее абсолютное процентное отклонение, является мерой точности прогнозирования в статистике, а также используется в качестве функции потерь для задач регрессии.

Погрешность моделирования суммарного графика, вычисленная по приведенной выше формуле, составила: для приближенной модели, сформированной из одной модели индивидуального графика $P_{m1} = \tilde{p}_{1i}$ $\delta_{m1} = 4,27\%$, а для приближенной модели, сформированной из моделей трех индивидуальных графиков $P_{m3} = \tilde{p}_{1i} + \tilde{p}_{2i} + \tilde{p}_{3i}$ — $\delta_{m3} = 2,85\%$. Максимальная погрешность моделирования суммарного графика составила для $t = 4$ часа $\delta_{max} = 5,03\%$.

Дисперсия суммарного графика $DP = 93,75$ кВт². Сумма дисперсий индивидуальных графиков (сумма λ_i) $\sum_{i=1}^6 Dp_i = \sum_{i=1}^6 \lambda_i = 48,22$ кВт². Сумма взаимно корреляционных моментов индивидуальных графиков, вычисленных по формуле (7), составила $K_{\Sigma} = 45,53$ кВт².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

Данный подход к моделированию суммарного графика электрической нагрузки может использоваться при моделировании нагрузок в узлах сети, при расчетах потерь электроэнергии в расчетах электрических нагрузок, для создания обобщенных моделей суммарных графиков и других задачах.

Основное преимущество применения МГК при решении указанных задач заключается в следующем: -замена N исходных коррелированных в общем случае индивиду-

альных графиков $p_1(t) - p_N(t)$ меньшим числом $m < N$ ортогональных моделей $\tilde{p}_1(t) - \tilde{p}_m(t)$ (как правило, $m \leq 3$ так как сумма трех первых собственных чисел, выраженная в относительных единицах, для суточных графиков нагрузки составляет, как правило, более 0,95; в данном примере 0,981).

Дисперсии индивидуальных графиков электрической нагрузки при ортогональном разложении метода главных компонент определяются как дисперсии главных компонент, а информация о взаимно-корреляционных моментах суммируемых графиков содержится в координатных векторах, то есть в собственных векторах корреляционной матрицы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Йереског К.Г. Геологический факторный анализ / К.Г. Йереског, Д.И. Клован, Р.А. Реймент. — Л.: Недра, 1980. — 223 с.
2. Дубров А.М. Обработка статистических данных методом главных компонент / А.М. Дубров. — М.: Статистика, 1978. — 135 с.
3. Иберла К. Факторный анализ / К. Иберла. — М.: Статистика, 1980. — 398 с.
4. Арзамасцев Д.А. Снижение технологического расхода энергии в электрических сетях / Д.А. Арзамасцев, А.В. Липес. — М.: Высшая школа, 1989. — 127 с.
5. Арзамасцев Д.А. Применение метода главных компонент для моделирования нагрузок электрических систем в задаче оптимальной компенсации реактивной мощности / Д.А. Арзамасцев, А.В. Липес, А.А. Герасименко // Изв. вузов СССР. Сер. Энергетика. — 1980. — № 12. — С.18-23.
6. Липес А.В. Применение методов математической статистики для решения электроэнергетических задач: учеб. пособие / А.В. Липес. — Свердловск, изд. УПИ им. С.М. Кирова. — 1983. — 88 с.
7. Гурский С.К. Адаптивное прогнозирование временных рядов в электроэнергетике / С.К. Гурский. — Минск: Наука и техника, 1983. — 271 с.
8. Iswan I. Principal component analysis and cluster analysis in profile of electrical system / I. Iswan, I. Garniwa // Conference Series Materials Science and Engineering, March 2017.
9. Alsafasfeh Q. Classification and localization in power systems using fault signatures and principal components analysis / Q. Alsafasfeh, I. Abdel-Qader, A.M. Harb // Energy and Power Engineering. — Vol. 04(06). — P. 506-522.
10. Надтока И.И. Применение методов компонентного анализа для моделирования и классификации графиков электрической нагрузки / И.И. Надтока, А.В. Седов, В.П. Холодков // Изв. вузов. Электромеханика. — 1993. — № 6. — С. 21-29.
11. Jing Z. Principal component analysis of electricity consumption factors in China / Z. Jing, F. Shen, H. Xiao, H. Qi, H. Peng, X.-Y. Yang, Y.-W. Li, S.-H. Deng // Energy Procedia. — 2012. — Vol. 16. — P. 1913-1918.
12. Надтока И.И. Многофакторное моделирование электропотребления промышленного предприятия / И.И. Надтока // Изв. вузов. Электромеханика. — 1998. — № 2-3. — С. 72-74.

13. Lam J.C. Principal component analysis of electricity use in office buildings / J.C. Lam, K.K.W. Wan, K.L. Cheung, L. Yang // *Energy Build.* – 2008. – Vol. 40. – P. 828-836.

14. Burgas L. Principal component analysis for monitoring electrical consumption of academic buildings / L. Burgas, J. Melendez, J. Colomer // *Energy Procedia.* – 2014. – Vol. 62. – P. 555-564.

15. Gordillo-Orquera R. Analyzing and forecasting electrical load consumption in healthcare buildings / R. Gordillo-Orquera, L.M. Lopez-Ramos, S. Muñoz-Romero, P. Iglesias-Casarrubios, D. Arcos-Avilés, A.G. Marques, J. L. Rojo-Álvarez // *Energies.* – 2018. – Vol. 11(3). – P. 493.

16. Надтока И.И. Адаптивные модели прогнозирования нестационарных временных рядов электропотребления / И.И. Надтока, А.В. Седов. – Изв. вузов. Электромеханика. – 1994. – № 1-2. – С. 57-64.

17. Ndiaye D. Principal component analysis of the electricity consumption in residential dwellings / D. Ndiaye, G. Kamiel // *Energy and Buildings.* – 2011. – Vol. 43, is. 2-3. – P. 446-453.

18. Petrana S. Energy consumption model improvement with principal component analysis method for small village community / S. Petrana, E.A. Setiawanand, M. Yunus H.A. // *IOP Conference Series Earth and Environmental Science.* – 2018. – Vol. 105(1). – 012014.

19. Li K. Principal component analysis of price fluctuation in the smart grid electricity market / K. Li, J.D. Cursio, Y. Sun // *Energy Sustainability.* – 2018. – Vol. 10(11). – 4019.

20. Ramahaleomiarantsoa J.F. Principal components analysis method application in electrical machines diagnosis / J.F. Ramahaleomiarantsoa, N. Héraud, E.J.R. Sambatra, J.M. Razafimahenina // 8-th International Conference on Informatics

in Control, Automation and Robotics (ICINCO-2011). – P. 167-175.

21. Anaparthi K.K. Coherency identification in power systems through principal component analysis / K.K. Anaparthi, B. Chaudhuri, N.F. Thornhill, B.C. Pal // *IEEE Transactions on Power Systems.* – 2005. – Vol. 20, is. 3. – P. 1658-1660.

22. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов / К. Фукунага. – М.: Наука, 1979. – 376 с.

23. Ту Дж. Принципы распознавания образов / Дж. Ту, Р. Гонсалес. – М.: Мир, 1978. – 412 с.

24. Надтока И.И. Развитие теории и методов моделирования и прогнозирования электропотребления на основе данных средств автоматизации учета и телеизмерений: дис. ... док. техн. наук. – Новочеркасск, 1998. – 346 с.

25. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учеб. для вузов / Е.С. Вентцель. – М.: Академия, 2003. – 576 с.

26. Гордеев В.И. Взаимная корреляция в расчетах характеристик графиков электрической нагрузки / В.И. Гордеев, И.И. Надтока // *Электричество.* – 1978. – № 8. – С. 17-21.

27. Надтока И.И. Распределение групповых характеристик при случайных наложениях индивидуальных графиков электрической нагрузки / И.И. Надтока // *Изв. вузов. Электромеханика.* – 1980. – № 6. – С. 631-634.

28. Дьяконов В.П. MATLAB и Simulink в электроэнергетике. Справочник / В.П. Дьяконов, А.А. Пеньков. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 816 с.

29. Афанасьев В.Н. Анализ временных рядов и прогнозирование: учеб. для вузов / В.Н. Афанасьев, М.М. Юзбашев. – Москва: Финансы и статистика, 2011. – 228 с.

Estimation of the Correlation of Electric Load Graphs by the Principal Components of the Orthogonal Decomposition

Nadtoka I.I.

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)
Novocherkassk, Russian Federation
ii_nadtoka@mail.ru

Zvoznikova I.A.

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)
Novocherkassk, Russian Federation
inna-mia@yandex.ru

Abstract. Methods for estimating the contribution of the cross-correlation of electric load graphs to the dispersion of the sum graph and modeling the sum graph using the orthogonal decomposition of the principal component analysis in space, the dimension of which is equal to the number of individual electric load graphs, are described. Calculation formulas for taking into account the cross-correlation of individual electric load graphs using uncorrelated principal components are proposed. To model the sum electric load graph, it is proposed to use component models of individual electric load graphs for a simplified assessment of the total contribution of the cross-correlation of individ-

ual graphs to the dispersion of the sum electric load graph. It is shown with examples of calculations that the number of considered component models of individual load graphs is determined by the required accuracy of modeling the sum graph and can be no more than three.

Keywords: electrical load graphs, dispersion of the sum load graph, cross-correlation of load graphs, principal component analysis, component model of the load graph.

Солнечный кондиционер и его эффективность среди существующих решений в сфере кондиционирования

Янучок А.И., Добрыднев Д.В., Папин В.В.

Южно-Российский государственный политехнический университет
(Новочеркасский политехнический институт) имени М.И. Платова
Новочеркасск, Российская Федерация

alexandr-yanuchok@yandex.ru, d.v.dobrydnev@gmail.com, vladimir_papin@bk.ru

Аннотация. В данной работе рассмотрены существующие установки для кондиционирования помещений. Проанализированы их преимущества и недостатки. В настоящее время широкое распространение получили компрессорные кондиционеры работающие от электрической энергии. Авторами публикации предлагается использовать новый подход к кондиционированию помещений, а именно использование абсорбционной установки для кондиционирования за счет использования энергии солнечного излучения. Проведен технико-экономический расчет.

Ключевые слова: кондиционеры, компрессорные кондиционеры, абсорбционные холодильные машины, кондиционеры использующие солнечную или тепловую энергию.

ВВЕДЕНИЕ

Тема кондиционирования помещений актуальна во всем мире, что подтверждает ежегодно растущее количество публикаций по данной тематике. Например, в публикации [1] рассматриваются назначение, классификация и технические характеристики аэродромных кондиционеров и кондиционеров летного состава. В статье [2] рассмотрен механизм фильтрации зараженной атмосферной пыли на аэродромных кондиционерах модульного типа и теоретические основы процесса фильтрации зараженного воздуха комбинированными фильтровальными структурами. В работе [3] рассмотрены факторы, влияющие на производительность системы кондиционирования, организация его правильного подбора и основные расчетные формулы для систем кондиционирования воздуха.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ

Самым распространенным кондиционером для бытового использования является настенный кондиционер (сплит-система). Внутренний блок размещают внутри помещения, а внешний вне его. Они обладают рядом преимуществ. За счет размещения внешнего блока вне помещения, они обладают значительной шумоизоляцией. Также, стоит отметить, что у таких кондиционеров одни из самых низких цен и самый большой выбор. Мощность таких кондиционеров, обычно не превышает 3 кВт.

Существуют канальные кондиционеры. Их внутренний блок монтируется под подвесной потолок. Такие кондиционеры широко распространены в офисах или коттеджах. Их система распределения холодного воздуха

позволяет охлаждать одновременно несколько помещений, однако установка разной температуры для разных помещений требует дополнительного оборудования. Помимо охлаждения воздуха, такие кондиционеры служат системой вентиляции. Мощность таких кондиционеров обычно, составляет до 25 кВт.

Ближайшим конкурентом канальных кондиционеров, являются кассетные кондиционеры. Кассетные кондиционеры также монтируются в подвесные потолки и для их функционирования требуется система распределения холодного воздуха. В отличие от канальных кондиционеров, кассетный кондиционер может распространять воздух в нижней части блока в разных направлениях, что делает его эффективным в больших помещениях, например, в концертных и актовом залах. Преимущественно мощность таких кондиционеров до 25 кВт.

Существуют напольно-потолочные кондиционеры, их можно заметить на входах-выходах в ТЦ, в институтах и других зданиях. Поскольку часто такие кондиционеры имеют и функции обогрева, это помогает эффективно поддерживать необходимую температуру в помещении в разное время года. Для таких кондиционеров не требуется монтаж подвесных потолков, что выгодно отличает их от кассетных и канальных кондиционеров. Монтаж напольно-потолочных кондиционеров следует из названия, их можно монтировать как внизу стены (на пол), так и под потолок. Монтаж на стену преимущественен для не очень больших помещений, где постоянно находится много людей или техники. Монтаж же под потолок обеспечит равномерное распределение охлажденного воздуха по помещению. Мощность таких кондиционеров не превышает обычно 15 кВт.

Существуют, также, колонные кондиционеры, по габаритам они схожи с обычными холодильниками. В основном их используют в нежилых помещениях для охлаждения оборудования, монтируются на пол и обладают большой массой и холодопроизводительностью. Их холодильная мощность не превышает 20 кВт.

У рассмотренных нами выше кондиционеров есть отличительная особенность, они все состоят из двух блоков – внутреннего и внешнего. Однако, существуют ещё и моноблочные системы, все оборудование в них состоит в одном корпусе.

Мобильный кондиционер состоит из одного корпуса, в

котором расположены: испаритель, компрессор и конденсатор. Для его работы необходимо подключить к электрической сети и вывести через окно шланг для отвода горячего воздуха. К существенному достоинству относится максимально простой монтаж, однако, значительная стоимость и высокий уровень шума, не позволили такому кондиционеру обрести популярность. Однако, некоторые потребители его используют в качестве временного решения в сезон установок кондиционеров. Мощность таких кондиционеров не превышает 3 кВт

Оконный кондиционер, отличается от мобильного кондиционера методом монтажа. Оконный кондиционер монтируют непосредственно в окно, таким образом внешняя часть моноблока оказывается на улице. Одним из существенных недостатков является плохая теплоизоляция между внешней средой и внутренним помещением, также сам моноблок может охлаждаться, что может охлаждать помещение в зимнее время года. Мощность таких кондиционеров, обычно составляет до 3 кВт.

Существуют крышные кондиционеры (руф-топ), их достоинства заключаются в моноблочном корпусе, как и у оконных кондиционеров, но, также, они могут осуществлять всестороннюю обработку воздуха – его увлажнения, нагрева, фильтрации, охлаждения и осушения. К существенному недостатку относят то, что они могут обслуживать воздух на верхних этажах. Мощность таких установок составляет 8-140 кВт.

Кондиционер работающий от фотопреобразовательных солнечных панелей. Такие кондиционеры мало распространены в России, однако, в мире имеют своих потребителей, например, Индийская компания Kenbrook solar занимается выпуском таких кондиционеров. Их главное отличие заключается в источнике питания, они используют бесплатную энергию Солнца для выработки электричества. Одним из недостатков таких систем является необходимость вспомогательного оборудования для работы кондиционера.

Гибридный кондиционер. Такое решение предлагает азиатский рынок, в частности Китай. Они работают по принципу настенных компрессорных кондиционеров, но на внешнем блоке установлен солнечный коллектор для поглощения теплоты. По заявлению производителя такой подход позволяет экономить 30%-50% электроэнергии которая приходится на привод компрессора.

Существуют абсорбционные холодильные машины. Как следует из названия, их принцип работы основан на абсорбции, то есть на поглощении хладагента абсорбентом, для их работы не требуется электрическая энергия, а только подводимая тепловая. Самыми распространенными являются абсорбционные бромисто-литиевые холодильные машины и абсорбционные водоаммиачные холодильные машины, они обеспечивают схожие результаты работы и отличаются рабочими веществами, которые выбираются исходя из необходимых технических параметров. Такие холодильные машины обладают рядом преимуществ перед аналогичными компрессорными установками, такими как: не значительные эксплуатационные

затраты, значительный срок службы, бесшумность, экологически безопасны. Такие установки на данный момент распространены в промышленном секторе. Поскольку в промышленности существует достаточно низкопотенциальной теплоты (>100 °C), например горячая вода, уходящие газы, технологические процессы, которая подлежит сбросу или уходит в атмосферу. Эту теплоту используют для кондиционирования помещения, повышая эффективность производства и снижая эксплуатационные затраты. Например, для работы чиллера мощностью 1 мВт необходимо 350 кВт электрической энергии, а для работы абсорбционной холодильной машины требуется при обеспечении аналогичной мощности порядка 16 кВт тепловой энергии.

Исходя из обзора существующих кондиционеров, выявлено, что на данный момент абсолютное большинство кондиционеров работают за счёт электрической энергии, это создает дополнительные затраты, поэтому для удаленных потребителей, где отсутствует подключение к электросетям или где необходимо сократить эксплуатационные затраты на кондиционирование, возникает задача разработки новых типов кондиционеров, которые могли бы работать только от возобновляемых источников энергии. Для решения этой задачи авторы предлагают установку «Солнечный кондиционер».

РАЗРАБАТЫВАЕМОЕ РЕШЕНИЕ

Авторами статьи предлагается решение поставленной проблемы описанное в патенте [4], а именно установка «Солнечный кондиционер». Это устройство которое работает по принципу абсорбционного теплового насоса от тепловой энергии получаемой от Солнца и дополнительно обеспечивает потребителя горячей водой.

Солнечный кондиционер работает следующим образом. Испаритель холодильной абсорбционной машины подключается к системе кондиционирования дома, например, к фанкойлу. Циркуляцию между фанкойлом и испарителем осуществляет циркуляционный насос. Хладагент (например, аммиак) с обратной стороны фанкойла проходя через испаритель, испаряется- забирая теплоту из системы кондиционирования дома. Таким образом осуществляется кондиционирование помещения. А испаренный хладагент перемещается в абсорбер и поглощается абсорбентом (например, вода) и перекачивается циркуляционным насосом в зону высокого давления, в генератор пара куда, также, с помощью насоса подается высокотемпературный теплоноситель нагреваемый солнечным коллектором. В зоне высокого давления за счет работы солнечного коллектора, высокопотенциальным теплом происходит испарение хладагента после чего испаренный хладагент поступает в конденсатор, где конденсируется за счет отвода теплоты в бойлер горячего водоснабжения. Так происходит подготовка воды для горячего водоснабжения. Избыточная теплота дополнительно утилизируется через трехходовой клапан с помощью наружного теплообменника в окружающую среду. Принципиальная схема представлена на рис. 1.

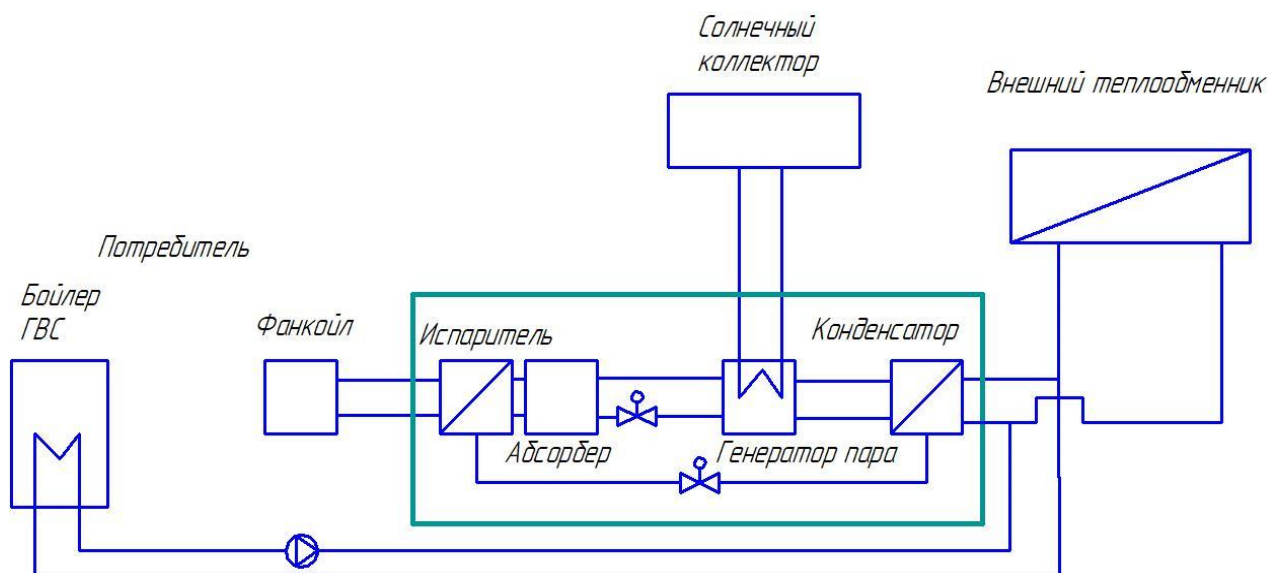


Рис. 1. Принципиальная схема солнечного кондиционера

Предлагаемая установка обладает рядом преимуществ. Она осуществляет кондиционирование помещений за счет солнечной энергии, что позволяет потребителю снизить расходы на эксплуатацию по сравнению с распространенными сплит-системами. Позволяет нагревать потребителю воду для бытовых нужд, что также влияет на эксплуатационные расходы. В разрабатываемой установке солнечная энергия практически без энергетических преобразований обеспечивает кондиционирование и подогрев воды, что обуславливает её эффективность работы.

Для технико-экономического сравнения существующего кондиционера работающего за счет фотоэлектрических солнечных панелей и разрабатываемой установки работающей за счет солнечного коллектора проведем технические и экономические расчеты.

РАСЧЕТ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ КОНДИЦИОНЕРА, РАБОТАЮЩЕГО ЗА СЧЕТ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ

На рис. 2 представлена принципиальная схема кондиционера работающего за счет фотоэлектрических солнечных панелей.

Исходные данные: Размер фотоэлектрической солнечной панели (Д)156 см x(Ш)55 см, КПД фотопреобразовательной солнечной панели $\eta = 17\%$, мощность единичной фотопреобразовательной солнечной панели $N = 50$ Вт, Мощность сплит- системы (мощность испарителя) $Q_{испар} = 3$ кВт, EER= 3, КПД аккумуляторной батареи $\eta_{АКБ} = 95\%$, КПД компрессора $\eta_{компр} = 90\%$, КПД инвертора $\eta_{инв} = 90\%$.

EER – коэффициент энергетической эффективности, показывающий отношение холодопроизводительности кондиционера к полной потребляемой мощности.

Определяем количество потребляемой электрической мощности необходимой для работы компрессора. Для этого составим систему уравнений, где Q_k – мощность конденсатора, $N_{потр}$ – количество потребляемой электрической мощности необходимой для работы компрессора:

$$\begin{cases} N_{потр} = Q_k / EER \\ Q_k = Q_{испар} + N_{потр} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} N_{потр} = Q_k / 3 \\ Q_k = 3 + N_{потр} \end{cases} \quad (2)$$

Исходя из решения системы уравнений находим:

$$\begin{aligned} N_{потр} &= 1500 \text{ Вт} = 1,5 \text{ кВт.} \\ Q_k &= 4,5 \text{ кВт.} \end{aligned} \quad (3)$$

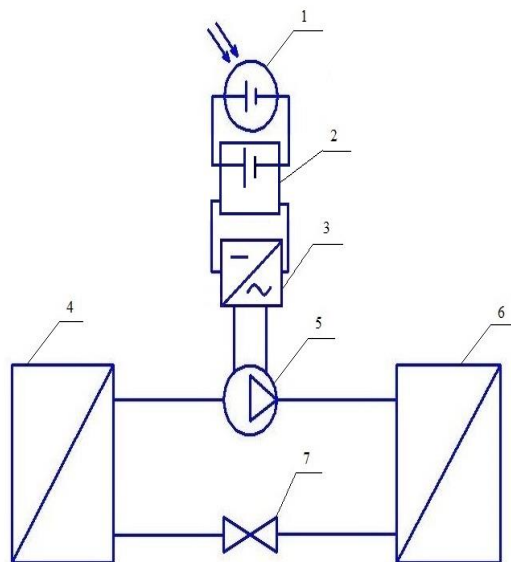


Рис. 2. Схема кондиционера работающего за счет солнечной энергии, 1 – фотоэлектрическая солнечная панель, 2 – АКБ, 3 – инвертор, 4 – испаритель, 5 – компрессор, 6 – конденсатор, 7 – дроссельный вентиль

Потери в инверторе $P_{инв}$ составляют 10%, так как КПД инвертора $\eta_{инв} = 90\%$, их необходимо учесть для обеспечения оптимальной мощности компрессора, для этого рассчитываем 10% от мощности компрессора:

$$P_{инв} = N_{компр} \cdot 0,1 = 1500 \cdot 0,1 = 150 \text{ Вт.} \quad (4)$$

Потери в аккумуляторе $P_{АКБ}$ составляют 5%, так как КПД аккумуляторной батареи $\eta_{АКБ} = 95\%$, их необходимо учесть для обеспечения оптимальной мощности компрес-

сора, для этого рассчитываем 5% от мощности компрессора:

$$P_{AKB} = N_{номр} \cdot 0,05 = 1500 \cdot 0,05 = 75 \text{ Вт.} \quad (5)$$

Потери компрессора $P_{компр}$ составляют 10%, так как КПД компрессора $\eta_{компр} = 90\%$, поскольку часть работы компрессора выделяется в виде тепла, для этого рассчитываем 10% от мощности компрессора:

$$P_{компр} = N_{номр} \cdot 0,1 = 1500 \cdot 0,1 = 150 \text{ Вт.} \quad (6)$$

Определяем полную мощность электрической энергии необходимой для работы кондиционера с учетом потерь в аккумуляторной батарее и в компрессоре и в инверторе:

$$N_{полн} = N_{номр} + P_{инв} + P_{AKB} + P_{компр} = 1500 + 150 + 75 + 150 = 1875 \text{ Вт} = 1,9 \text{ кВт.} \quad (7)$$

Определяем количество фотоэлектрических солнечных панелей необходимых для обеспечения работы кондиционера:

$$n = N_{полн} / N = 1875 / 50 = 37,5 \text{ шт} = 38 \text{ шт.} \quad (8)$$

Определяем площадь одной фотоэлектрической солнечной панели $S_{сп}$, для этого переведем размеры из сантиметров в метры (Д) 156 см = 1,56 м, (Ш) 55 см = 0,55 м

$$S_{сп} = Д \cdot Ш = 1,56 \cdot 0,55 = 0,858 \text{ м}^2. \quad (9)$$

Определяем площадь фотоэлектрических солнечных панелей для работы кондиционера S :

$$S = S_{сп} \cdot n = 0,858 \cdot 38 = 32,6 \text{ м}^2. \quad (10)$$

ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ, РАБОТАЮЩЕЙ ЗА СЧЕТ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ

Зная электрическую мощность 1,9 кВт, необходимо учесть, что аккумуляторы должны обеспечивать мощность в течении 4 часов. Для этого определим ёмкость аккумуляторов для 4 часов работы:

$$C_1 = N_{полн} \cdot 4 = 1,9 \cdot 4 = 7,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч.} \quad (11)$$

При проектировании гелиосистем принято учитывать дополнительно 35% ёмкости аккумуляторов, это необходимо для того, чтобы при эксплуатации не произошел глубокий разряд аккумуляторов. Для этого определим ёмкость аккумуляторов с учетом 35% для работы в течении 4 часов:

$$C_2 = C_1 \cdot 1,35 = 7,6 \cdot 1,35 = 10,26 \text{ кВт} \cdot \text{ч.} \quad (12)$$

С учетом напряжения на аккумуляторах $U = 12 \text{ В}$ переводим ёмкость в А · ч разделив ёмкость аккумуляторной батареи на её напряжение, напряжение мы выбрали $U = 12 \text{ В}$:

$$I = C_2 / U = 10260 / 12 = 855 \text{ А} \cdot \text{ч.} \quad (13)$$

Для обеспечения рассчитанной ёмкости аккумуляторов необходимы гелевые аккумуляторы с номинальным напряжением 12 В, нам потребуется $N_{200} = 4$ шт, аккумуляторов ёмкостью 200 А · ч и $N_{55} = 1$ шт, ёмкостью 55 А · ч. Один аккумулятор ёмкостью 100 А · ч стоит 36 т.р., а один аккумулятор ёмкостью 55 А · ч стоит 11 т.р. Стоимость аккумуляторов составит:

$$C_{AKB} = N_{200} \cdot 36 + N_{55} \cdot 11 = 145 \text{ т.р.} \quad (14)$$

Инвертор выбираем по номинальной мощности и по напряжению на выходе. Нам необходима номинальная мощность 1,5 кВт и выходное напряжение 220 В. Стоимость инвертора:

$$C_{инв} = 25 \text{ т.р.}$$

Стоимость солнечных панелей состоит из расчетных характеристик фото преобразовательной солнечной панели. В нашем случае мы рассчитывали систему для солнеч-

ной панели SilaSolar 50Вт. Стоимость такой панели составляет 3 т.р. По результатам расчета нам необходимо 38 шт солнечных панелей, их стоимость составит:

$$C_{СП} = n \cdot 3 = 38 \cdot 3 = 114 \text{ т.р.} \quad (15)$$

Кондиционер выбираем по холодильной мощности 3 кВт и потребляемой электрической мощности 1,5 кВт. Стоимость такого кондиционера составит:

$$C_{конд} = 30 \text{ т.р.}$$

Стоимость монтажа системы кондиционирования работающей за счет преобразовательных солнечных панелей составит:

$$C_{монт} = 50 \text{ т.р.}$$

Общая цена системы кондиционирования работающего за счёт фотоэлектрических солнечных панелей составит:

$$C_{общ} = C_{AKB} + C_{инв} + C_{СП} + C_{конд} + C_{монт} = 145 + 25 + 114 + 30 + 50 = 364 \text{ т.р.} \quad (16)$$

РАСЧЕТ КОНДИЦИОНЕРА РАБОТАЮЩЕГО ПО АБСОРБЦИОННОМУ ЦИКЛУ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА

Исходные данные: Мощность сплит-системы (мощность испарителя): $Q_{и} = 3 \text{ кВт}$, EER – коэффициент энергетической эффективности, показывающий отношение холодопроизводительности кондиционера к полной потребляемой мощности: EER=2, размеры солнечного коллектора (24 вакуумных трубок) (ДхШ): 2,2 м х 2,06 м, площадь солнечного коллектора (24 вакуумных трубок): $S_{24} = 3,03 \text{ м}^2$, размеры солнечного коллектора (12 вакуумных трубок) (ДхШ): 2,2 м х 1,05 м, площадь солнечного коллектора (12 вакуумных трубок): $S_{12} = 1,51 \text{ м}^2$, КПД солнечного коллектора: $\eta_{ск} = 80\%$, мощность солнечного потока на землю под перпендикулярным углом к поверхности на 1 м^2 : $N_{СП} = 1000 \text{ Вт}$

Составим систему уравнений, в первом уравнении выразим мощность конденсатора $Q_{к}$, для этого мощность генератора умножаем на EER, где $Q_{г}$ – теплота подведенная в генераторе пара:

$$Q_{к} = Q_{г} \cdot EER. \quad (17)$$

Для второго уравнения системы, составим уравнение теплового баланса для кондиционера работающего по абсорбционному циклу:

$$Q_{к} = Q_{г} + Q_{и}. \quad (18)$$

Объединим уравнения в систему и решим ее, в результате математических преобразований определим тепловую мощность конденсатора $Q_{к}$, и теплоту подведенную в генераторе пара $Q_{г}$:

$$\begin{cases} Q_{к} = Q_{г} \cdot EER \\ Q_{к} = Q_{г} + Q_{и} \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} Q_{к} = Q_{г} \cdot 2 \\ Q_{к} = Q_{г} + 3 \end{cases} \quad (20)$$

Исходя из решения системы уравнений получаем:

$$Q_{к} = 6 \text{ кВт}, Q_{г} = 3 \text{ кВт.}$$

КПД солнечного коллектора составляет $\eta_{ск} = 80\%$, таким образом мощность солнечного коллектора с 1 м^2 будет составлять:

$$N_{СК} = N_{СП} \cdot 0,8 = 1000 \cdot 0,8 = 800 \text{ Вт.} \quad (21)$$

Потери солнечного коллектора составят:

$$P_{потр} = N_{СП} - N_{СК} = 1000 - 800 = 200 \text{ Вт.} \quad (22)$$

Определяем площадь солнечных коллекторов необходимую для обеспечения мощности кондиционера:

$$S = Q_f / N_{CK} = 3000 / 800 = 3,75 \text{ м}^2. \quad (23)$$

Выбираем 2 солнечных коллектора на 12 и 24 трубок для обеспечения необходимой площади солнечных коллекторов и рассчитываем общую площадь солнечных коллекторов:

$$S_{\text{ОБЩ}} = S_{12} + S_{24} = 3,03 + 1,51 = 4,54 \text{ м}^2. \quad (24)$$

ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КОНДИЦИОНЕРА РАБОТАЮЩЕГО ПО АБСОРБЦИОННОМУ ЦИКЛУ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА

Цена абсорбционного теплового насоса составит:

$$C_{\text{АТН}} = 30 \text{ т.р.}$$

Цена солнечных коллекторов составит:

$$C_{\text{СК}} = 20 \text{ т.р.}$$

Общая цена системы кондиционирования работающая по абсорбционному циклу за счет солнечных коллекторов составит:

$$C_{\text{ОБЩ}} = C_{\text{АТН}} + C_{\text{СК}} = 30 + 20 = 50 \text{ т.р.} \quad (25)$$

На рис. 3 представлено сравнение полезных площадей солнечных элементов, как у системы кондиционирования с фотоэлектрическими солнечными панелями, так и у абсорбционного кондиционера использующий солнечный коллектор.

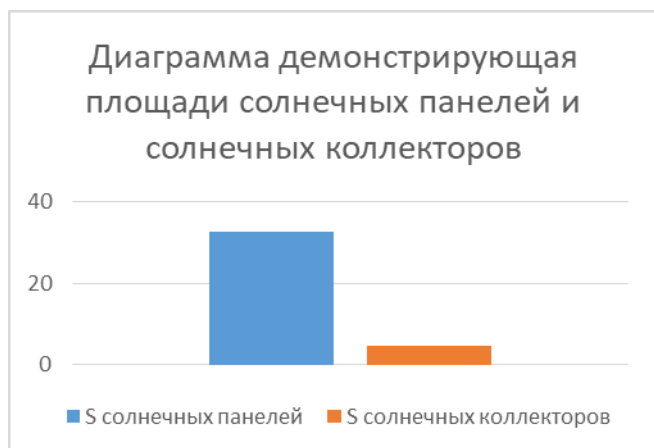


Рис. 3. Полезные площади солнечных элементов



Рис. 4. Стоимость установок для кондиционирования

На рисунке 4 представлено сравнение капитальных затрат системы кондиционирования с фотоэлектрическими

солнечными панелями и у абсорбционного кондиционера использующего солнечный коллектор.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

В результате анализа существующих решений в сфере кондиционирования выявлено, что подавляющее число кондиционеров, предназначенных для бытового использования работают от электрической энергии используют парокompрессионный цикл, это имеет свои недостатки. Вне зависимости от типа кондиционера практически все потребляют электрическую энергию из сети. Существующие абсорбционные холодильные машины рассчитаны только на промышленные мощности, для бытового применения они не подходят. Существующие кондиционеры использующие фотоэлектрические солнечные панели дороги из-за вспомогательного оборудования и не эффективны. Поэтому, предлагается новый тип абсорбционного кондиционера, предназначенный для бытового использования, использующий в качестве источника тепла бесплатную солнечную энергию, путем адаптации солнечного коллектора к параметрам абсорбционного теплового насоса.

В результате расчета было выявлено, что использование фотоэлектрических солнечных панелей для кондиционирования помещений экономически нецелесообразно, при тепловой (холодильной) мощности 3 кВт стоимость кондиционера работающего за счет фотоэлектрических солнечных панелей составит 364 тыс. рублей и занимая площадь солнечных элементов составит 32,6 кв. м. Срок окупаемости по сравнению с распространенными сплит-системами составит более 20 лет. Стоимость кондиционера работающего по абсорбционному циклу за счет использования солнечных коллекторов тепловой (холодильной) мощностью 3 кВт будет составлять 50 тыс. рублей, занимаемая площадь солнечных элементов равна 4,5 кв. м., срок окупаемости по сравнению с распространенными сплит-системами составляет около трех лет.

Таким образом, разрабатываемая установка позволит эффективно использовать солнечную энергию для автономного кондиционирования помещений и подготовки горячей воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дзюбенко О.Л. Назначение, классификация и технические характеристики аэродромных кондиционеров и кондиционеров летного состава / О.Л. Дзюбенко, М.А. Кокарев, Е.В. Чмутин, Н.С. Бутерус // Современная техника и технологии. – 2015. – № 11 (51). – С. 14-16.
2. Скрипкин В.В. Специальный кондиционер модульного типа для эксплуатации в условиях повышенной запыленности / В.В. Скрипкин, Е.Ю. Бруцкий // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2019. – № 1 (44). – С. 401-405.
3. Коротков А.А. Определение мощности системы кондиционирования воздуха / А.А. Коротков, И.П. Криволапов, С.Ю. Щербаков // Наука и Образование. – 2020. – Т. 3, № 3. – С. 151.
4. Папин В.В., Безуглов Р.В., Янучок А.И. Солнечный кондиционер // Патент России № 2738195, 09.12.2020 г.

Solar Air Conditioner and its Efficiency Among Existing Air Conditioning Solutions

Yanuchok A.I., Dobrydnev D.V., Papin V.V.

South-Russian State Polytechnic University (Novocherkassk Polytechnic Institute) named after M.I. Platova
Novocherkassk, Russian Federation

Abstract. This paper deals with existing installations for air conditioning. Their advantages and disadvantages are analyzed. Nowadays, compressor air conditioners powered by electric energy are widely used. The authors of the publication propose to use a new approach to air conditioning of premises, namely the use of an absorption unit for air conditioning by using the energy

of solar radiation. A technical and economic calculation was carried out.

Keywords: air conditioners, compressor air conditioners, absorption chillers, solar or thermal air conditioners..

Теплогенератор повышенной эффективности и его экономическая целесообразность

Папин В.В., Дьяконов Е.М., Шмаков А.С.

Южно-Российский государственный политехнический университет
(Новочеркасский политехнический институт) имени М.И. Платова
Новочеркасск, Россия

vladimir_papin@bk.ru, emdyakonov@yandex.ru, tolikshmakov.1998@rambler.ru

Аннотация. В статье предложен новый теплогенератор повышенной эффективности. Проведено технико-экономическое сравнение с существующими теплогенерирующими установками.

Ключевые слова: теплогенератор, теплоснабжение, парокompрессионный тепловой насос, абсорбционный тепловой насос, возобновляемые источники энергии.

ВВЕДЕНИЕ

Теплоснабжение является крупной отраслью [1], на которую, по данным Министерства энергетики России, в год расходуется 400-440 миллионов тонн условного топлива. Потребление топлива теплоснабжением равняется всему топливному экспорту страны. В условиях ограниченных топливных ресурсов рациональное и экономное использование их представляет собой задачу большой государственной важности.

На данный момент в России существует огромный рынок систем отопления [2,3], представленный разнообразными теплогенерирующими установками, такими как: газовые котельные агрегаты, твердотопливные котельные агрегаты, жидкотопливные котельные агрегаты, электрические котельные агрегаты, тепловые насосы, работающие от электричества, тепловые насосы, работающие на газе топливе. Широкий выбор таких установок дает возможность отапливать и снабжать горячей водой любые виды помещений безопасно и комфортно, но не все способны экономить невозобновляемое органическое топливо. Все большую популярность набирает отопление тепловыми насосами [4,5]: в них часть тепловой энергии берется из окружающей среды, что позволяет уменьшать расход органического топлива. Большинство потребителей не могут отказаться от традиционных теплогенераторов и перейти на новое эффективное оборудование из-за высокой стоимости и низкого коэффициента преобразования, и это чаще всего приводит к тому, что оборудование не окупается или окупается в течении всего срока эксплуатации [6,7]. Для решения проблемы экономии топлива мы разработали схему, представленную на рис. 1, данная схема позволяет получать тепловую энергию, значительная часть которой будет браться из окружающей среды, также данная установка может вырабатывать холод для нужд кондиционирования.

ПРИНЦИП РАБОТЫ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Принцип работы теплогенератора заключается в следующем: тепловой двигатель в результате сжигания топлива вырабатывает тепловую и механическую энергию, механическая энергия будет передана парокompрессионному тепловому насосу, а тепловая абсорбционному тепловому насосу. Трансформаторы теплоты будут работать от одного теплового двигателя, при этом с учетом коэффициентов преобразования значительная часть тепловой энергии будет браться из окружающей среды. Вся получившаяся тепловая энергия будет передана потребителю для отопления и горячего водоснабжения [8].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ ТЕПЛОТЫ ЗА ОТОПИТЕЛЬНЫЙ ПЕРИОД РАССМАТРИВАЕМОГО ЗДАНИЯ

Здание, которое будет использовано для расчета имеет площадь 650 м², при средней теплоизоляции дома необходимо устанавливать устройство с тепловой мощностью 65кВт, так как одно и тоже устройство будет отапливать помещение и отпускать теплоноситель для горячего водоснабжения, то примем его мощность равной 70 кВт.

Расчет эксплуатационных затрат отопительного оборудования необходимо начать с определения потерь теплоты за отопительный период рассматриваемого здания, в котором температуры и продолжительность отопительного периода приняты по [9] СНиП 23-01-99.

Коэффициент неравномерности распределения отопительной нагрузки в течение отопительного периода будет равен:

$$K = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{о.п.}}}{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}} = \frac{24 - (0)}{24 - (-22)} = 0,522 \quad (1)$$

Количество теплоты необходимое на отопление здания в течение отопительного периода будет равно:

$$E_{\text{от}} = 24 \cdot 3 \cdot 600 \cdot Q_{\text{от}} \cdot z_{\text{о.п.}} \cdot K = 24 \cdot 3 \cdot 600 \cdot 65 \cdot 171 \cdot 0,522 = 501295392 \text{ кДж} \quad (2)$$

Количество теплоты необходимое на горячее водоснабжение будет равно:

$$E_{\text{гвс}} = V_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}} \cdot n \cdot z_{\text{год}} \cdot (t_{\text{гвс}} - t_{\text{х.в.}}) = 0,105 \cdot 983,3 \cdot 4,19 \cdot 8365 \cdot (55 - 10) = 56844013 \text{ кДж} \quad (3)$$

Суммарная потребность здания в теплоте на горячее водоснабжение и отопление в течение отопительного периода составит:

$$E_{\text{от.гвс}} = E_{\text{от}} + E_{\text{гвс}} = 501295392 \text{ кДж} + 56844013 \text{ кДж} = 558139405 \text{ кДж} \quad (4)$$

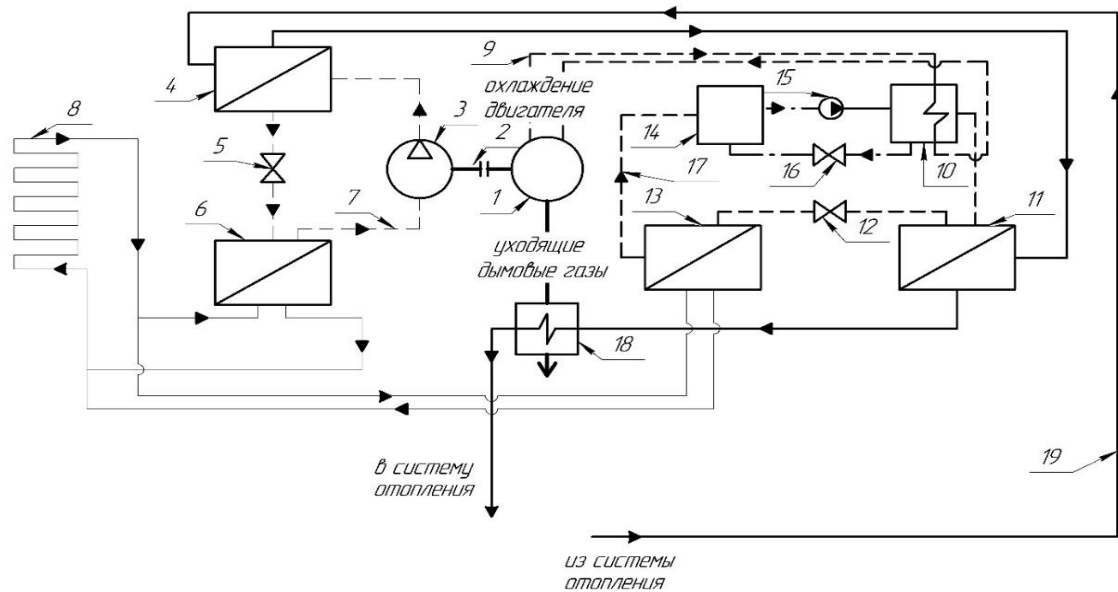


Рис. 1. Принципиальная схема теплогенератора повышенной эффективности:

- где 1 – тепловой двигатель, 2 – вал компрессора парокомпрессионного теплового насоса, 3 – компрессор парокомпрессионного теплового насоса, 4 – конденсатор парокомпрессионного теплового насоса, 5 – дроссель парокомпрессионного теплового насоса, 6 – испаритель парокомпрессионного теплового насоса, 7 – контур парокомпрессионного теплового насоса, 8 – источник низкопотенциальной энергии, 9 – охлаждение двигателя, 10 – генератор абсорбционного теплового насоса, 11 – испаритель абсорбционного теплового насоса, 12 – расширительный клапан абсорбционного теплового насоса, 13 – конденсатор абсорбционного теплового насоса, 14 – абсорбер абсорбционного теплового насоса, 15 – насос абсорбционного теплового насоса, 16 – дроссель абсорбционного теплового насоса, 17 – контур абсорбционного теплового насоса, 18 – теплообменник уходящих газов, 19 – контур отопления

РАСЧЕТ КАПИТАЛЬНЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАТРАТ РАЗЛИЧНЫХ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВОК

Исходя из полученной суммарной потребности здания в теплоте на горячее водоснабжение и отопление в течение отопительного периода рассматриваемого здания произведем расчет капитальных и эксплуатационных затрат используя: электрический котел, газовый котел, газовый конденсационный котел, жидкотопливный котел, твердотопливный котел, тепловой насос, теплогенератор повышенной эффективности.

В качестве электрического котла будем рассматривать двухконтурный котел фирмы Evan FIL-B 70 [10] стоимостью $C_{к.эл.}=841500$ рублей. Мощность котла 70 кВт, КПД составляет $\eta_{к.эл.}=99\%$. Стоимость установки котла ориентировочно составляет $C_{уст.}=25000$ рублей. Тогда капитальные затраты будут определяться выражением:

$$Z_{кап.эл.} = C_{к.эл.} + C_{уст.эл.} = 841500 + 25\ 000 = 866500 \text{ рублей} \quad (5)$$

Эксплуатационные затраты при отоплении и горячем водоснабжении здания за счет электрического котла, за один год эксплуатации при стоимости электроэнергии $C_{эл.}=5$ руб/(кВт·ч) составят:

$$Z_{э.эл.} = \frac{C_{эл.} \cdot E_{от.гвс}}{3\ 600 \cdot \eta_{к.эл.}} \cdot 100\% = \frac{5 \cdot 558139405}{3\ 600 \cdot 99} \cdot 100 = 783024 \text{ руб} \quad (6)$$

В качестве отопительного газового котла будем рассматривать двухконтурный настенный котел ACV

HeatMaster 70N [11] стоимостью $C_{к.газ.}=382000$ рублей. Мощность котла 70 кВт, КПД составляет $\eta_{к.газ.}=96,7\%$. Стоимость установки котла ориентировочно составляет $C_{уст.}=20000$ рублей. Тогда капитальные затраты будут определяться выражением:

$$Z_{кап.газ.} = C_{к.газ.} + C_{уст.газ.} = 382000 + 20000 = 402000 \text{ рублей} \quad (7)$$

Количество газа необходимое для отопления и горячего водоснабжения здания будет определяться из выражения:

$$V_{к.газ.} = \frac{E_{от.гвс}}{Q_{н.газ.} \cdot \eta_{к.газ.}} \cdot 100\% = \frac{558139405 \cdot 100}{31,8 \cdot 10^3 \cdot 96,7} = 18151 \text{ м}^3 \quad (8)$$

Эксплуатационные затраты при отоплении и горячем водоснабжении здания за счет газового котла, за один год при стоимости газа $C_{газ.}=5,67$ руб/м³ составят:

$$Z_{э.газ.} = C_{газ.} \cdot V_{к.газ.} = 5,67 \cdot 18151 = 102916 \text{ рублей} \quad (9)$$

В качестве отопительного газового конденсационного котла будем рассматривать напольный газовый конденсационный двухконтурный котел ACV HeatMaster 70 TC [12] мощностью 68,2 кВт и стоимостью $C_{к.кон.}=723925$ рублей. Мощность котла 70 кВт, КПД составляет $\eta_{к.газ.}=109\%$. Стоимость установки котла ориентировочно составляет $C_{уст.}=20000$ рублей. Тогда капитальные затраты будут определяться выражением:

$$Z_{кап.кон.} = C_{к.кон.} + C_{уст.кон.} = 723925 + 20\ 000 = 743925 \text{ рублей} \quad (10)$$

Количество газа необходимое для отопления и горячего водоснабжения газовым конденсационным котлом составит:

$$V_{к.кон} = \frac{E_{от.гвс}}{Q_{н.газ} \cdot \eta_{к.кон}} \cdot 100\% = \frac{558139405 \cdot 100}{31,8 \cdot 10^3 \cdot 109} = 16102,3 \text{ м}^3 \quad (11)$$

Эксплуатационные затраты при отоплении и горячем водоснабжении здания за счет газового котла, за один год при стоимости газа $C_{газ}=5,67$ руб/м³ составят:

$$З_3^{к.кон} = C_{газ} \cdot V_{к.кон} = 5,67 \cdot 16102,3 = 91300 \text{ рублей} \quad (12)$$

В качестве отопительного жидкотопливного котла будем рассматривать двухконтурный котел ACV HeatMaster 70N [11] мощностью 70 кВт и стоимостью $C_{к.диз}=382000$ рублей. Мощность котла 70 кВт, КПД составляет $\eta_{к.газ}=96,7\%$. Стоимость установки котла ориентировочно составляет $C_{уст}=20000$ рублей. Тогда капитальные затраты будут определяться выражением:

$$З_{кап}^{к.диз} = C_{к.диз} + C_{уст}^{к.диз} = 382000 + 20000 = 402000 \text{ рублей} \quad (13)$$

Количество топлива необходимое для отопления и горячего водоснабжения рассматриваемого здания будет определяться из выражения:

$$V_{к.диз} = \frac{E_{от.гвс}}{Q_{н.диз} \cdot \rho_{диз} \cdot \eta_{диз}} \cdot 100\% = \frac{558139405 \cdot 100}{42,7 \cdot 10^3 \cdot 860 \cdot 96,7} = 15,7 \text{ м}^3 \quad (14)$$

Эксплуатационные затраты при отоплении и горячем водоснабжении здания за счет дизельного котла, за один год эксплуатации при стоимости топлива $C_{диз}=345000$ руб/м³ составят:

$$З_3^{к.диз} = C_{диз} \cdot V_{к.диз} = 34500 \cdot 15,7 = 541650 \text{ рублей} \quad (15)$$

В качестве отопительного твердотопливного котла будем рассматривать водогрейный дровяной котел Burzhui-K T-75A-2K [13] мощностью до 75,0 кВт и стоимостью $C_{тв.к}=176460$ рублей, КПД составляет $\eta_{к.тв}=82\%$. Стоимость установки котла ориентировочно составляет $C_{уст}=20000$ рублей.

Тогда капитальные затраты будут определяться выражением:

$$З_{кап}^{к.тв} = C_{к.тв} + C_{уст}^{к.тв} = 176460 + 20000 = 196460 \text{ рублей} \quad (16)$$

Количество топлива необходимое для отопления и горячего водоснабжения здания будет определяться из выражения:

$$V_{др} = \frac{E_{от.гвс}}{Q_{н.др} \cdot \eta_{к.тв}} \cdot 100\% = \frac{558139405 \cdot 100}{6750 \cdot 10^3 \cdot 82,0} = 100,8 \text{ м}^3 \quad (17)$$

Эксплуатационные затраты при отоплении и горячем водоснабжении здания за счет твердотопливного котла, за один год эксплуатации при средней стоимости дров $C_{др}=1500$ руб/м³ составят:

$$З_3^{к.тв} = C_{газ} \cdot V_{к.кон} = 1500 \cdot 100,8 = 151200 \text{ рублей} \quad (18)$$

В качестве теплового насоса будем использовать парокомпрессионный трансформатор Stiebel Eltron WPF 66 G [14] мощностью 69 кВт и стоимостью $C_{тн}=1119000$ рублей.

Разность температур между приемником и источником при отоплении будет равна:

$$\Delta t_{от} = \frac{55 + 45}{2} - \frac{0 + (-10)}{2} = 55 \text{ °C} \quad (19)$$

Разность температур между приемником и источником при горячем водоснабжении будет равна:

$$\Delta t_{гвс} = \frac{10 + 55}{2} - \frac{0 + (-10)}{2} = 37,5 \text{ °C} \quad (20)$$

Согласно рис. 2 коэффициенты преобразования теплоты соответственно будут равны $COP_{от}=3,2$ и $COP_{гвс}=4,2$.

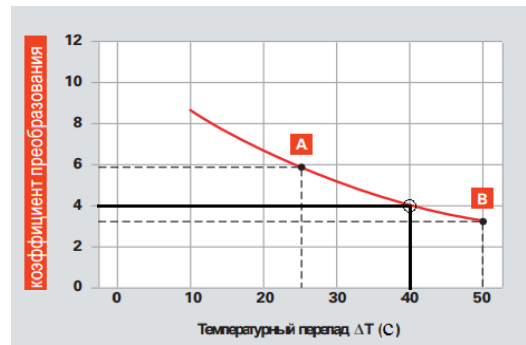


Рис. 2. Зависимость коэффициента преобразования от разности температур источника и приемника для парокомпрессионного теплового насоса

Определим необходимый теплосъем грунтового зонда при коэффициенте преобразования равным 3,2 по формуле:

$$Q_{гр} = \left(1 - \frac{1}{COP_{min}}\right) \cdot Q_k = \left(1 - \frac{1}{3,2}\right) \cdot 65000 = 44687,5 \text{ Вт} \quad (21)$$

Для расчета примем, что почва влажная, глинистая, соответственно удельный теплосъем грунтового зонда составит $q_{гр}=50$ Вт/м

Общая требуемая длина грунтовых зондов будет равна:

$$l_{гр} = \frac{Q_{гр}}{q_{гр}} = \frac{44687,5}{50} = 893,8 \text{ м} \quad (22)$$

Необходимое количество зондов составляет $n_{гр.з}=15$ длиной $l_{гр.з}=60$ м каждый и соответственно необходимо 15 скважин по 60 м. Стоимость грунтового зонда составляет $C_{гр.з}=150$ руб/м, стоимость бурения скважины $C_{бур.с}=1000$ руб/м: тогда общая стоимость грунтового зонда включая его монтаж составит:

$$C_{гр} = n_{гр.з} \cdot l_{гр.з} \cdot (C_{гр.з} + C_{бур.с}) = 15 \cdot 60 \cdot (150 + 1000) = 1035000 \text{ рублей} \quad (23)$$

Для выбранного теплового насоса будем использовать буферную емкость Vitocell 300-N [15], стоимостью $C_{буф}=134095$ рублей

Стоимость установки теплового пункта (тепловой насос без учета грунтовых зондов) и буферной емкости ориентировочно составит $C_{уст}=30000$ рублей

Тогда капитальные затраты на приобретение и монтаж теплового насоса будут определяться выражением:

$$З_{кап}^{тн} = C_{тн} + C_{буф} + C_{уст}^{тн.буф} + C_{гр} = 1119000 + 134095 + 30000 + 1035000 = 2318095 \text{ рублей} \quad (24)$$

Электрическая энергия необходимая на отопление при использовании парокомпрессионного теплового насоса будет определяться выражением:

$$E_{от}^{тн} = \frac{E_{от}}{COP_{от}} = \frac{501295392}{3600 \cdot 3,2} = 43515 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (25)$$

Электроэнергия необходимая для горячего водоснабжения при использовании парокомпрессионного теплового насоса будет определяться выражением:

$$E_{гвс}^{тн} = \frac{E_{гвс}}{COP_{гвс}} = \frac{56844013}{3600 \cdot 4,2} = 3759,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (26)$$

Тогда эксплуатационные затраты за год эксплуатации при использовании парокомпрессионного теплового насоса и стоимости электроэнергии $C_{эл}=5$ руб/(кВт·ч)

$$З_3^{тн} = C_{эл} \cdot (E_{от}^{тн} + E_{гвс}^{тн}) = 5 \cdot (43515 + 3759,5) = 236372 \text{ рублей} \quad (27)$$

РАСЧЕТ КАПИТАЛЬНЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАТРАТ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ, РАБОТАЮЩЕГО В ИДЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ.

Стоимость теплогенератора повышенной эффективности складывается из стоимости парокомпрессионного и абсорбционного тепловых насосов, двигателя внутреннего сгорания, теплообменника утилизирующего тепло с дымовых газов двигателя, теплообменники для восприятия низкопотенциальной энергии.

При работе с использованием радиаторов мощность парокомпрессионного теплового насоса должна быть 34кВт, мощность абсорбционного теплового насоса 30,5кВт, мощность теплового двигателя 35,4 кВт. В качестве парокомпрессионного теплового насоса будет использован OVANTER [16] мощностью до 36 кВт $C_{пкtn}=386400$ рублей.

В качестве двигателя внутреннего сгорания можно использовать Lifan LF2V78F-2A [17] мощностью 27 л.с. и стоимостью $C_{двс}=58100$ рублей.

Абсорбционного теплового насоса мощностью в пределах 20-40 кВт не представлено на рынке. Исходя из существующих цен на рынке стоимость за 1 кВт установленной мощности составляет в среднем 2000 рублей. Для

работы в различных режимах и условиях теплогенератору повышенной эффективности понадобится абсорбционный тепловой насос с максимальной мощностью 30 кВт, тогда его ориентировочная стоимость составит $C_{атн}=2000 \cdot 30=60000$ рублей.

Для работы теплогенератора так же необходим теплообменник мощностью 4-8 кВт ориентировочная стоимость которого составляет $C_{то,ух}=5000$ рублей и теплообменников для восприятия низкопотенциальной энергии мощностью до 40 кВт ориентировочная стоимость которых составляет $C_{то,нз}=23000$ рублей.

Стоимость сборки оборудования ориентировочно составляет $C_{сб}=30000$ рублей.

Тогда минимальные капитальные затраты на теплогенератор повышенной эффективности будут определяться выражением:

$$З_{кап}^{тн} = C_{пкtn} + C_{абtn} + C_{двс} + C_{сб} + C_{то,ух} + 2 \cdot C_{то,нз} = 414000 + 60000 + 58100 + 30000 + 5000 + 2 \cdot 23000 = 613100 \text{ рублей} \quad (28)$$

Для экономического расчета теплогенератора повышенной эффективности был проведен расчет теплового баланса, данные которого были отражены на балансовых схемах. В качестве примера на рис. 3 приведен тепловой баланс теплогенератора повышенной эффективности работающего в идеальных условиях.

Эксплуатационные затраты разрабатываемого теплогенератора повышенной эффективности, работающего в идеальных условиях, рассчитываются при максимальных коэффициентах преобразования.

Определим коэффициент эффективности исходя из теплового баланса:

$$K_3 = \frac{Q_{пн}}{Q_3} \cdot 100\% = \frac{70,01}{20} \cdot 100\% = 350\% \quad (29)$$

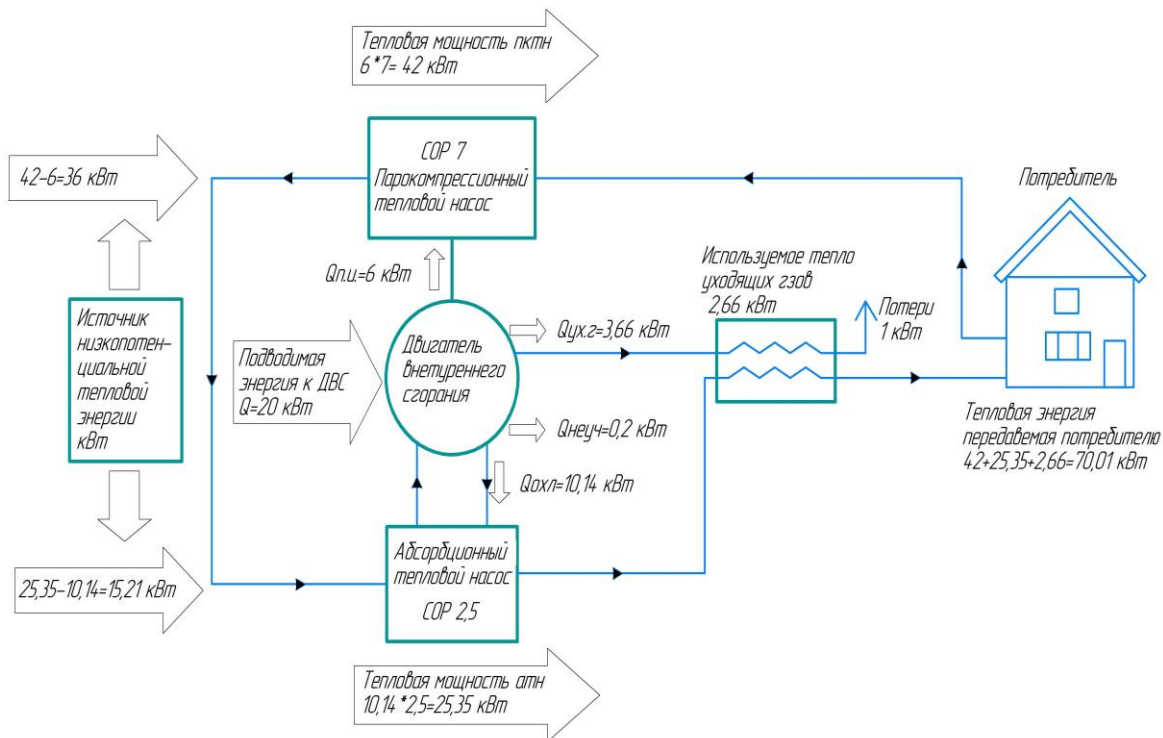


Рис. 3. Тепловой баланс теплогенератора повышенной эффективности, работающего в идеальных условиях

Таблица 1

Отопительное оборудование	Результаты расчета капитальных и эксплуатационных затрат	
	Капитальные затраты, руб.	Эксплуатационные затраты за один год эксплуатации, руб.
1. Электрический котел	866500	783024
2. Газовый котел	402000	102916
3. Газовый конденсационный котел	743925	91300
4. Жидкотопливный котел	402000	541650
5. Твердотопливный котел	196460	151200
6. Тепловой насос	2318095	236372
7. Разрабатываемый теплогенератор повышенной эффективности, работающий с использованием в качестве приемников тепловой энергии радиаторы	613100	50338
8. Разрабатываемый теплогенератор повышенной эффективности, работающий с использованием в качестве приемников тепловой энергии систему с развитой поверхностью теплообмена	613100	36818
9. Разрабатываемый теплогенератор повышенной эффективности, работающий в идеальных условиях	613100	28433

Стоимость теплогенератора рассчитывалась с использованием импортного оборудования. График окупаемости представлен на рис. 4.

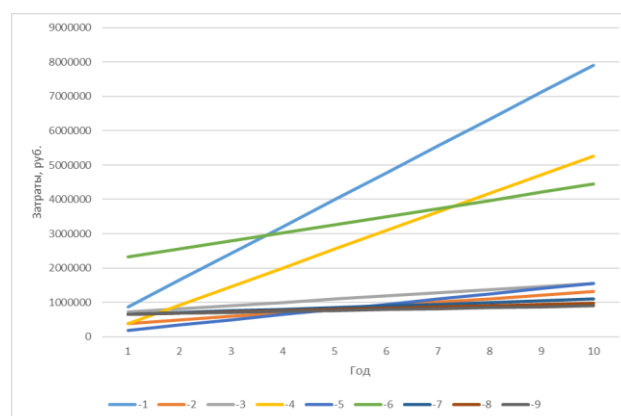


Рис. 4. Суммарные затраты на отопление здания при использовании различного отопительного оборудования: 1 – Электрический котел; 2 – Газовый котел; 3 – Конденсационный котел; 4 – Жидкотопливный котел; 5 – Твердотопливный котел; 6 – Тепловой насос; 7 – Разрабатываемый теплогенератор повышенной эффективности, с использованием в качестве приемников тепловой энергии радиаторы; 8 – Разрабатываемый теплогенератор повышенной эффективности, с использованием в качестве приемников тепловой энергии систему с развитой поверхностью теплообмена; 9 – Разрабатываемый теплогенератор повышенной эффективности, работающий в идеальных условиях

Количество топлива необходимое для отопления и горячего водоснабжения рассматриваемого здания будет определяться из выражения:

$$V_{\text{газ}} = \frac{E_{\text{от.гвс}}}{Q_{\text{н.газ}} \cdot K_3} \cdot 100 \% = \frac{558139405 \cdot 100}{31,8 \cdot 10^3 \cdot 350} = 5014,7 \text{ м}^3 \quad (30)$$

Эксплуатационные затраты при отоплении и горячем водоснабжении здания за один год при стоимости газа $C_{\text{газ}}=5,67 \text{ руб/м}^3$ составят:

$$З_3^{\text{т.п.э}} = C_{\text{газ}} \cdot V_{\text{газ}} = 5,67 \cdot 5014,7 = 28433 \text{ рублей} \quad (31)$$

РАСЧЕТ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАТРАТ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ, РАБОТАЮЩЕГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ В КАЧЕСТВЕ ПРИЕМНИКОВ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ РАДИАТОРЫ

Определим коэффициент эффективности исходя из теплового баланса:

$$K_3 = \frac{Q_{\text{пн}}}{Q_3} \cdot 100 \% = \frac{69,97}{35,4} \cdot 100 \% = 197,7 \% \quad (32)$$

Количество топлива необходимое для отопления и горячего водоснабжения рассматриваемого здания будет определяться из выражения:

$$V_{\text{газ}} = \frac{E_{\text{от.гвс}}}{Q_{\text{н.газ}} \cdot K_3} \cdot 100 \% = \frac{558139405 \cdot 100}{31,8 \cdot 10^3 \cdot 197,7} = 8877,9 \text{ м}^3 \quad (33)$$

Эксплуатационные затраты при отоплении и горячем водоснабжении здания за один год при стоимости газа $C_{\text{газ}}=5,67 \text{ руб/м}^3$ составят:

$$З_3^{\text{т.п.э}} = C_{\text{газ}} \cdot V_{\text{газ}} = 5,67 \cdot 8877,9 = 50338 \text{ рублей} \quad (34)$$

РАСЧЕТ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАТРАТ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ, РАБОТАЮЩЕГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ В КАЧЕСТВЕ ПРИЕМНИКОВ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ СИСТЕМУ С РАЗВИТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ТЕПЛООБМЕНА

Определим коэффициент эффективности исходя из теплового баланса:

$$K_3 = \frac{Q_{\text{пн}}}{Q_3} \cdot 100 \% = \frac{70,02}{25,9} \cdot 100 \% = 270,3 \% \quad (35)$$

Количество топлива необходимое для отопления и горячего водоснабжения рассматриваемого здания будет определяться из выражения:

$$V_{\text{газ}} = \frac{E_{\text{от.гвс}}}{Q_{\text{н.газ}} \cdot K_3} \cdot 100 \% = \frac{558139405 \cdot 100}{31,8 \cdot 10^3 \cdot 270,3} = 6493,4 \text{ м}^3 \quad (36)$$

Эксплуатационные затраты при отоплении и горячем водоснабжении здания за один год при стоимости газа $C_{\text{газ}}=5,67 \text{ руб/м}^3$ составят:

$$З_3^{\text{т.п.э}} = C_{\text{газ}} \cdot V_{\text{газ}} = 5,67 \cdot 6493,4 = 36818 \text{ рублей} \quad (37)$$

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Для экономической оценки был проведен расчет капитальных и эксплуатационных затрат на отопление и горячее водоснабжение здания с использованием различного отопительного оборудования [18] мощностью 70 кВт результаты, которого представлены в таблице 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, если брать существующие теплогенераторы, то самые низкие эксплуатационные затраты у газового конденсационного котла. Из результатов расчетов видно, что при идеальных условиях работы эксплуатационные затраты у разрабатываемого теплогенератора более, чем в 3 раза ниже, чем у газового конденсационного котла. Также расчеты показывают, что разрабатываемый теплогенератор, может иметь цену ниже 650 тысяч рублей, такая стоимость соответствует сроку окупаемости с газовым оборудованием – 5 лет, с твердотопливным котлом – 5,5 лет, с жидкотопливным котлом – 6 месяцев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ионин А.А. Теплоснабжение: учеб. для вузов / А.А. Ионин, Б.М. Хлыбов, В.Н. Братенков, Е.Н. Терлецкая. – М.: Стройиздат, 1982. – 4 с.
2. Краткий обзор современных систем отопления жилых домов и общественных зданий – URL: <http://teploguru.ru/sistemy/obzor-sistem-otopleniya.html> (дата обращения 15.12.2020).
3. Литвинчук Г. Российский рынок систем отопления и горячего водоснабжения – URL: <http://www.litvinchuk.ru/rossijskij-rynok-sistem-otopleniya-i-goguchego-vodosnabzheniya/> (дата обращения 15.12.2020).
4. Гулый С.А. Будущее - за тепловыми насосами / С.А. Гулый // Наука и техника в Якутии. – 2008. – № 1 (14).
5. Острякова Ю.Е. Бенчмаркинг тепловых насосов / Ю.Е. Острякова, Н.В. Гамзина // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2016. – № 1.
6. Морозов А.А. Оценка перспективы применения альтернативных источников энергии для коттеджей / А.А. Морозов // Наука, техника и образование. – 2017. – № 7.
7. Никитин А.А. Экономические и экологические аспекты использования геотермальных технологий в народном хозяйстве / А.А. Никитин, В.А. Крылов, Т.В. Рябова, А.В. Василенок // Экономика и экологический менеджмент. – 2015. – № 2.
8. Шмаков А.С. Разработка теплогенератора повышенной эффективности / А.С. Шмаков, В.В. Папин, Р.В.

Безуглов, Д.В. Добрыднєв, С.В. Житников // Студенческая научная весна. – Новочеркасск: Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ) им. М.И. Платова. – 2019 – 228 с.

9. СНиП 23.01-99. Строительная климатология.
10. Электрический котел Evan FIL-B 70 – URL: <https://www.e-katalog.ru/EVAN-FIL-B-70.htm> (дата обращения 15.12.2020).
11. Котел ACV "HEAT MASTER 70 N" – URL: <http://acvmarket.ru/catalog/heatmaster-napolnye-s-boylerom-promyshlennye/gazovyy-kotel-heat-master-70-n/> (дата обращения 15.12.2020).
12. Газовый котел HeatMaster 70 TC / Источник: Night price – URL: <https://kotel-price.ru/gazovye-kotly-otopleniya/acv-heatmaster-70-tc-68-kvt-05652401/> (дата обращения 15.12.2020).
13. Твердотопливный котел Burzhui-K T-75A-2K – URL: <https://www.e-katalog.ru/BURZHUI-K-T-75A-2K.htm> (дата обращения 15.12.2020).
14. Геотермальный тепловой насос Stiebel Eltron WPF 66 G – URL: <https://market.yandex.ru/product--geotermalnyi-tepvoi-nasos-stiebel-eltron-wpf-66-g/1962670429> (дата обращения 15.12.2020).
15. VITOCCELL 300-H/ Источник: VISSSMAN – URL: <https://www.viessmann.ru/ru/zilye-zdania/emkostnyj-vodonagrevatel/emkostnye-vodonagrevateli/vitocell-300h.html> (дата обращения 15.12.2020).
16. Цены на тепловые насосы для отопления дома – URL: <https://ovanter.ru/czeny.html> (дата обращения 15.12.2020).
17. Двигатель Lifan LF2V78F-2A – URL: https://naparnik.expert/catalog/product/dvigatel_lifan_lf2v78f_2a_val_25_mm_katushka_3_ampa_1/ (дата обращения 15.12.2020).
18. Папин В.В. Учебно-методическое пособие по практическим занятиям и самостоятельной работе по дисциплине «Перспективные технологии централизованного теплоснабжения» / В.В. Папин, А.Д. Овечкин. – Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ). – 28 с.

Heat Generator of Increased Efficiency and its Economic Feasibility

Papin V.V., Dyakonov E.M., Shmakov A.S.
Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)
Novocherkassk, Russian Federation

Abstract. The article proposes a new heat generator with increased efficiency. A technical and economic comparison with existing heat-generating installations has been carried out.

Keywords: heat generator, heat supply, steam compressor heat pump, absorption heat pump, renewable energy sources.

Эффективное применение фазового перехода второго рода для преобразования теплоты в электроэнергию на КЭС

Безуглов Р.В., Ведмичев Н. А., Дьяконов Е. М.
Южно-Российский государственный политехнический университет
(Новочеркасский политехнический институт) имени М.И. Платова
Новочеркасск, Россия
bezuglov@npi-tu.ru, retek27@mail.ru, emdyakonov@yandex.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается краткий обзор применения технологии фазового перехода второго рода и конденсационной электростанции, а также принцип работы и применение новой установки, путем расчета теплого баланса для преобразователя теплоты в электроэнергию на конденсационной электростанции (КЭС).

Ключевые слова: точка Кюри, утилизация теплоты, фазовый переход второго рода, преобразование теплоты в электричество.

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе предлагается технология преобразователя теплоты в электроэнергию на основе фазового перехода второго рода (температура Кюри). Это температура, связанная со скачкообразным изменением свойств симметрии вещества (например, магнитной – в ферромагнетиках). При температуре Кюри ферромагнетики обладают самопроизвольной намагниченностью и определенной магнитно – кристаллической симметрией. В точке Кюри интенсивность теплового движения атомов ферромагнетика оказывается достаточной для разрушения его намагниченности и изменения симметрии, в результате чего ферромагнетик становится парамагнетиком.

Конденсационная электростанция (КЭС), это тепловая паротурбинная электростанция, в которой энергия первичных источников (природный газ, ископаемый уголь, мазут и др.) преобразуется в электрическую энергию с использованием конденсационной турбины. КЭС вырабатывает только электроэнергию (в отличие от теплоэлектроцентралей). Технологический процесс превращения энергии на КЭС производится на основе цикла Ренкина.

ОБЗОР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ВТОРОГО РОДА

Фазовым в термодинамике называется переход вещества из одной термодинамической фазы в другую при изменении внешних условий (температуры, давления, магнитного и электрического полей и других параметров). Различают фазовые переходы двух видов: фазовые переходы первого рода, характеризующиеся скачкообразным изменением термодинамических характеристик вещества, и фазовые переходы второго рода, при протекании которых плотность и внутренняя энергия не меняются, вследствие чего визуально такой фазовый переход может не наблюдаться. Точка Кюри – это температура фазового

перехода второго рода, связанного со скачкообразным изменением свойств симметрии вещества (например, магнитной — в ферромагнетиках). Данный эффект позволяет создавать на его основе энергетические агрегаты, которые могут быть использованы для прямого преобразования тепловых эффектов в электроэнергию. Ниже приведен анализ современного состояния развития (в том числе применения) описанного эффекта.

Примером устройства, работающего на изложенных выше принципах, является устройство, предложенное в патенте РФ №2379820, «Способ преобразования тепловой энергии в электрическую». Суть изобретения сводится к тому, что циклическая работа поршня в замкнутых камерах нагревает/охлаждает воздух при сжатии/расширении. Нагретый/охлажденный воздух через шланги нагревает/охлаждает вставки с низкой точкой Кюри, прерывая магнитопровод и создавая переменное магнитное поле и вызывая ЭДС в приемных обмотках, после которых ток идет в выпрямители. Для работы установки необходима обмотка возбуждения [1].

Еще одним вариантом использования теплоты фазового перехода второго рода является устройство, защищенное патентом РФ №2382479 «Устройство для преобразования тепловой энергии в электрическую». Установка работает по принципу прерывающегося магнитопровода для создания переменной магнитной индукции и обладает преимуществом по сравнению с изложенной выше ввиду отсутствия нагнетателя. Хотя надежность этой конструкции существенно снижается за счет расположенного на шарнире коромысла. Не приведены сведения об охлаждении нагреваемых элементов. Нет четко выделенного газового канала, что не дает понимания о том, как газ будет взаимодействовать с неподвижными элементами, коромыслом, магнитопроводами и прочими элементами. Также не решен вопрос очистки газового потока от загрязняющих примесей, которые в процессе работы могут засорять каналы и само устройство [2].

Примером устройства, работающего с использованием эффекта фазового перехода второго рода, может выступать патент РФ № 2542601 «Способ преобразования тепловой энергии в электрическую и устройство для его осуществления». Данное устройство основано на тех же принципах нагрева ферромагнитного элемента нагревате-

Статья подготовлена при поддержке стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики на 2018-2020 годы (Проект № СП-1061.2021.1).

лем, расположенного на магнитопроводе с установленным на нем источником магнитного поля. Прерывание магнитопровода обеспечивают выходная и входная обмотки. С выводов генератора-возбудителя подается последовательность импульсов, а сгенерированный ток выпрямляется и может аккумулироваться в батарее [3].

Схожее устройство представлено в патенте РФ №2620260 «Устройство для непосредственного преобразования тепловой энергии в электрическую». Принцип действия этой установки похож с принципом действия устройства, изложенного выше. Нагрева ферромагнитного элемента нагревателем, расположенного на магнитопроводе с установленным на нем источником магнитного поля. Прерывание магнитопровода обеспечивают выходная и входная обмотки. С выводов генератора-возбудителя подается последовательность импульсов, а сгенерированный ток выпрямляется и может аккумулироваться в батарее [4].

Все найденные нами патенты описывают работу устройства за счет прерывания магнитопровода. Работы по исследованию магнитотепловой технологии вызывают интерес в настоящий момент.

Например, работа Габреляна Д.А. посвящена магнитотепловой технологии и ее развитию в двигателестроении с учетом современного состояния энергетики. По его утверждению, низкие рабочие температуры, в пределах до 100 °С, позволили бы использовать мощнейшие на сегодня постоянные магниты на основе Nd-Fe-B для создания магнитной системы [5].

Компанией Vortex Energy Inc. проведена оценка удельной мощности устройств. Основываясь на экспериментальных данных величину удельной мощности устройства можно довести до значения порядка 1 Вт/г рабочего тела и выше [6].

Ф.Ф. Пашенко, Л.Е. Круковский и В.В. Торшин в статье, посвященной преобразователю тепловой энергии в электрическую, обосновали необходимость исследований в области магнитотепловых технологий с учетом современного состояния энергетики в целом. Ими был предложен способ и устройство преобразования тепловой энергии в электрическую. Устройство обладает значительными недостатками и требует существенной проработки.

Недостатки заключаются как в несовершенстве конструкции, так и в недостаточности учета всех факторов, влияющих на эксплуатацию и производительность установки [7].

Р.Д. Усачевым также проведен научно-технологический анализ установок и способов прямого преобразования тепловой энергии в электрическую. В том числе затронута и тема магнитотепловых преобразователей. Однако тема затронута поверхностно и совершенно не раскрыта [8].

Когда в качестве шихты применяют ферромагнитные металлы [9], то до того момента, пока их температура еще не достигла точки Кюри, то есть 740-770 °С, их магнитная проницаемость сохраняет свое значение. В этом случае шихта будет играть роль не только вторичной обмотки и нагрузки, но и незамкнутого сердечника. Иначе говоря, при плавке в печи без сердечника ферромагнитных металлов разогрев шихты в первый период (до точки Кюри) произойдет не только за счет тепла, выделяемого от цир-

куляции в ней вихревых токов, но и за счет потерь на перемангничивание, которое в этот период наблюдается в шихте. После точки Кюри ферромагнитные тела теряют свои магнитные свойства, и работа индукционной печи становится аналогичной работе воздушного трансформатора, то есть трансформатора без сердечника.

Статья [10] посвящена исследованию свойств индукционной тигельной печи с ферромагнитной кусковой загрузкой. Для исследования характера изменения параметров индукционной печи при нагревании до точки Кюри использовался метод физического моделирования, поскольку аналитически описать данный процесс проблематично. Результатами данной работы стали:

1. При нагреве кусковой загрузки из стали эквивалентное активное сопротивление последовательной схемы замещения изменяется незначительно, а после перехода через точку Кюри значительно уменьшается (в 3 раза при конфигурациях системы, подобной модельной). Реактивное сопротивление сначала увеличивается на 10%, после точки Кюри уменьшается на 20%. Такие изменения электрических параметров индукционной печи требуют от источника питания глубину регулирования порядка 30 – 35%.

2. Изменения параметров при нагреве ферромагнитной шихты ставят вопрос согласования нагрузки с источником питания для оптимального выбора установленной мощности преобразователя частоты. В исследуемом случае предпочтительно иметь источник питания с глубокой регулировкой выходных параметров, а именно - напряжения питания инверторного моста.

При легировании полупроводника CdGeAs₂ с марганцем в работе [11] получены ферромагнетики с высокими значениями температуры Кюри, достигающими 355 К. Показано, что это неоднородные магнетики: они состоят из ферромагнитной и парамагнитной фаз. Доля первой фазы увеличивается с уровнем легирования. Возникновение ферромагнетизма в указанной системе связывается с наличием вакансий типа (Cd, VC, Mn)GeAs₂ или нестехиометрии типа (Cd, Ge, Mn)GeAs₂, так как по теоретическим оценкам только в этих случаях ферромагнитное состояние энергетически более выгодно, чем состояние спинового стекла.

На данное время потенциал фазового перехода второго рода используется не полностью, и многие существующие исследования выполнены с использованием прерывания магнитопровода и в индукционных печах. Но мы предлагаем новый подход, который позволит использовать фазовый переход второго рода для преобразования тепловых потоков в электрическую и механическую энергию.

ПРИНЦИП РАБОТЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТЕПЛОТЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ ЗА СЧЕТ ТЕХНОЛОГИИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ВТОРОГО РОДА

В рамках того, что разработки в направлении утилизации теплоты, в частности низкопотенциальной, актуальны, но они недостаточно проработаны и на сегодняшний день нет установок, способных использовать фазовый переход второго рода для получения механической и электрической энергии, за счет утилизации теплоты выделяемой при работе различного оборудования в промышленности, вентиляционных воздух в металлургической про-

мышленности, транспорте и других тепловых выбросов в промышленности.

Поэтому мы решили разработать свою установку принцип действия, которой описан ниже.

Принцип работы данного преобразователя основан на том, что при достижении температуры точки Кюри у рабочего поршня теряются ферромагнитные свойства, и расположенный вблизи него магнит перестает на него действовать и происходит смещения поршня в зону холодного источника, где он охлаждается, восстанавливает ферромагнитные свойства, совершает работу и под действием преобладающей силы, приложенной к нему, двигается в обратном направлении совершая работу (рис. 1).

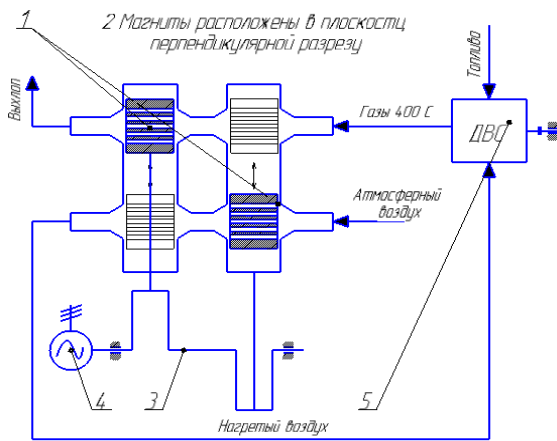


Рис. 1. Схема двигателя, использующего сбросное тепло, с поперечными каналами рабочего поршня

ОБЗОР КОНДЕНСАЦИОННОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ (КЭС)

Разрабатываемая установка будет весьма актуальна и востребована для утилизации теплоты как технологических тепловых выбросов, так и вплоть до бытовых, потому что на сегодняшний день температурный диапазон использования фазового перехода второго рода в зависимости от материала находится от 20 до 800 °С.

Наиболее эффективным мы видим это применение на электростанциях, потому что на них существует очень много различных тепловых потерь, это связано с тем, что станция использует органическое топливо, которое тратится на получения электрической энергии.

На КЭС существуют различные потери, например потери в котле, связанные с дымовыми газами, с охлаждением корпуса, с продувкой барабана. А также есть потери в самом цикле, например связанные с утечкой из-за неплотностей в соединениях трубопроводов и агрегатов, в конденсаторе, расход на уплотнения турбины и на различные технические нужды, в эжекторе, в электрогенераторе, потери в дренажах и другие незначительные потери. Ниже приведен краткий обзор о конденсационной электростанции.

На тепловых электростанциях химическая энергия сжигаемого топлива преобразуется в котле в энергию, приводящую во вращение турбоагрегат (паровую турбину, соединенную с генератором). После чего механическая энергия преобразуется генератором в электрическую. Топливом для электростанций служат уголь, торф, горю-

чие сланцы, а также газ и мазут. В отечественной энергетике на долю КЭС приходится до 60% выработки электроэнергии.

Основными особенностями КЭС являются: удаленность от потребителей электроэнергии, что определяет в основном выдачу мощности на высоких и сверхвысоких напряжениях, и блочный принцип построения электростанции. Мощность современных КЭС обычно такова, что каждая из них может обеспечить электроэнергией крупный район страны. Отсюда еще одно название электростанций этого типа - государственная районная электрическая станция (ГРЭС).

На рис.2 - упрощенная принципиальная технологическая схема энергоблока КЭС. Энергоблок представляет собой как бы отдельную электростанцию со своим основным и вспомогательным оборудованием и центром управления - блочным щитом. Связей между соседними энергоблоками по технологическим линиям обычно не предусматривается.

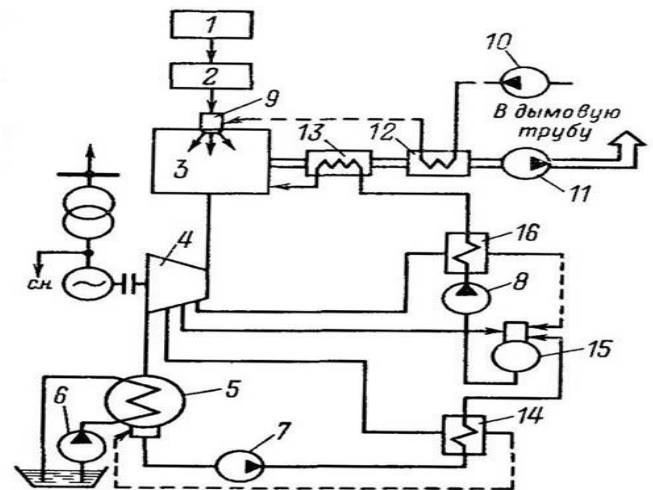


Рис. 2. Упрощенная принципиальная технологическая схема КЭС[12]:

- 1 - склад топлива и система топливоподачи,
- 2 - система топливоприготовления, 3 - котел, 4 - турбина,
- 5 - конденсатор, 6 - циркуляционный насос,
- 7 - конденсатный насос, 8 - питательный насос,
- 9 - горелки котла, 10 - вентилятор, 11 - дымосос,
- 12 - воздухоподогреватель, 13 - водяной экономайзер,
- 14 - подогреватель низкого давления, 15 - деаэрактор,
- 16 - подогреватель высокого давления

Технологическая схема КЭС состоит из нескольких систем: топливоподачи; топливоприготовления; основного пароводяного контура вместе с парогенератором и турбиной; циркуляционного водоснабжения; водоподготовки; золоулавливания и золоудаления и, наконец, электрической части станции (рис. 2).

Механизмы и установки, обеспечивающие нормальное функционирование всех этих элементов, входят в так называемую систему собственных нужд станции (энергоблока) [12].

Влияние КЭС на окружающую среду чрезвычайно велико. Например, о масштабах теплового загрязнения воды и воздуха можно судить по тому, что большие количества

тепла, которое выделяется в результате работы КЭС, выбрасывается в окружающую среду (рис. 3).

Наибольшие энергетические потери на КЭС имеют место в основном пароводяном контуре, а именно в конденсаторе, где отработавший пар, содержащий еще большое количество тепла, затраченного при парообразовании, отдает его циркуляционной воде. Тепло с циркуляционной водой уносится в водоемы, т.е. теряется.



Рис. 3. Распределение тепловых потоков между полезной выработкой теплоты и тепловыми потерями на КЭС

На основе того, что большая часть теплоты теряется в конденсаторе на КЭС, можно применить разрабатываемую технологию для теплового потока в конденсаторе и дымовых газов и рассчитать тепловой баланс с использованием преобразователя теплоты в электроэнергию, на основе фазового перехода второго рода.

РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА КЭС С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТЕПЛОТЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, НА ОСНОВЕ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ВТОРОГО РОДА

В данной работе проведена оценка эффективности принятого нового подхода, путем расчета теплового баланса для КЭС, где тепловой поток на станции преобразуется в электроэнергию по вот такой упрощенной схеме (рис. 4).

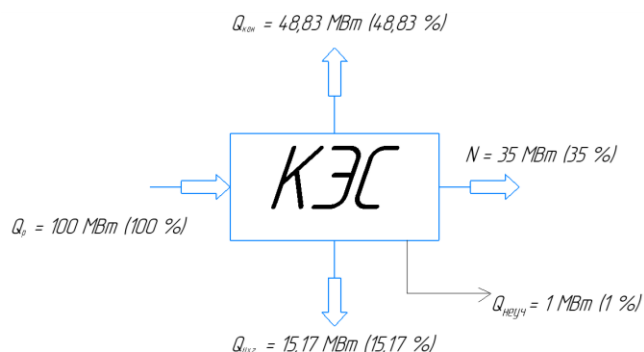


Рис. 4. Упрощенная схема теплового баланса КЭС

Схема работает следующим образом: в котел подается топливо и воздух, где происходит сжигание топлива. Откуда поступает в паровую турбины, где происходит выработка электроэнергии 35 МВт (35 %). Происходят потери с уходящими газами 15,17 МВт (15,17 %). Часть теплоты, теряется через конденсатор паровой турбины 48,83 МВт

(48,83 %). А также часть теплоты 1 МВт (1 %) тратится на прочие потери конденсационной электростанции.

В приведенном (табл. 1) тепловом балансе есть теплота дымовых газов КЭС, после сжигания топлива 15,17 МВт и жидкостного охлаждения 48,83 МВт, которую мы можем направить на преобразователь теплоты. При этом часть энергии будет передаваться на совершение механической работы, а часть будет отводиться в окружающую среду по законам характерным для тепловых двигателей. На данном этапе исследований мы еще не провели точных расчетов и не можем точно говорить какой будет механический КПД у нашего утилизатора, но предварительные расчеты показывают, что он будет около 30 %.

В нашем утилизаторе рабочим телом, которым является поршень может быть изготовлен из разных материалов. В зависимости от выбора материала будет предельная температура, до которой он сможет охладить дымовые газы. И соответственно сможет обеспечить какой - то теплоснабжением.

В данной работе были использованы такие материалы как: сплав Гейслера (Ni_2MnGa) для утилизации теплоты дымовых газов и сплав платины и никеля ($Pt-Ni$) для утилизации теплоты воды.

Таблица 1

Составляющие теплового баланса	Тепловой баланс КЭС	
	Q, МВт	q, %
Механическая полезная работа	35	35
Теплота, переданная охлаждающей жидкости	48,83	48,83
Теплота, уносимая отработавшими газами	15,17	15,17
Неучтенные потери	1	1
Количество располагаемой теплоты КЭС	100	100

Таблица 2

Составляющие теплового баланса	Тепловой баланс утилизатора теплоты, с использованием уходящих газов КЭС	
	Q, МВт	q, %
Теоретический предел теплоты потребляемой утилизатором	12,51	82,47
Теоретическая электрическую энергию при КПД утилизатора 30%	3,753	30
Тепловые потери на охлаждение утилизатора	8,757	70
Неучтенные потери в утилизаторе	0,26	1,71
Теплота, с уходящими газами после утилизатора	2,4	15,82
Общее количество теплоты поступившее в утилизатор	15,17	100

Исходя из расчета теплового баланса (табл. 2) тепловая энергия, поступающая с дымовыми газами из КЭС в двигатель утилизатор, который утилизирует часть тепла 12,51 МВт (82,5 %), от теплоты дымовых газов и получается теоретическую механическую энергию 3,753 МВт (30 %), и эта энергия идет на работу КЭС. И тепловую энергию в виде потерь на охлаждение утилизатора 8,757 МВт (70 %). Оставшаяся часть тепла 2,66 МВт (17,53 %) уходит через дымовую трубу станции. А также часть теплоты 0,26 МВт (1,71 %) тратится на неучтенные потери утилизатора.

Утилизация дымовых газов — это не вся энергия, которую можно утилизировать с помощью нашей технологии. Дополнительно можно усилить эффект утилизации используя тепловую энергию, идущую на охлаждение в КЭС (табл. 3).

Таблица 3

Составляющие теплового баланса	Тепловой баланс утилизатора теплоты перед конденсатором	
	$Q, \text{ МВт}$	$q, \%$
Теоретический предел утилизации энергии	22,79	46,7
Теоретическая механическая энергия при КПД утилизатора 30%	6,84	30
Тепловые потери на охлаждение утилизатора	15,95	70
Тепловая энергия поступившая в конденсатор после утилизатора	26,04	53,3
Общее количество теплоты	48,83	100

Расчет теплового баланса с использованием утилизатора теплоты, на основе фазового перехода второго рода для КЭС показал, что при утилизации теплоты дымовых газов с помощью утилизатора с рабочим телом, изготовленным из сплава Гейслера (Ni_2MnGa) получаем теоретическую электрическую энергию равной 3,75 %. А для теплоты воды с рабочим телом, изготовленным из сплава платины и никеля (Pt-Ni), получаем теоретическую электрическую энергию равной 6,83 %. Что в итоге позволит получить дополнительно 10,58 % теоретической электрической энергии относительно располагаемой теплоты КЭС (рис. 5).

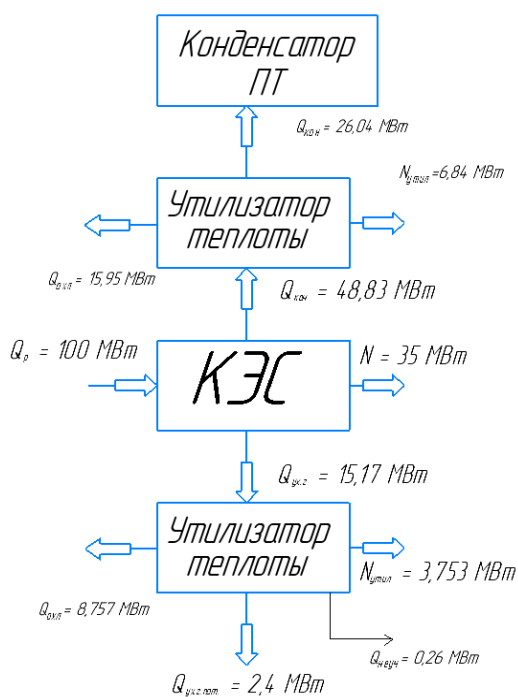


Рис. 5. Схема теплового баланса КЭС с применением двух преобразователей теплоты в электричество

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый способ преобразования теплоты в механическую и электрическую энергию, в том числе и

для низкопотенциальных источников, за счет применения фазового перехода второго рода.

Данное исследование показало, что технология позволит снизить тепловое загрязнение атмосферы, за счет того что, после работы предлагаемой установки газы охлаждаются, вследствие чего происходит снижение температуры дымовых газов выбрасываемых в окружающую среду. Также из-за того, что установка вырабатывает дополнительную мощность можно снизить расход топлива и соответственно сократить выход дымовых газов.

Можно сделать вывод, что применить данную технологию можно на любой тепловой двигатель (ГТУ, ГПА, ПГУ и др.) с целью повышения КПД всей системы в целом, а также дополнительной выработки электрической или механической энергии для использования ее на собственные нужды.

Данные значения располагаемой теплоты утилизации рассчитаны для конкретно выбранных материалов сплав Гейслера (Ni_2MnGa) и сплава платины и никеля (Pt-Ni). Для других материалов они были бы другими.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пашенко Ф.Ф., Торшин В.В., Круковский Л.Е. Способ преобразования тепловой энергии в электрическую энергию // Патент РФ № 2379820, МПК H02N 10/00 № 2008149416/06. 2010. Бюл. № 2.
2. Пашенко Ф.Ф., Торшин В.В., Круковский Л.Е. Устройство для преобразования тепловой энергии в электрическую энергию // Патент РФ № 2382479, МПК H02N 10/00 № 2009108249/06. 2010. Бюл. № 5.
3. Мищенко Е.Н., Мищенко С.Е., Шацкий В.В. Способ преобразования тепловой энергии в электрическую и устройство для его осуществления // Патент РФ № 2542601, МПК H02N 10/00 № 2012151495/28. 2015. Бюл. № 5.
4. Мищенко Е.Н., Мищенко С.Е., Ларин А.Ю. Устройство для непосредственного преобразования тепловой энергии в электрическую // Патент РФ № 2620260, МПК H02N 10/00 № 2015142594/06. 2017. Бюл. № 10.
5. Габриелян Д.А. Магнитотепловой двигатель. Перспективы развития магнитотепловой технологии / Д.А. Габриелян // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 2. – С. 160-166.
6. Официальный сайт компании Vortex Energy, Inc. Магнитотепловая технология производства энергии – URL: http://www.vortexenergy.ru/brochure_1r.html (дата обращения 15.12.2020).
7. Пашенко Ф.Ф. Преобразователь тепла в электрическую энергию / Ф.Ф. Пашенко, Л.Е. Круковский, В.В. Торшин // Изобретательство. – 2010. – Т. 10, № 9. – С. 15-18.
8. Усачев Р.Д. Способ прямого преобразования тепловой энергии в электрическую на объектах газовой промышленности за счет охлаждения газа с помощью термоэлектрических модулей / Р.Д. Усачев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 12-3. – С. 151-153.
9. Фарбман С.А. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов. Издание 5-е дополненное и переработанное / С.А. Фарбман, И.Ф. Колобнев. – М.: Металлур-

гия, 1968. – 496 с.

10. Определение электрических параметров индукционной печи при нагреве ферромагнитной шихты до точки Кюри – URL: http://www.gu-unpk.ru/public/file/science/confs/2014/ee/publ/s.4__Generals_IM.docx (дата обращения 15.12.2020).

11. Новый ферромагнетик с температурой Кюри выше комнатной — легированный Mn халькопирит CdGeAs₂ –

URL:

http://elibrary.lt/resursai/Uzsienio%20leidiniai/ioffe/pztf/2004/21/pztf_t30v21_14.pdf (дата обращения 15.12.2020).

12. Технологический процесс производства электроэнергии на электростанциях – URL: http://gigavat.com/obschie_svedeniya_ob_elektroustanovkah2.php (дата обращения 15.12.2020).

Efficient Use of a Second-Order Phase Transition for Heat-to-Electricity Conversion at a CES

Bezuglov R.V., Vedmichev N.A., Diakonov E.M.

South-Russian State Polytechnic University (Novocheerkassk Polytechnic Institute) named after M. I. Platov
Novocheerkassk, Russia

bezuglov@npi-tu.ru, retek27@mail.ru, emdyakonov@yandex.ru

Abstract. This article provides a brief overview of the application of the second-order phase transition technology, as well as the principle of operation and its application, by calculating the thermal balance for a heat-to-electricity converter at a condensing power plant (CES).

Keywords: curie point, heat utilization, second-order phase transition, heat-to-electricity conversion.

Повышение проводимости пленки PEDOT: PSS путем ультрадиспергации и сольватацией органическими соразтворителями

Логанчук С.М., Гаврус И.В., Мирошниченко Л.Г.

Южно-Российский государственный политехнический университет им. М.И. Платова
Новочеркасск, Российская Федерация
poetrywriter57@gmail.com

Аннотация. Представлены результаты исследований структуры и вольт-амперных характеристик образцов солнечных элементов на основе слоев, состоящих из комбинации органического соединения PEDOT:PSS и фулеренсодержащим полимером. Показано, что обработка соразтворителями термоотвержденных пленок PEDOT:PSS, а также применение предварительной ультрадиспергации дисперсии PEDOT:PSS уменьшает шероховатость поверхности пленки, приводит к конформационному изменению цепей PEDOT, а также способствует увеличению КПД органического солнечного элемента. Исследование морфологии и шероховатости пленок PEDOT: PSS методом атомно-силовой микроскопии установило наличие фазового разделения PEDOT и PSS с внедрением проводящих частиц PEDOT в менее проводящую матрицу PSS. Выявлено, что шероховатость слоя PEDOT:PSS оказывает заметное влияние на вольт-амперные характеристики солнечных элементов.

Ключевые слова: PEDOT: PSS, солнечный органический элемент, модификация поверхности, повышение проводимости.

ВВЕДЕНИЕ

Органическая электроника развивается настолько динамично, что в будущем может стать альтернативой неорганическим устройствам. Это связано с тем, что она выгодно отличается своей технологичностью, экологичностью, относительной дешевизной и возможностью создания гибких устройств [1]. Перспективной областью применения органических соединений в электронике является фотовольтаика. Тем не менее органические фотоэлементы имеют некоторые недостатки – эффективность преобразования света у неорганических солнечных элементов на данный момент значительно выше [2], а срок службы дольше. Однако перспективы органической электроники весьма значительны: на сегодняшнее время эффективность преобразования световой энергии составляет примерно 17,1 % [3]. Создание технологий по получению солнечных органических фотовольтаических устройств связаны с прогрессом в области нанотехнологий и с исследованиями в некоторых сферах химии полимеров.

В органических солнечных элементах вероятность разделения заряда недостаточно большая. Для того, чтобы получить максимальное КПД на солнечном элементе, нужно эффективно собирать фотоиндуцированные заряды

на электродах фотовольтаической ячейки. Для достижения этого необходимо согласование энергетических уровней электронов и дырок, что осуществляется контактом катода с материалом акцептора, а анода – с веществом донора. Указанные условия реализуются в случае, если работа выхода катода не выше низшей свободной молекулярной орбитали акцептора, а работа выхода анода не ниже высшей занятой молекулярной орбитали донора.

Помимо задачи согласования энергетических уровней материалов электродов с органическими слоями значительное влияние на КПД фотопреобразователя оказывают условия получения контактных слоев.

В связи с этим на данный момент актуальна задача совершенствования методов нанесения органических слоев, выявление способов увеличения проводимости пленок и более эффективного разделения зарядов.

В ряду соединений, широко применяемых для органических фотовольтаических и нанoeлектронных устройств, как слой, инжектирующий дырки, как правило, используется поли(3,4-этилендиокситиофен):поли(стиролсульфонат) (PEDOT: PSS). Его преимущества заключаются в возможности получения проводящих пленок из водных растворов [5] различными методами нанесения [6,7], а также хорошая химическая стабильность. Пленки на его основе обладают высокой прозрачностью в видимом диапазоне, высокой термической стабильностью, отличной механической гибкостью, хорошими электропроводящими свойствами.

PEDOT: PSS представляет собой диспергированную водную суспензию, состоящую из положительно заряженного PEDOT, сопряженного с отрицательно заряженным PSS. Последний также выполняет функции поверхностно-активного вещества (ПАВ) и стабилизирует в дисперсном состоянии PEDOT. Цепи PSS являются гидрофильным компонентом, в то время как PEDOT- гидрофобным [9, 10].

Существует несколько способов повысить проводимость PEDOT: PSS. Первый метод состоит во введении легирующей добавки, например, анионных ПАВ, полиолов [11], изменяющих пленкообразующие свойства, поверхностное натяжение, смачиваемость. Во втором способе добавляют полярные органические растворители, такие как этиленгликоль, диметилсульфоксид (ДМСО), ацетон,

изопропанол, ацетонитрил и другие в водный раствор PEDOT: PSS [12, 13]. Последние исследования показали, что проводимость пленки PEDOT: PSS можно улучшить обработкой некоторыми солями, карбоновыми или неорганическими кислотами [14,15].

Таким образом, можно сделать вывод, что каждый способ связан с различными факторами, которые можно применять, исходя из необходимой целесообразности повышения качества полученных органических пленок, так как содержание и расположение компонентов PEDOT и PSS в структуре тонкой пленки PEDOT: PSS изменяют ее фотоэлектрические и оптические свойства и, следовательно, производительность устройства. Поэтому можно ожидать получение различных характеристик пленки при использовании разных способов изготовления фотовольтаического устройства [16, 17].

Резюмируя вышесказанное, основная идея данной работы состояла в проведении исследования, которое позволило бы повысить проводимость пленок PEDOT: PSS при применении модификации самой дисперсии PEDOT: PSS путем ультрадиспергации ее при использовании ультразвука с одновременной последующей обработкой термостойкой пленки PEDOT: PSS разными соразвителями при повышенной температуре.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Стеклоподложки размером 25x25 мм со слоем ИТО толщиной 150 нм обрабатывали последовательно в ультразвуковой ванне раствором ПАВ в течение 20 минут при 70°C, изопропанолом при 65 °C такое же время и ацетоном при температуре окружающей среды в течение 10 мин. Между этапами обработки различными растворами применялась промывка деионизованной водой длительностью 15 мин. Далее осуществлялась сушка при 130°C в сушильном шкафу, после чего следовала ультрафиолетовая обработка в атмосфере сжатого азота в течение 30 мин.

Дисперсию PEDOT: PSS, как модифицированную УЗ, так и не обработанную наносили центрифугированием при 2500 об/мин. Сушка нанесенного слоя PEDOT: PSS после модификации осуществлялась в термочехле при различных температурах и времени, зависящих от текущей цели эксперимента.

Смесь РЗНТ:PCBM (концентрация 20 мг·мл⁻¹, массовое соотношение 1:1) готовили в перчаточном боксе в атмосфере азота с использованием хлорбензола в качестве растворителя. Данную смесь наносили центрифугированием в течение 2 минут при 1000 об/мин с последующей термообработкой в течение 20 минут при 140 °C. Алюминиевый электрод толщиной 150 нм напылялся в камере термического испарения на пленку РЗНТ: PCBM.

Для изучения морфологии, толщины и шероховатости дырочного транспортного слоя, нанесенного по описанному выше технологическому режиму, использовался метод неразрушающей атомно-силовой микроскопии (АСМ).

Измерение ВАХ фотоэлемента выполняли его экспозицией при неизменяющемся освещении и стандартной температуре на приборе Keithley 237. В качестве источника света использовали имитатор солнечного освещения. При оценках КПД исходили из стандартной интенсивности солнечного излучения $P_0 = 1000 \text{ Вт/м}^2$ (условия AM 1,5G).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ряде работ имелись сообщения [5,6] о значительном повышении проводимости пленок PEDOT: PSS в результате обработки их смесями воды и органических растворителей. Поэтому представлял интерес совместить два способа модификации в целях улучшения транспорта и инжекции электронов и дырок. Для осуществления этого на первом этапе было предложено применить ультразвуковую диспергацию для самой дисперсии PEDOT: PSS.

Предыдущими исследователями [9,17,18] было установлено, что водная дисперсия PEDOT: PSS имеет мицеллярную структуру: проводящий гидрофобный PEDOT склонен оставаться в виде зерен, кластеров в сердцевине, тогда как сульфатные группы на цепи непроводящего прозрачного компонента PSS прикрепляются к поверхности зерен, образуя мицеллоподобную структуру (матрицу). Ввиду того, что расположение и содержание каждого компонента в структуре пленки PEDOT: PSS оказывают влияние на многие характеристики фотовольтаического устройства, можно попытаться оказать влияние на их относительное положение применением ультрадиспергацией. На предварительном этапе исследований было выявлено, что наиболее подходящей частотой при применении ультразвука оказалась частота, равная 22 кГц. Обработка дисперсии УЗ проводилась в течение 90 сек. Более высокие частоты оказывали скорее разрушающее действие на макромолекулы PEDOT и PSS, что проявлялось в падении проводимости пленок.

Морфологическая структура пленок PEDOT: PSS представлено на “рис. 1”.

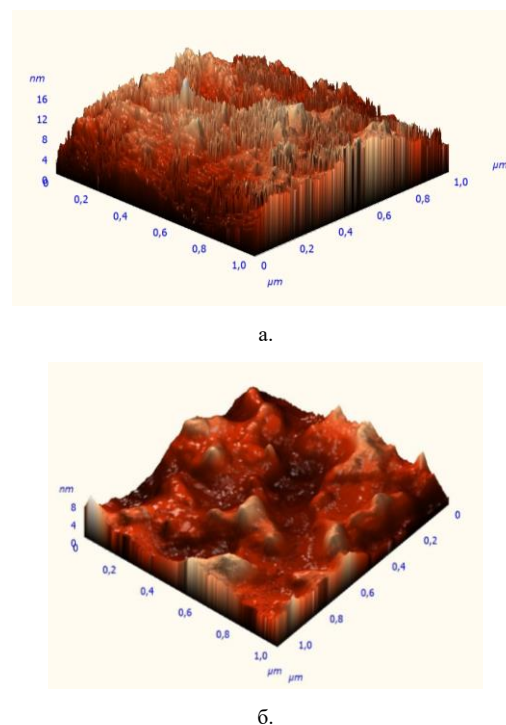


Рис. 1. АСМ изображения тонких пленок PEDOT: PSS, полученных из необработанной УЗ (а) и обработанной (б) его дисперсии (3D)

АСМ-изображение пленки PEDOT: PSS (“рис.1, а”), полученной из необработанной ультразвуком дисперсии,

показывает массив атомов, связанный с молекулярным разделением цепей PEDOT и PSS со средней шероховатостью 12 нм. Электростатическое взаимодействие между положительно PEDOT и отрицательно заряженными PSS высока, и такая морфология структуры может препятствовать транспортировке носителей заряда. Структурные изменения, представленные АСМ-изображением на “рис.1, б”, связаны с конформационными изменениями полимеров в сторону линейной структуры основных цепей макромолекул. Видимо, обработка УЗ приводит к пространственному разделению в доменах PEDOT, уменьшает его электростатическое взаимодействие с массивом полимерного каркаса, состоящего из PSS, который действует как изолирующий барьер для проводимости между цепями PEDOT, и таким образом происходит уменьшение межцепочечного барьера скачкообразной перестройки заряда в сочетании с конформационным изменением PEDOT: PSS. Шероховатость поверхности после обработки дисперсии УЗ уменьшается и лежит в пределах 8-10 нм.

На втором этапе исследования были применены модификация термоотвержденных пленок PEDOT: PSS путем обработки растворами воды и органических растворителей (“табл.1”). Обработку проводили при различных температурах и времени, далее следовала окончательная термообработка пленки PEDOT: PSS до полного высыхания, после чего тестировалась проводимость обработанных пленок. Соотношение 80:20 % растворитель к воде было выбрано на основании исследований [6, 20], и подтверждено нашими предварительными экспериментами.

Таблица 1

Электрическая проводимость пленок PEDOT: PSS

Растворитель	Проводимость, См·см ⁻¹		
	Чистый растворитель	80 % растворитель + 20 % вода, T=20°С	80 % растворитель + 20 % вода, T=120°С
Этанол	1,7	76,7	81,3
Изопропанол	2,1	44,3	50,8
Ацетон	1,4	49,4	55,1
Хлороформ	0,1	29,7	33,2
Тетрагидрофуран	0,3	38,1	44,7

По результатам “табл.1” можно сделать вывод, что на проводимость пленок PEDOT: PSS влияет диэлектрическая проницаемость органических растворителей, используемых для модификации поверхности пленки. Так, растворители, имеющие более высокие диэлектрические постоянные, вызывают больший рост проводимости вследствие появления более сильного эффекта экранирования между противоионами и носителями заряда. Эффект экранирования в свою очередь уменьшает кулоновское взаимодействие между положительно заряженными частицами PEDOT и отрицательно заряженными частицами PSS, что и вызывает фазовое расслоение между цепочками полимеров, а также способствует увеличению проводимости [6, 23].

Время обработки менее влияет на проводимость пленок PEDOT: PSS, проводимость растет в диапазоне времен 1-5 мин, а далее практически не изменяется. Поэтому за оптимальное время модификации поверхности пленок PEDOT: PSS было выбрано время обработки 5 мин.

Как видно из результатов, приведенных в “табл.1”,

проводимость существенно увеличивается после модификации поверхности смесью соразтворителей, причем заметно положительное влияние [21] роста температуры (“рис.2”).

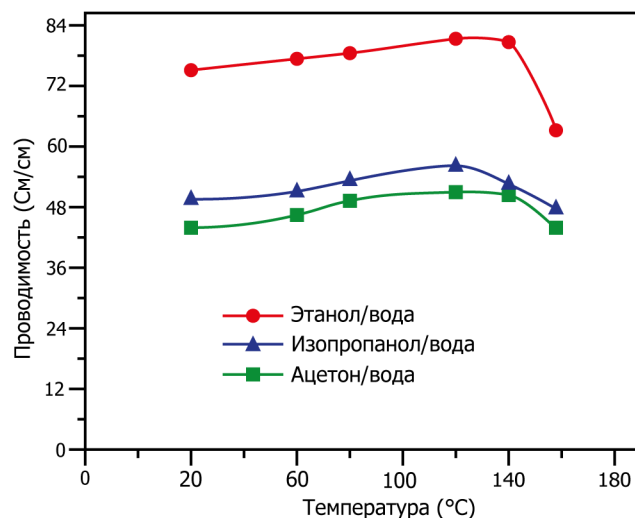


Рис. 2. Зависимость проводимости пленок PEDOT: PSS, обработанных соразтворителями от температуры обработки

Проводимость пленок растет вплоть до 120°C, а далее стабилизируется и начинает уменьшаться с повышением температуры. Таким образом, оптимальная температура обработки в соразтворителях – 120-140 °С. Предположительно, влияние температуры имеет отношение к тепловым свойствам пленки [21,22]: так как полимерные цепи PEDOT: PSS конформационно изменяются для увеличения проводимости, то тепловая энергия способствует данному конформационному изменению. Дальнейшее повышение температуры, приводящее к падению проводимости, обуславливается частичной деградацией полимерных цепей.

На следующем этапе исследований были измерены ВАХ полученных фотоэлементов на основе модифицированных и не обработанных пленок PEDOT: PSS (“рис.3”).

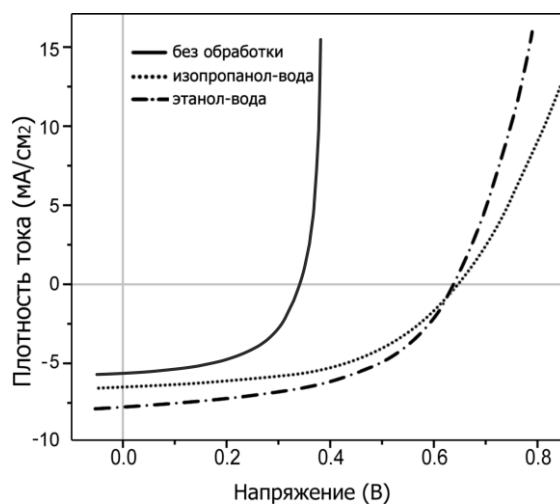


Рис. 3. ВАХ фотоэлемента стекло /ITO/PEDOT: PSS /P3HT: PCBM / Al. Пленки PEDOT: PSS обрабатывали соразтворителями 80% этанола – 20% воды и 80% ацетон – 20% воды

Фотоэлектрические параметры фотоэлементов, полученных на основе модифицированных УЗ и соразворителями пленках PEDOT: PSS приведены в “табл.2”.

Таблица 2

Фотоэлектрические значения органического солнечного элемента стекло / ITO/PEDOT: PSS /P3HT: PCBM / Al

Соразворители	Параметры солнечных элементов			
	$U_{чп}, В$	$J_{кв}, мА/см^2$	КПД, %	FF
Без обработки	0,33	5,11	1,08	0,64
Этанол/вода	0,62	7,61	2,75	0,583
Изопропанол/вода	0,63	6,33	2,3	0,579

Таким образом, проведенная работа показала целесообразность проведения модификации УЗ дисперсии PEDOT: PSS и пленок на их основе соразворителями при повышенной температуре.

Выводы

Электропроводность пленок PEDOT: PSS существенно увеличивается при двухступенчатой модификации: применения ультразвуковой ультрадиспергации дисперсии PEDOT: PSS и последующей обработке соразворителями воды и органического растворителя (этанол, изопропанол, ацетон) при повышенной температуре 120-140°C в течение 5 мин от 0,1 до ~80 См.см⁻¹. Рост проводимости обуславливается фазовым разделением цепей PEDOT и PSS, конформационными изменениями цепочками PEDOT, приводящими к уменьшению его электростатического взаимодействия с частицами PSS, действующими как изолирующий барьер, и как следствие, к уменьшению межцепочечного барьера транспортировки заряда. Обработанные УЗ и соразворителями пленки PEDOT: PSS имеют высокие рабочие фотоэлектрические характеристики и подходят для замены ИТО в качестве прозрачных электродов оптоэлектронных устройств. КПД фотоэлемента после обработки соразворителем и УЗ составил около 3% при освещении AM1,5G.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hoppe H. Polymer solar cells / H. Hoppe, N.S. Sariciftci // *Adv. Polym. Sci.* – 2007. – Vol. 12. – P. 121.
2. Zhao, J.H. High-efficiency PERL and PERT silicon solar cells on FZ and MCZ substrates / J.H. Zhao, A.H. Wang, M.A. Green // *Sol. Energ. Mat. Sol. Cells.* – 2001. – Vol. 65. – P. 429-435.
3. Yuanbao L. 17.1% Efficient single-junction organic solar cells enabled by n-type doping of the bulk-heterojunction / L. Yuanbao, Y.Firdaus, M. I. Nugraha, F. Liu, S. Karuthedath, A.H. Emwas, W. Zhang, A. Seithkan, M. Neophytou, H. Faber, E. Yengel, I. McCulloch, L. Tsetseris, F. Laquai, T.D. Anthopoulos // *Adv. Sci.* – 2020. – Vol. 7. – P. 635-645.
4. Чертопалов С.В. Влияние материала верхнего электрода на вольтамперные характеристики полимерфуллеренных солнечных элементов / С.В. Чертопалов, В.В. Бруевич, А.А. Громченко, Д.Ю. Парашук // Молодые ученые – 2008: тезисы докл. Международной конф. (Москва, 10-13 ноября 2008 г.). – Москва, 2008. – С. 61-64.
5. Groenendaal B.L. PEDOT and its derivatives; past, present, and future / B.L. Groenendaal, F. Jonas, D. Freitag, H. Pielartzik, J.R. Reynolds // *Advanced Materials.* – 2000. – Vol. 12. – P. 481-494.

6. Yijie X. PEDOT:PSS films with significantly enhanced conductivities induced by preferential solvation with cosolvents and their application in polymer photovoltaic cells / X. Yijie, J. Ouyang // *Journal of Materials Chemistry.* – 2011. – Vol. 21. – P. 4927-4936.

7. Cheng I-Chun. Atmospheric-pressure surface-diffusion dielectric-barrier discharge (SDDBD) plasma surface modification of PEDOT:PSS / I-Chun Cheng, Cheng-che Hsu October // *Synthetic Metals.* – 2019. – Vol.256. – P. 114-116.

8. Kirchmeyer S. Scientific importance, properties and growing applications of poly(3,4-ethylenedioxythiophene) / S. Kirchmeyer, K. Reuter // *Journal of Materials Chemistry.* – 2005. – Vol. 15. – P. 2077-2088.

9. Sun K. Review on application of PEDOTs and PEDOT:PSS in energy conversion and storage devices / K. Sun, S. Zhang, P. Li, Y. Xia // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics.* – 2015. – Vol.26. – P. 1-25.

10. Friedel B. Effects of layer thickness and annealing of PEDOT:PSS layers in organic photodetectors / B. Friedel, E. P. Keivanidis, T. J. Brenner, A. Abrusci, C.R. McNeill, R.H. Friend, N.C. Greenham // *Macromolecules.* – 2009. – Vol.42. – P. 6741-6747.

11. Feldman K.E. Functional conducting polymers via thiol-ene chemistry / K.E. Feldman, D.C. Martin // *Biosensors.* – 2012. – Vol. 2. – P. 305-317.

12. Pasha A. Highly sensitive ethylene glycol-doped PEDOT-PSS organic thin films / A. Pasha, S. Khasim, O.A. Al-Hartomy, M. Lakshmi // *The Royal Society of Chemistry.* – 2018. – Vol. 8. – P. 18074-18083.

13. Howells C.T. Enhanced organic solar cells efficiency through additive electronic and electro-optic effects resulting from doping a polymer hole transport layer / C.T. Howells, K. Marbou, H. Kim, K.J. Lee, B. Heinrich, S.J. Kim, A. Nakao // *Funct. Mater.* – 2008. – Vol. 18. – P. 2246-2256.

14. Mengistie D.A. Highly conductive PEDOT:PSS treated with formic acid for ITO-free polymer solar cells / D.A. Mengistie, C.W. Chu, M.A. Ibrahim // *ACS Applied Materials & Interfaces.* – 2014. – Vol. 6. – P. 2292-2299.

15. Sun K. Review on application of PEDOTs and PEDOT:PSS in energy conversion and storage devices / K. Sun, S. Zhang, P. Li, Y. Xia, X. Zhang, D. Du, F.H. Isikgor, J. Ouyang // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics.* – 2015. – Vol. 26. – P. 4438-4462.

16. Eslamian M. Spray-on PEDOT:PSS and P3HT:PCBM thin films for polymer solar cells / M. Eslamian, J.E. Newton // *Coatings.* – 2014. – Vol.4. – P. 85-97.

17. Tait J.G. Spray coated high-conductivity PEDOT:PSS transparent electrodes for stretchable and mechanically robust organic solar cells / J.G. Tait, B.J. Worfolk, S.A. Maloney, T.C. Hauger, A.L. Elias, J.M. Buriak, K.D. Harris // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* – 2013. – Vol. 110. – P. 98-106.

18. McCarthy J.E. Fabrication of highly transparent and conductive PEDOT:PSS thin films for flexible electrode applications / J.E. McCarthy, A.C., Hanley, V.G. Lambertini, Y.K. Gun'ko // *Nanocon.* – 2013. – Vol. 10. – P. 16-18.

19. Schmidt M. Spray coated indium-tin-oxide-free organic photodiodes with PEDOT:PSS anodes / M. Schmidt, A. Falco, M. Loch, P. Lugli // *AIP Advances.* – 2014. – Vol. 10. – P. 1-7.

20. Hsiao Y.S. High-conductivity poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonate) film for use in ito-free pol-

ymer solar cells / Y.S. Hsiao, W.T. Whang, C.P. Chen, Y.C. Chen // J. Mater. Chem. – 2008. – Vol. 18. – P. 5948-5955.

21. Cho S. Heat-treatment-induced enhancement in the optical spectra of poly(3,4-Ethylenedioxythiophene) / poly(stylenesulfonate) films / S. Cho, K. Lee // J. Korean Phys. Soc. – 2005. – Vol. 46. – P. 973-976.

22. Kim Y.H. Highly conductive pedot:pss electrode with optimized solvent and thermal post-treatment for ito-free organic solar cells / Y.H. Kim, C. Sachse, M.L. Machala, C.

May, L. Müller-Meskamp, K. Leo // Advanced Functional Materials. – 2011. – Vol. 21. – P.1076-1081.

23. Zhimeng Y. PEDOT:PSS Films with metallic conductivity through a treatment with common organic solutions of organic salts and their application as a transparent electrode of polymer solar cells / Y. Zhimeng, Y. Xia, D. Du, J. Ouyang // ACS Appl. Mater. Interfaces. – 2016. – Vol. 8. – P. 11629-11638.

Conductivity Enhancement of PEDOT:PSS Films by Dispersant and Solvation of Organic Cosolvents

Loganchuk S.M., Yatsenko A.N., Miroshnichenko L.G.

SRSPU (NPI)

Novocherkassk, Russian Federation

poetrywriter57@gmail.com

Abstract. The results of studies of the structure and current-voltage characteristics of bulk heterojunction solar cells, consisting of PEDOT:PSS and a fullerene-containing polymer are presented. It is shown that the treatment of thermally dried PEDOT:PSS films with cosolvents, as well as the use of dispersant for PEDOT:PSS, reduces the roughness of the film surface, leads to a conformational change in the PEDOT chains, and also contributes to an increase in PCE of the organic solar cell. The study of the morphology and roughness of PEDOT:PSS films by atomic force microscopy revealed the presence of a phase separation of

PEDOT and PSS with the insertion of conductive PEDOT particles into a less conductive PSS matrix. It is revealed that the roughness of the PEDOT:PSS layer has a significant effect on the current-voltage characteristics of solar cells.

Keywords: PEDOT:PSS, organic solar cells, surface treatment, conductivity enhancement.

Утилизация отходов в шлаке котлов тепловых электростанций

Безуглов Р.В., Ефимов Н.Н., Филимонов В.Р.

ЮРГПУ(НПИ) имени М.И. Платова

Новочеркасск, Россия

bezuglov@npi-tu.ru, efimovnn40@mail.ru, vladimir.filimonoff2016@yandex.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается механизм утилизации органических отходов в слое шлакового расплава, поступающего после системы жидкого шлакоудаления котла тепловой электростанции. Для реализации данного схемного решения была разработана тепловая схема системы утилизации отходов. Основным компонентом разработанной схемы является реактор, в котором при высокой температуре находится шлак, и в который также поступают твердые бытовые отходы. Для интенсификации процесса горения и минимизации вероятности критического снижения температуры и затухания реактора в него предусмотрен подвод воздуха и природного газа. Воздух барботирует слой смеси в нижней части реактора, природный газ же будет подаваться с боковой части реактора. Данное решение позволит постепенно решать проблему накопления твердых бытовых отходов, а также поддерживать высокую температуру шлака и производить отвод дополнительной теплоты для полезного использования в котле в районе конвективных поверхностей нагрева.

Ключевые слова: утилизация отходов, тепловая электростанция, твердые бытовые отходы, жидкий шлак, паровой котел, реактор, тепловая схема.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в нашей стране существует серьезная проблема – огромные площади заняты отходами, причем законных (официальных) мусорных полигонов меньше, чем неофициальных [1].

Сейчас делаются серьезные шаги навстречу снижению потоков такого количества отходов, в частности бытовое разделение отходов, выделение из отходов ценных компонентов [2], организация сбора вторичного сырья [3] и другие мероприятия [4-9], что наряду с применением энергоэффективного оборудования и полезной утилизацией теплоты способствует снижению нагрузки на окружающую среду [10-12].

Также набирает обороты реформа обращения с отходами (мусорная реформа), постепенно двигаясь в сторону реальной помощи экологии, переработки отходов и выработки у населения навыков сортировки отходов на уровне бытовой привычки.

Однако, объем накопленных отходов настолько громаден, что для его ликвидации необходим комплексный подход, включающий как минимизацию поступления новых объемов, так и уничтожение и полезное использование существующих объемов отходов. Причем полезное использование может быть как в виде энергии от сожженных отходов, так и в виде строительного материала из переработанных отходов [13].

Статья подготовлена при финансовой поддержке Стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики – СП-1061.2021.1.

СИТУАЦИЯ С ОБРАЩЕНИЕМ С ОТХОДАМИ В НАШЕЙ СТРАНЕ

Одним из основных источников опасности для окружающей среды в России является проблема отходов, которая несёт потенциальную угрозу как для здоровья человека, так и для экологии страны [14]. Южный федеральный округ является наиболее активно «загрязняющим» регионом по России – уже накоплены мусорные полигоны объемом 225 млн. тонн отходов при ежегодном поступлении в 15-20 млн. тонн при том, что только до 5% всех отходов подвергаются переработке. В этой связи актуальна разработка схемы переработки отходов, способная преобразовывать отходы в какой-либо полезный продукт, пригодный для дальнейшего применения в быту или промышленности. Разработка мусоросжигающего комплекса могло бы решить задачу уничтожения отходов, однако при таком варианте исполнения не будет никакой полезной энергии на выходе в любом виде, а мировые энергетические державы уже не возлагают большие надежды на традиционную энергетику [15, 16].

Группа авторов данной статьи уже не первый год занимается малой распределенной энергетикой [11, 12], а также фокусируется на рассмотрении твердых и жидких органических отходов как энергетического ресурса. Очевидно, что существуют как востребованные отходы (например, опилки, макулатура), так и невостребованные (например, сложные пластики, резина). Наша группа видит способы применения разрабатываемых подходов для расширения линейки используемых типов отходов. Так, например, обыкновенное древесное топливо при помощи процессов газификации и гидрогенизации возможно преобразовать в различные газообразные топлива, которые можно использовать, например, на транспорте. Для осуществления подготовки отходов к полному циклу переработки предварительно необходимо производить сортировку отходов.

Для понимания состава «рабочего сырья» в табл. 1 приводится состав отходов по морфологическому признаку.

Таблица 1

Основные типы отходов и их доля в общей массе

Компонент	Доля в общей массе, %
Пищевые отходы	20–50
Бумага, картон	25–40
Стекло	3–10
Пластмасса	2–10

Компонент	Доля в общей массе, %
Текстиль	3–7
Кожа, резина	1–7
Дерево	1–4
Камни	1–3
Кости	0,5–4,0
Металлы	0,2–5,0
Другое	1–5

Как правило, выделяют более десяти основных компонентов отходов, доля которых в общем объеме мусора зависит от страны, региона, климатической зоны, времени года, экономической ситуации, уровня благоустройства жилого фонда и др. (табл. 1) [17].

ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ НА ТЭС

Может возникнуть резонный вопрос: «Зачем же нужно сжигать отходы именно на ТЭС, ведь существует множество технологий переработки отходов, в том числе с получением полезной энергии – это технологии инсинерации, пиролиза, термолиза и другие [18–20]!» Ответ на этот вопрос лежит как в экономической, так и в технологической плоскости. Известно, что строительство мусороперерабатывающих и мусоросжигающих заводов требует многомиллиардных вливаний, а зачем же строить новые предприятия для переработки, если они уже построены? Тут необходимо правильным образом подготовить сырье и скорректировать технологические процессы электростанции для обеспечения надежности ее текущей работы, а также скорректировать работу систем улавливания вредных выбросов для того, чтобы не превышать предельно допустимые выбросы. Другая сторона вопроса – зачем заниматься именно этим направлением, если уже имеются технологии. Однако, ни одна технология не получила массового распространения – встречаются только отдельные вспышки новостей в научном или бизнес-сообществе о создании того или иного мини-завода по различным технологиям.

Также в последнее время улучшается ситуация с сортировкой отходов. Если еще 3–5 лет назад сортировка отходов в нашей стране воспринималась как что-то чуждое и непривычное и осуществлялась сугубо мусороперерабатывающими заводами и центрами сортировки, то сейчас с активным ходом реформы отрасли обращения с твердыми коммунальными отходами в России [21] можно говорить о повсеместном внедрении мероприятий по сортировке отходов.

В ходе выполнения поручений в рамках реформы обращения с отходами в каждом регионе был выбран оператор, отвечающий за вывоз мусора, его переработку и утилизацию. Также в каждом регионе страны был пересмотрен тариф на вывоз мусорных отходов. Немаловажной составляющей реализации реформы является разделение пищевых отходов и прочего мусора. Смешанный мусор, который попадает в контейнеры, как правило, подвергается переработке всего на 5–7 процентов. Если же отделять перерабатываемые отходы от тех, которые возможно переработать, то доля вторичного сырья возрастет до 80% [21]. Была разработана система цветов контейнеров для

разделения на следующие виды отходов: компостируемые (пищевые; канализационные; дерево/целлюлоза; текстиль), некомпостируемые (неопасные (стекло, различные виды пластика, жестяные и алюминиевые банки); опасные (ртутные лампы, градусники, батарейки, аккумуляторы; шины, техника, электроника, краски, растворители, лекарства).

Таким образом, ход реформы обращения с отходами позволяет производить сортировку отходов не только на предприятии, а уже на стадии сбора мусора – непосредственно населением. Мероприятия по разделению отходов будут способствовать упрощению и удешевлению процессов переработки отходов на ТЭС, следовательно, данные технологии будут более привлекательными.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ СИСТЕМЫ ШЛАКОУДАЛЕНИЯ НА ТЭС

В настоящее время на крупных угольных тепловых электрических станциях нашей страны применяются несколько систем золошлакоудаления (ЗШУ) – механическая, гидравлическая, пневматическая и комбинированная [22]. Сухое удаление и складирование золы и шлака на котельных и ТЭС в России применялись с начала развития электроэнергетики, однако широкого распространения сухие золоотвалы не получили ввиду существенных недостатков [23, 24]. Основное распространение в нашей стране получила гидравлическая система ЗШУ – система жидкого шлакоудаления (ЖШУ). Система ЖШУ имеет больше преимуществ над системой твердого шлакоудаления (ТШУ), главным образом заключающихся в экологическом аспекте – в котлах с ЖШУ доля выпавшей золы в топочной камере достигает 30–40%, тогда как система с ТШУ позволяет осаждаться только 10–20% золы. Остальная часть уносится по тракту вместе с золой, ввиду чего необходимо предусматривать более серьезные системы улавливания золы [25]. Системы ЖШУ на ТЭС России также выполняются по схеме совместного удаления золы и шлака [26]. Касательно полезной утилизации шлака в нашей стране, на настоящий момент пока рано говорить о серьезных объемах – по данным [27] доля золы, которую утилизируют составляет около 20%.

Ранее, в начале 90-х годов в России проводились исследования по применению печей (типа Ванюкова) для сжигания твердых бытовых отходов [28, 29]. В данных исследованиях бытовые отходы вручную загружались в работающую печь Ванюкова в которой находился шлак, в барботируемом и в спокойном состояниях. Особенностью процесса являлось осуществление обогащенного кислородом дутья, в следствие чего получался относительно безвредный шлаковый расплав (вызванный пониженным количеством отходящих газов).

Сгорание топлива в топках паровых котлов с ТШУ происходит при температуре до 1400°C, в топках же с ЖШУ – 1500–1800°C, таким образом осуществляется более полное сгорание топлива. В частых случаях системы ЖШУ дополняются пневматической частью, в итоге получаются комбинированные системы – системы пневмогидрозолоудаления, однако всё же самыми распространенными системами шлакоудаления являются системы, типовая схема которых, представлена на рис. 1.

На рис. 2 показана схема реализации утилизации ТБО в печи Ванюкова.

Однако, в данной схеме (рис. 2) были существенные недостатки, не позволяющие смеси иметь экономическое, технологические и экологические преимущества перед другими способами утилизации отходов. Недостатки схемы выражались в сложности запуска печи (запуск производился 7-8 дней), высокие колебания в составе сырья (ТБО), низкий тепловой КПД и другие недостатки. Однако, печь Ванюка нашла свое применение в цветной металлургии при плавки медных концентратов.

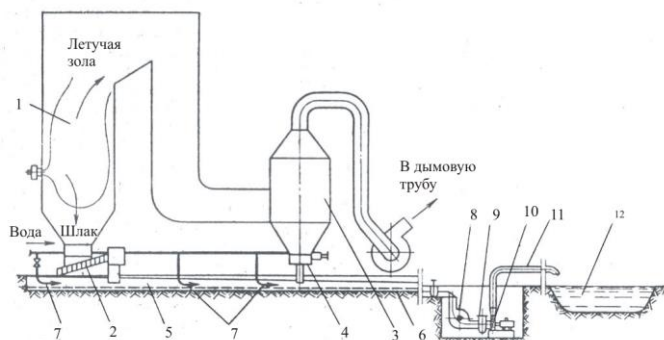


Рис. 1. Схема гидромеханической оборотной системы шлакозолоудаления на пылеугольной ТЭС, где:
1 – топка; 2 – шнек с шлакодробилкой; 3 – золоуловитель;
4 – золосмывной аппарат; 5 – шлаковый канал;
6 – эрозионная защита канала;
7 – побудительные сопла; 8 - шлакодробилка;
9 – железолоуловитель; 10 – багерный насос;
11 – шлакозолопровод; 12 – золоотстойник

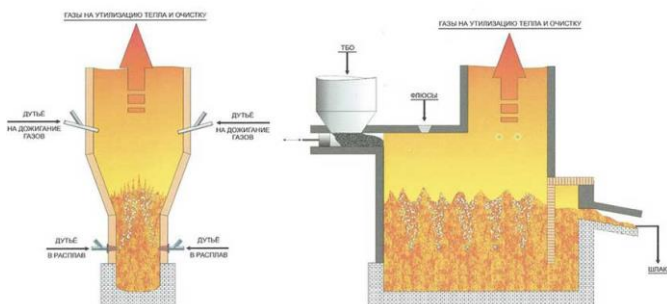


Рис. 2. Схема утилизации ТБО в печи Ванюкова

В настоящий момент появились предпосылки для ликвидации недостатков данной схемы, в частности существенный прорыв в сортировке отходов будет способствовать прогнозируемости состава поступающих отходов. Также несколько модифицированное данное схемное решение может помочь решению проблемы образования на поверхности шлака корки, которая образуется при некоторых режимах работы системы шлакоудаления котлов ТЭС. Например, подобная проблема возникала при работе определенных режимов системы шлакоудаления на Новочеркасской ГРЭС [30].

ПРЕДЛАГАЕМОЕ РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ ШЛАКОУДАЛЕНИЯ НА ТЭС

Для утилизации накопленных твердых бытовых отходов, предварительно отсортированных, разработана схема их переработки в реакторе, получающем теплоту от шлака и греющих газов паровых котлов тепловых электростанций. В данном случае электростанция может дополни-

тельно оснащаться разрабатываемой установкой, которая должна подходить под определенные типы котлов с жидким шлакоудалением.

На рис. 3 представлена схема работы разрабатываемой установки.

Схема работы разрабатываемой установки будет осуществляться следующим образом. Из П-образного котла, в котором сжигается уголь, шлак от сгоревшей угольной пыли сливается в разрабатываемое устройство – реактор. Снизу в реактор подается воздух и барботирует смесь ТБО и шлака. ТБО (предварительно отсортированный) ленточным конвейером подается в верхнюю часть реактора через специальный вход, и далее отходы падают на шлак и загораются от его теплоты близкой к 1800°C. Данная высокая температура поддерживается за счет горения ТБО, но в случае падения температуры и затухания ТБО дополнительно возможен подвод греющих газов из зоны экранов парового котла. Для повышения надежности работы установки и исключения процессов затухания необходимо предусмотреть дополнительный подвод природного газа. Для удаления шлака из реактора в его нижней части предусмотрен отводящий канал. Этот остаток, отводимый парциально, может быть направлен на нужды строительства зданий или дорожных покрытий.

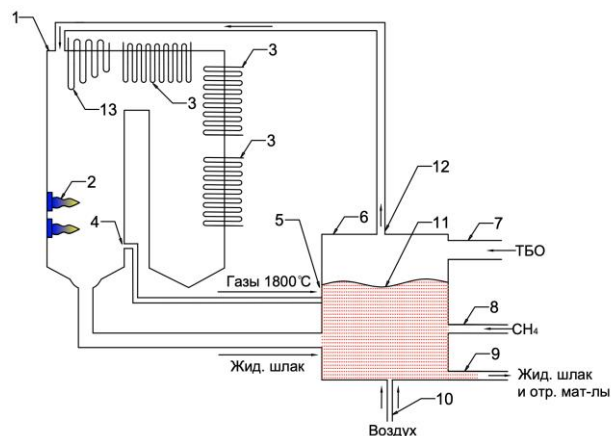


Рис. 3. Схема установки по утилизации ТБО в шлаковом расплаве, где:

- 1 – П-образный паровой котел; 2 – горелочные устройства; 3 – поверхности нагрева котла, 4 – отвод газов из топki в реактор; 5 – подвод жидкого шлака в реактор; 6 – реактор; 7 – подвод ТБО; 8 – подвод природного газа для поддержания температуры; 9 – выход жидкого шлака и отработанных материалов; 10 – подвод воздуха для барботирования смеси; 11 – смесь ТБО и шлака; 12 – отвод теплоты от ТБО на ширмовый пароперегреватель; 13 – ширмовый пароперегреватель

Новизна схемы разрабатываемой установки обуславливается реализуемым в ней комплексом положений, которые представлены ниже.

1. Предлагается сжигать ТБО в шлаковом расплаве.
2. Реактор предлагается использовать совместно с паровыми котлами ТЭС для поддержания жидкого шлака в расплавленном состоянии.
3. Теплота, полученная при сжигании ТБО, разделяется на две части: одна используется для поддержания жидкого состояния шлака. Другая часть полученной от ТБО

теплоты направляется в паровой котел в район ширмовых подогревателей и используется для подогрева рабочего тела в паровом тракте котла.

В итоге появляется возможность избавления от проблем, присущих подобным реакторам в некоторых режимах их работы – когда начинается образование твердой корки, которая постепенно засоряет реактор. Одновременно с этим реализуется экологически чистый способ утилизации ТБО, экологичность которого состоит в том, как именно поддерживается температура в шлаке. Жидкие шлаки, как правило, состоят из различных оксидов (в том числе оксиды алюминия, кремния, кальция), которые способны поглощать в себя кислотные остатки, образующиеся при сгорании ТБО (оксиды серы, азота) образуя достаточные прочные соединения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

В статье описана работа, особенности и преимущества работы установки по утилизации ТБО в шлаковом расплаве. Приведена схема установки с указанием течения основных потоков, участвующих в процессе.

Путем инсталляции данной системы на тепловые электростанции возможно производить утилизацию отходов как с близлежащих, так и с удаленных полигонов отходов, с получением дополнительной теплоты. Эти мероприятия будут способствовать защите окружающей среды как в пассивном (меньшее поступление отходов на полигоны), так и в активном проявлении (меньшее количество потребления традиционного органического топлива для получения теплоты).

ЛИТЕРАТУРА

1. <https://bezotxodov.ru/jekologija/svalki-rossii> (дата обращения 9.02.2020).
2. Щубов Л.Я. Технологии обращения с отходами: преимущества и недостатки, мифы и реалии / Л.Я. Щубов, О.Н. Борисова, И.Г. Доронкина // Твердые бытовые отходы. – 2011. – № 10(64). – С. 10-15.
3. Щубов Л.Я. Проблема муниципальных отходов и рациональные пути ее решения / Л.Я. Щубов // Экология и промышленность России. – 2005. – № 12. – С. 34-39.
4. Щубов Л.Я. Аргументы и факты политики управления отходами / Л.Я. Щубов // Твердые бытовые отходы. – 2009. – № 5(35). – С. 14-21.
5. <https://vtoorthody.ru/utilizatsiya/znaki.html> (дата обращения 9.02.2020).
6. <https://vtoorthody.ru/musor/sortirovka-tbo.html> (дата обращения 9.02.2020).
7. Булычев Э.Ю. Химико-технологические решения проблемы твердых бытовых отходов и их социо-эколого-экономические аспекты / Э.Ю. Булычев, Л.В. Миронов, С.М. Сухорукова // Эколого-экономические проблемы химических технологий. – 2008. – Т. 3, № 2. – С. 24-29.
8. <http://ecamir.ru/Razdelnyiy-sbor-i-pererabotka-otxodov.html> (дата обращения 9.02.2020).
9. <https://ecoportal.info/pererabotka-otxodov/> (дата обращения 9.02.2020).
10. Kaderov K.K. Solution of problems of gasketing of joints of units of machines and equipment of oil and gas enterprises when in use in high- and low-temperature regimes / K.K. Kaderov, M.V. Korchagina, S.O. Kireev, S.L. Nikishenko // Chemical and Petroleum Engineering. – 2018.
11. Efimov N.N. Micro energy complex based on wet-steam turbine / N.N. Efimov, V.V. Papin, R.V. Bezuglov // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 324-329. doi:10.1016/j.proeng.2016.07.022.
12. Dyakonov E.M. An analysis the energy and raw materials structure of household and industrial waste management / E.M. Dyakonov, V.V. Papin, R.V. Bezuglov, V.V. Ivanov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 971. – 052017. doi:10.1088/1757-899X/971/5/052017.
13. Экологические проблемы в России из-за отходов – URL: <http://ecology-of.ru/otkhody/ekologicheskie-problemy-v-rossii-iz-za-otkhodov/>. Дата обращения (11.04.2020).
14. Вторичные энергетические ресурсы – URL: <https://elib.belstu.by/bitstream/123456789/11258/9/lekciya-8.pdf> Дата обращения (12.04.2020).
15. Shaposhnikov V.V. Increasing efficiency of CCP-based TPP with injection of dry saturated steam from recovery boiler into regenerator / V.V. Shaposhnikov, B.V. Biryukov // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – № 891. – 012185. doi:10.1088/1742-6596/891/1/012185.
16. Shaposhnikov V.V. On the efficiency of heat and electric power plants based on combined-cycle plants with over-expansion of the working fluid in the gas turbine and injection of steam into the gas path / V.V. Shaposhnikov, B.V. Biryukov // Chemical and Petroleum Engineering. – 2018. – Vol. 54, is. 1-2. doi:10.1007/s10556-018-0445-8.
17. Думнов А.Д. Проблема твердых коммунальных отходов и статистика / А.Д. Думнов, А.А. Романов // Использование и охрана природных ресурсов в России. – 2016. – № 3 (147). – С. 80-90.
18. Саликов П.Ю. Пиролизная утилизация использованных изделий из полиэтилентерефталата / П.Ю. Саликов // Экология и промышленность России. – 2014. – №3. – С. 16-20.
19. Братута Э.Г. Перспективы использования топочных агрегатов пиролизного типа / Э.Г. Братута, А.Р. Семеней // Энергосбережение. – 2010. – №4. – С. 8-15.
20. <https://bio.ukr.bio.ru/articles/4833/> (дата обращения 9.02.2020).
21. <https://мусорная-реформа.рф/cveta-kontejnerov/> (дата обращения 9.02.2020).
22. Путилов В.Я. Экология энергетики: учеб. пособие для вузов / Под общ. ред. В.Я. Путилова. – М.: Издательство МЭИ, 2003.
23. Мелентьев В.А. Гидрозолоудаление и золоотвалы / В.А. Мелентьев, Е.З. Нагли. – М.: Энергия, 1970.
24. Кузнецов П.М. Удаление шлака и золы на электростанциях / П.М. Кузнецов. – М.: Энергия, 1970.
25. Гавлитин Н.В. Перспективные технологии шлакоудаления ТЭС / Н.В. Гавлитин, В.Я. Путилов, И.В. Путилова // Информационный сборник. Под общей редакцией В.Я. Путилова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
26. Вишня Б.Л. Перспективные технологии удаления, складирования и использования золошлаков ТЭС / Б.Л. Вишня, В.М. Уфимцев, Ф.Л. Капустин. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2006.
27. Putilov V.Y. Modern approach to the problem of utilization of fly ash and bottom ash from power plants in Russia / V.Y. Putilov and I.V. Putilova // Proc. of the Intern. Conf. «World of Coal Ash», April, 11-15, 2005, Lexington, USA,

Kentucky – URL: <http://www.flyash.info/2005/51put.pdf> (дата обращения 9.02.2020).

28. <https://ecoportal.info/pererabotka-otxodov/> (дата обращения 9.02.2020).

29. <https://ztbo.ru/o-tbo/lit/tehnologii-otxodov/szhiganie-v-sloe-shlakovogo-rasplava> (дата обращения 9.02.2020).

30. <https://www.ogk2.ru/rus/branch/novoherkgres/> (дата обращения 9.02.2020).

Waste Disposal in Thermal Power Plant Boiler Slag

Efimov N., Papin V., Bezuglov R.

Platov SRSPU (NPI)

Novocherkassk, Russia

efimovnn40@mail.ru, vladimir_papin@bk.ru, Bezuglov@npi-tu.ru

Abstract. This article discusses the mechanism of disposal of organic waste in the slag melt layer, which is soldered after the liquid slag removal system of the heat power plant boiler. To implement this schematic solution, a thermal diagram of the waste disposal system was developed. The main component of the scheme was a reactor in which slag was located at a high rate and solid household waste was also supplied. Air and natural gas were supplied to the reactor to intensify the combustion process and minimize the likelihood of critical temperature reduction and decay. Air will barge the mixture bed at the bottom of the reac-

tor, while natural gas will be supplied from the side of the reactor. This solution will allow to gradually solve the problem of waste accumulation, as well as maintain a high slag temperature and remove additional heat for useful use in the boiler in the area of convective heating surfaces.

Keywords: waste management, thermal power plant, solid household waste, liquid slag, steam boiler, reactor, thermal scheme.

Моделирование сложных гидроэнергетических систем для исследований и обучения

Сысоев А.А., Лазарева Н.В., Проскурина А.А.
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Москва, Россия
sasha_sysoev@mail.ru

Аннотация. В данной работе представлен программный комплекс, реализующий возможность проведения исследования крупных гидроэнергетических систем со сложными гидравлическими и электрическими связями, планирования долгосрочного режима работы ГЭС с учетом требований водопользователей на примере Воткинской гидроэлектростанции, а также проведение учебных занятий по расчету водно-энергетического режима гидроэлектростанции. Комплекс разработан на высокоуровневом языке программирования Python на основе актуальных требований, указанных в правилах использования водных ресурсов Воткинского водохранилища. Расчет в программном комплексе производится прямым методом. Для улучшения качества расчета, рассматривается один из многочисленных методов – основной и популярный метод роевой оптимизации. Комплекс планируется использовать в курсе лабораторных работ по планированию режима работы ГЭС, и для проверки курсовых работ.

Ключевые слова: гидроэлектростанция, водно-энергетический расчет, учебный комплекс, режим работы, методы оптимизации.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из существенных недостатков в развитии научно-технического потенциала страны является увеличивающийся разрыв между академической и вузовской фундаментальной наукой. Это приводит к распылению средств, разобщенности ученых, снижению качества образования [1].

Многие программные комплексы создаются под решение конкретной задачи, в сфере гидроэнергетики для каждой гидроэлектростанции или каскада станций существует свой программный комплекс, со своими особенностями и со своим учетом требований. Большинство таких комплексов используются в течение уже продолжительного времени и не содержат последних достижений в области разработки программного обеспечения или в сфере оптимизации вычислений, что приводит к большому количеству работ и диссертаций по оптимизации одного конкретного каскада, станции. Это приводит к тому, что страдает качество подготовки студентов в ВУЗах, так как приходится выбирать, чему уделить больше времени, искать методические указания по работе с комплексом, из-за узкой специализации они, как правило, доступны только персоналу станции, поэтому при трудоустройстве в этой области приходится учиться работать с новым программным обеспечением.

С развитием вычислительной техники особо важное значение в техническом образовании приобрело обучение инновационной деятельности и умению работать в коман-

де. К инновационным технологиям обучения относят:

- интерактивные технологии обучения;
- технологии проектного обучения;
- компьютерные технологии.

В интерактивных технологиях претерпевают изменение роли обучающего и обучаемых, также меняется роль информации: информация становится не целью процесса образования, а средством для освоения действий и операций, необходимых для инновационной деятельности [2].

Внедрение компьютерных технологий в учебный процесс, а также насыщение ВУЗов компьютерной техникой, значительно ослабило интерес к техническим средствам других видов. Последние события в мире показали, что процесс обучения может быть полностью построен на базе компьютерных технологий и интернета, но при этом ухудшается качество образования, теряется внимание студентов, падает интерес к дисциплине.

В настоящее время отсутствуют программные комплексы, которые позволяют проводить оптимизацию водно-энергетических режимов в крупных гидроэнергетических системах со сложными гидравлическими и электрическими связями. Проект предполагает разработку программного комплекса, позволяющего оптимизировать водно-энергетические режимы в крупных гидроэнергетических системах со сложными гидравлическими и электрическими связями, учитывающий опыт использования аналогичных комплексов для конкретных каскадов ГЭС и др. гидроэнергетических комплексов. Планируемый программный комплекс может быть использован как для расчёта водно-энергетического режима работы отдельной ГЭС или ГАЭС (каскада станций) при планировании эксплуатационных режимов, так и для проведения расчётов в научно-исследовательских, проектных и учебных и целях [3].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Профессиональный стандарт 20.007 «Работник по планированию режимов гидроэлектростанций/гидроаккумулирующих электростанций» формулирует основную цель вида профессиональной деятельности следующим образом: планирование водно-энергетических, электроэнергетических и гидрологических режимов работы гидроэнергетических объектов, обеспечивающее надежную, бесперебойную и безаварийную работу оборудования и производство электроэнергии [4].

Данная работа посвящена решению некоторых проблем исследования сложных гидроэнергетических систем, а также обучения студентов по проведению расчетов вод-

но-энергетического режима работы ГЭС, включающей в себя следующие знания, умения и навыки:

- Расчет оптимального водно-энергетического режима станции/каскада станций;
- Выполнение водохозяйственных и водно-энергетических расчетов режимов гидроэнергетических установок с водохранилищами разного вида регулирования речного стока;
- Осуществление проверки правильности выполненных расчетов, достоверности итоговых и промежуточных результатов, обеспечение выполнения повторных (проверочных) расчетов при необходимости;
- Проведение расчетов в соответствии с действующими требованиями НТД, предъявляемыми к результатам расчетов;
- Поиск и использование в работе нормативной и технической документации.

Одним из ключевых факторов в процессе обучения является обратная связь от комплекса и понимание обучающегося какие действия он выполняет, и почему он делает именно так. Теоретическую основу обеспечивает преподаватель ВУЗа, а практическую уже комплекс, поэтому важно, чтобы действия, производимые в комплексе, не отличались и не противоречили теоретическим основам [5].

Так как работа предполагает математическое моделирование и сложно гидроэнергетических систем, то она должна подразумевать в себе необходимый функционал, позволяющий проводить исследования произвольных систем со сложными гидрологическими связями, в которых участвуют ГЭС, ГАЭС, насосные станции. Комплекс должен учитывать стохастический характер речного стока и изменчивость гидрометрических характеристик водотоков.

При проведении исследования функционал комплекса должен поддерживать различные современные методы оптимизации водно-энергетического режима, они могут быть основаны на методах искусственного интеллекта, сетевых технологиях, математическом моделировании [6].

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА НА ПРИМЕРЕ ВОТКИНСКОЙ ГЭС

Реализуемый комплекс предназначен для исследования сложных гидроэнергетических систем. Первым шагом к решению проблем, описанных выше является получение решения по существующему гидроузлу, так как основной задаче при проведении исследований является получение средней многолетней выработки, то мы можем в качестве первого этапа рассмотреть получение выработки электроэнергии путём прямого водно-энергетического расчёта для долгосрочного режима работы станции. В качестве существующего гидроузла была взята Воткинская ГЭС. Станция была выбрана из-за полноты технической информации, отсутствия ограничений по расчёту, которые трудно было бы реализовать, наличии большого числа данных по исследованию в части работы гидротурбин и наличию свода правил, которым должен соответствовать её режим работы.

Для планирования долгосрочного режима работы Воткинской ГЭС в качестве основного документа использу-

ются правила использования водных ресурсов водохранилища (далее – Правила, ПИВР) [7]. Ограничения, накладываемый на долгосрочный режим работы гидростанции, которые были учтены в данной работе также описаны в правилах.

С учётом ограничений по ПИВР необходимо определить режим работы гидроэлектростанции на последующий год. Получив режим работы, можно будет сказать сколько электроэнергии вырабатывает гидростанции за год, определить зону работы станции в годовом графике нагрузки, составить график ремонтов и оценить прибыль, которую может получить станция за последующий год.

Как и многие станции, являющиеся действующими энергообъектами, Воткинская ГЭС работает по диспетчерскому графику водохранилища, то есть набору определённых рекомендованных значений, определяющих допустимые значения для конечной отметки водохранилища на конец рассматриваемого периода, так же отметки определяют допустимый средний расход станции за рассматриваемый период.

Реализация индивидуального диспетчерского графика, наличие ограничений для конкретной станции является неотъемлемой частью реализуемого программного комплекса. Так как действующие энергообъекты чаще всего подвергаются исследованию на предмет оптимального использования водных ресурсов как со стороны самой компании, так и со стороны учёных, то наличие базы данных действующих объектов, их ограничений и особенностей работы будет полезным дополнением к инструменту по исследованию сложных гидравлических систем [8].

Работа гидростанции и планирование её режима работы при наличии действующего диспетчерского графика, имеет некоторые особенности. По имеющейся исходной информации, а именно – расходы притока, заданной исходной отметке на начало расчетного периода, определяется зона работы в поле диспетчерского графика и средний расход этой зоны, далее, по алгоритму, представленному в [9], определяется отметка верхнего бьефа на конец расчетного периода.

Полученная отметка верхнего бьефа наносится на диспетчерский график, если конечная отметка не выходит за границы рабочей зоны и не нарушены ограничения, накладываемые другими водопользователями, то данный сбросной расход в нижний бьеф принимается в качестве основного для данного расчетного интервала, полученная отметка верхнего бьефа становится начальной отметкой для следующего расчетного периода.

Если полученная отметка на конец расчетного периода выходит за границы зоны, то необходимо скорректировать сбросной расход, чтобы конечная отметка попала на границу зон диспетчерского графика, для этого в качестве конечной отметки расчетного периода задаётся отметка верхнего бьефа на границе зон диспетчерского графика и по формулам, указанным выше получить сбросной расход в нижний бьеф. При попадании конечной отметки на границу зон диспетчерского графика, средний сбросной расход может быть задан в пределах от минимального расхода нижележащей зоны до максимального расхода вышележащей зоны. Пересечение зоны диспетчерского графика в течение расчетного интервала не допускается.

ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ И ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА РАБОТЫ ПРОГРАММЫ

Текущая версия программы имеет реализацию водно-энергетического расчёта Воткинской ГЭС прямым путём, а также возможность проведения оптимизации, полученного ранее режима с помощью одной оптимизационной функции. Программа зарегистрирована в качестве программы для ЭВМ №2019617976 [10] и используется в качестве учебного программного обеспечения на кафедре Гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии «НИУ «МЭИ». Программный комплекс реализован в программной среде PyQt5 на языке программирования Python и подходит для использования в операционной системе Windows. В данной версии программы основное внимание было уделено созданию и анализу данных, получаемых на диспетчерском графике действующего энергообъекта. Основные функции, используемые в программном комплексе:

- «Получение исходных данных» – функция обрабатывает значения расхода и отметок, данные вносятся вручную для каждого расчётного периода, получение и учёт неопределённости расхода не входит в текущую версию программного комплекса;
- «Создание графической сцены» – функция отвечает за нанесение графических изображений на область построения графика. К графическим изображениям относятся: координатная сетка, диспетчерский график, режим работы ГЭС, зоны диспетчерского графика;
- «Расчёт режима работы» – основная функция программы, отвечающая за обработку входных данных, получение расчётных величин, взаимодействие с функциями по нанесению режима работы ГЭС на графическую сцену и внесению полученных результатов в расчётную таблицу;
- «Соответствие ограничениям» – функция отвечает за вывод в текстовое поле информации о несоответствии накладываемым ограничениям или пересечении диспетчерского графика;
- «Экспорт результатов» – функция отвечает за создание отдельного файла Microsoft Excel и наполнения его результатами проведённого расчёта: расчётные параметры и получаемый режим ГЭС;
- «Учёт ограничений» – функция отвечает за корректировку накладываемых ограничений при проведении расчёта;
- «Оптимизация расчёта» - функция по оптимизации полученного режима методом роевой оптимизации, с публикацией результата в Microsoft Excel.

Внешний вид окна комплекса представлен на рисунке 1.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛУЧЕННОГО РЕЖИМА РАБОТЫ

Режим, полученный в программном комплексе прямым методом, то есть ручным вводом конечной отметки

или среднего расхода, должен быть оптимизирован. Обзор современных методов оптимизации и работ учёных из разных стран [11-15] показал, что самыми популярными методами оптимизации являются:

- Метод динамического программирования;
- Нелинейной оптимизации;
- Роевой оптимизации;
- Различных модификаций метода роевой оптимизации;
- Эвристики метод оптимизации

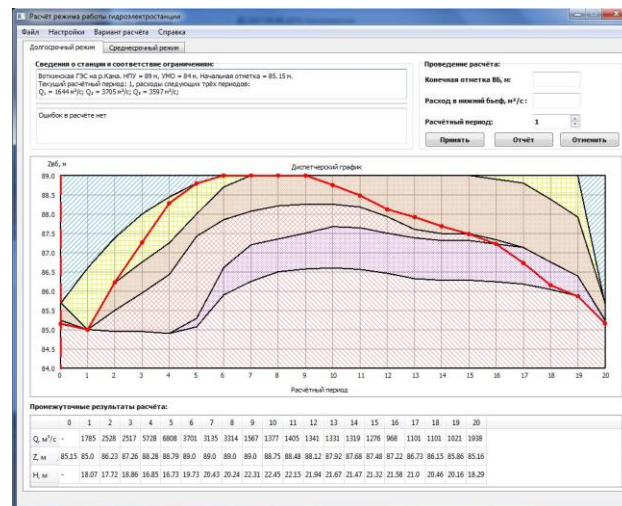


Рис. 1. Внешний вид окна программного комплекса с нанесённым режимом

В данной работе был выбран метод роевой оптимизации, как один из самых популярных методов для оптимизации, управления и обработки информации. При разработке крупных энергетических и других сложных технических систем возникают задачи, связанные с оптимизацией взаимодействия объектов и их функционированием, что приводит к необходимости решать оптимизационные задачи с использованием эффективных математических методов оптимизации и современных средств вычислительной техники. Решение оптимизационных задач проектирования и управления техническими системами необходимо для повышения технических и экономических показателей эффективности систем от отдельных устройств до глобальных систем, например, энергетической системы всей страны [16].

Как правило, основной целью оптимальной работы гидроэнергетической системы является определение уровня гидрогенерации, удовлетворяющего различным ограничениям, включая, например, потребность в энергосистеме, борьбу с наводнениями, водоснабжение, ирригацию, экологию и навигацию. Исследования оптимальной работы гидроэнергетических систем начались в середине XX века (El-Hawary and Christensen 1979) и находились под сильным влиянием оперативной теории и компьютерных наук (Yeh 1985; Simonovic 1992; Wurbs 1993). В последние десятилетия для решения этой проблемы было предложено множество исследовательских и прикладных проектов, таких как линейное программирование (Yoo 2009), нелинейное программирование (Momoh et al. 2012), динамическое программирование (Allen and Bridgeman 1986) и координация крупномасштабной декомпозиции

систем [17].

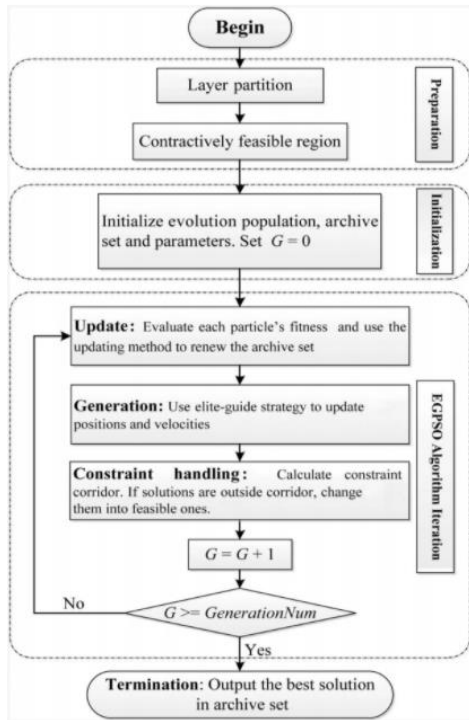


Fig. 3. Flowchart of EGPSO method for optimal operation for OLCHS problem

Рис. 2. Алгоритм в роевом методе оптимизации

С 1990-х годов для оптимальной работы гидроэнергетических систем применяются различные алгоритмы искусственного интеллекта и популяционного анализа, в основном включающие искусственные нейронные сети (Labadie 2004), алгоритмы имитационного отжига (Fu 2008), алгоритм медоносной пчелы (Niknam et al. 2011), генетические алгоритмы (Cinar et al. 2010), дифференциальные эволюционные алгоритмы (Lu et al. 2010) и оптимизацию роя частиц (Zhang et al. 2012; Cheng et al. 2009). Среди них динамическое программирование является наиболее популярным методом оптимизации при решении задач оптимальной работы крупномасштабных каскадных гидроэнергетических систем [18].

PSO (particle swarm optimization), впервые введенная Эберхартом и Кеннеди (1995), является одним из современных естественных алгоритмов. В качестве метода популяционной оптимизации все индивидуумы, называемые частицами, меняют свое положение с помощью информации об окружающей среде. В модели PSO частицы летают в допустимом пространстве для поиска оптимальных решений. Во время полета каждая частица приспосабливает свое положение в соответствии со своим собственным опытом, а также опытом всего роя.

Пусть x и v (формулы 1 и 2) обозначают положение частицы и соответствующую ей скорость полета в n -мерном пространстве поиска. $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ обозначает положение i -й частицы популяции, а $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$ обозначает скорость i -й частицы. Лучшее положение i -й частицы и глобальное лучшее положение среди всех частиц представлены как $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in})$ и $p_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gn})$ соответственно [19].

Эволюционная стратегия i -й частицы заключается в следующем:

$$v_{ij}^{t+1} = \omega \cdot v_{ij}^t + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_{ij}^t - x_{ij}^t) + c_2 \cdot r_2 \cdot (p_{gj}^t - x_{ij}^t) \quad (1)$$

$$x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + v_{ij}^t \quad (2)$$

где ω -весовой коэффициент инерции; c_1 и c_2 - постоянные ускорения; r_1 и r_2 -случайные величины в диапазоне $[0, 1]$; v_{ij} и x_{ij} - скорость и положение i -й частицы на t -й итерации соответственно.

ДЕМОНСТРАЦИЯ РАБОТЫ КОМПЛЕКСА

Для работы с программным комплексом, был взят ряд расходов, соответствующих 90% обеспеченности притока р. Волга для Воткинской ГЭС, гидрограф которой может быть получен из ПИВР.

Водохозяйственный год разбит на 20 расчётных периодов с продолжительностью от 10 до 31 дней, год разбит в соответствии с правилами использования водных ресурсов [7].

В качестве исходной информации для проведения расчёта потребуется:

- Расход приточности для каждого расчётного периода: $Q_{пр}(t), M^3/c$;
- Кривые связи верхнего и нижнего бьефов: $Z_{вб}(V_{вдпр}), M$; $Z_{нб}(Q_{нб}), M$;
- Потери напора на водоподводящих сооружениях: $\Delta h, m$;
- Потери расхода в верхнем бьефе: $\Delta Q, M^3/c$;
- Эксплуатационные характеристики гидроагрегатов;
- Отметка на начало расчёта, определяется заданием на расчёт: $Z_{вб}, M$;
- Диспетчерский график водохранилища;

После проведения расчетов по алгоритму [20], были получены следующие результаты (табл. 1):

Таблица 1

РП	Приток	Сброс в НБ	Zвб ср	Zнб	H	Nгэс	Эгэс
Месяц	m ³ /с	m ³ /с	m	m	m	MВт	млн. кВт.ч
Апр	1372	1465	85,08	66,22	18,86	246	58,93
	2984	1687	85,60	66,55	19,05	287	68,83
Май	3370	2430	86,60	67,65	18,95	415	99,57
	7308	5945	87,60	72,89	14,71	859	206,23
	5845	5049	88,45	71,55	16,90	820	216,39
Июнь	3850	2720	88,85	68,08	20,77	517	124,08
	3359	3084	89,00	68,63	20,37	578	138,80
	3537	2969	89,00	68,46	20,54	560	134,51
Июль	1509	1564	89,00	66,36	22,64	320	238,42
Авг	1166	1339	88,85	66,03	22,82	277	205,80
Сен	1104	1470	88,45	66,22	22,23	296	141,88
Окт	1086	1330	88,00	66,01	21,99	264	196,65
Ноя	1101	1303	87,65	65,98	21,67	255	61,27
	897	1216	87,40	65,84	21,56	237	56,82
	1055	1011	87,25	65,54	21,71	199	47,67
Дек	739	1127	86,71	65,71	21,00	214	158,96
Янв	914	850	86,21	65,30	20,91	161	119,52
Фев	806	851	86,13	65,30	20,83	160	107,68
Март	820	835	85,96	65,28	20,68	156	116,09
Апр	1308	2019	85,43	67,04	18,39	328	78,70

Была проведена оптимизация расчетов роевым методом, результаты представлены в таблице 2:

Таблица 2

РП	Приток	Сброс в НБ	Звб ср	Знб	Н	Нгэс	Эгэс
Месяц	м ³ /с	м ³ /с	м	м	м	МВт	млн. кВт.ч
Апр	1372	1984	85,33	66,99	18,34	321	77,02
	2984	1838	85,6	66,78	18,82	308	73,88
Май	3370	2551	86,6	67,62	18,98	432	103,69
	7308	6973	87,15	71,63	15,52	931	224
	5845	5134	87,65	70,14	17,51	781	206
Июнь	3850	3009	88,35	68,14	20,21	547	131
	3359	2999	88,85	68,13	20,72	561	135
	3537	3537	89	68,7	20,3	646	155
Июль	1509	1509	89	66,31	22,69	310	230,86
Авг	1166	1360	88,75	66,09	22,66	279	207,71
Сен	1104	1302	88,34	66	22,34	263	126,46
Окт	1086	1311	87,87	66,01	21,85	259	192,87
	1101	1302	87,47	66	21,47	253	60,69
Ноя	897	1000	87,34	65,53	21,8	199	47,77
	1055	1100	87,27	65,55	21,6	215	48,24
Дек	739	1031	86,82	65,56	21,32	198	147,62
Янв	914	980	86,29	65,53	20,78	189	140,91
Фев	806	854	86,12	65,28	20,83	160	107,41
Март	820	879	85,96	65,32	20,63	164	121,67
Апр	1308	2117	85,43	67,15	18,28	341	81,86

Из-за множества ограничений, накладываемых на каждый режим работы станции, получить большую разницу между прямым расчётом и оптимизированным не удалось, она составляет лишь 43 млн. кВт.ч

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализованная версия программного комплекса для исследований и расчета сложных гидротехнических систем, в текущей реализованной версии позволяет проводить водно-энергетические режимы работы для одной из гидростанций волжско-камского каскада – Воткинской ГЭС. В своем текущем исполнении, комплекс позволяет проводить водно-энергетический расчёт режима работы станции для одного водохозяйственного года. В настоящее время, данный комплекс используется в качестве инструмента для проведения курсовых работ на кафедре ГВиЭ МЭИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Приказ Минобрнауки России от 21.11.2014 г. № 1500 "Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 13.04.02 электроэнергетика и электротехника (уровень магистратуры)".
2. Фишер Н.В. Инновационные технологии в профессиональном образовании / Н.В. Фишер // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 3: Педагогика и психология. – 2010. – №1 – URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/innovatsionnye-tehnologii-v-professionalnom-obrazovanii> (дата обращения 01.02.2021).
3. Дружинин И.П. Долгосрочный прогноз и информация / И.П. Дружинин. – Новосибирск: Наука, 1987.
4. Приказ Министерства труда и социальной защиты РФ от 19.03.2015 г. № 173н "Профессиональный стандарт "Работник по планированию режимов гидроэлектростанций/гидроаккумулирующих электростанций".
5. Приказ Минобрнауки РФ от 03.09.2015 г. № 955 "Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению

подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника (уровень бакалавриата)".

6. Высокоуровневый язык программирования Python – URL: www.python.org (дата обращения 01.02.2021).

7. Приказ Федерального агентства водных ресурсов от 07.11.2015 № 225 "Об утверждении Правил использования водных ресурсов Камского и Воткинского водохранилищ на р. Кама".

8. Регламент оперативного диспетчерского управления электроэнергетическим режимом объектов управления ЕЭС России с изменениями от 22 июня 2017 года (Протокол №14/2017 заседания Наблюдательного совета Ассоциации «НП Совет рынка»).

9. Александровский А.Ю. Гидроэнергетические установки: учеб. пособие / А.Ю. Александровский, Б.И. Силаев. – М.: Издат-во МЭИ, 2005.

10. Сысоев А.А. Учебный программный комплекс по планированию режима работы гидроэлектростанции // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019617976. 2019.

11. Jiekang W. A hybrid method for optimal scheduling of short-term electric power generation of cascaded hydroelectric plants based on particle swarm optimization and chance-constrained programming / W. Jiekang, Z. Jianquan, C. Guotong, Z. Hongliang // IEEE Transactions on Power Systems. – 2008. – Vol. 23, №. 4. – P. 1570-1579. doi: 10.1109/TPWRS.2008.2004822.

12. Barros M.T.L. Optimization of large-scale hydropower system operations / M.T.L. Barros, Frank, T.-C. Tsai, S.-L. Yang, J.E.G. Lopes, W.W.-G. Yeh // Journal of Water Resources Planning and Management. – 2003. – Vol. 129(3). doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(2003)129:3(178).

13. Catalá J.P.S. Nonlinear optimization method for short-term hydro scheduling considering head-dependency / J.P.S. Catalá, S.J.P.S. Mariano, V.M.F. Mendes, L.A.F.M. Ferreira // European Transactions on Electrical Power. – 2008. – Vol. 20(2). – P. 172-183. doi:10.1002/etep.301.

14. Glotić A. Parallel self-adaptive differential evolution algorithm for solving short-term hydro scheduling problem / A. Glotić, A. Glotić, P. Kitak, J. Pihler, I. Tičar // IEEE Transactions on Power System. – 2014. – Vol. 29, is. 5. – P. 2347-2357.

15. Azizipour M. Optimal operation of hydropower reservoir systems using weed optimization algorithm / M. Azizipour V. Ghalenoei, M.H. Afshar, S.S. Solis // Water Resources Management. – 2016. – Vol. 30(11). doi:10.1007/s11269-016-1407-6.

16. Дюличева Ю.Ю. Алгоритмы роевого интеллекта и их применение для анализа образовательных данных / Ю.Ю. Дюличева // Открытое образование. – 2019. – Т. 23, № 5. – P. 33-43.

17. Niua W. A parallel multi-objective particle swarm optimization for cascade hydropower reservoir operation in southwest China / W.-J. Niua, Z.-K. Feng, C.-T. Cheng, X.-Y. Wu // Applied Soft Computing. – 2018. – Vol. 70. – P. 562-575.

18. He Y. Comparison of different chaotic maps in particle swarm optimization algorithm for long-term cascaded hydroelectric system scheduling / Y.-Y. He, J.-Z. Zhou, X.-Q. Xiang, H. Chen, H. Qin // Chaos, Solitons & Fractals. – 2009. – Vol. 42. – P. 3169-3176.

19. Mahor A. Scheduling of cascaded hydro power system: A new self adaptive inertia weight particle swarm optimization approach / A. Mahor, V. Prasad, S. Rangnekar // ARTCom 2009, International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing. Kottayam, Kerala, India, 27-28 October 2009. doi:10.1109/ARTCom.2009.220.

20. Александровский А.Ю. Разработка методики планирования выработки электрической энергии во втором квартале на гидроэлектростанциях Волжско-Камского каскада / А.Ю. Александровский, Н.Ю. Лобанов // Радиотехника, электротехника и энергетика: тезисы докл. XII международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, т. 3. – М.: Изд-во МЭИ, 2006. – С. 406-407.

Modeling Complex Hydropower Systems for Research and Teaching

Sysoev A.A, Lazareva N.V., Proskurina A.A.
National Research University "MPEI"
Moscow, Russia
sasha_sysoev@mail.ru

Abstract. This work presents a software package that implements the possibility of conducting a study of large hydropower systems with complex hydraulic and electrical connections, planning a long-term operation of a hydroelectric power station, taking into account the requirements of water users on the example of the Votkinsk hydroelectric power station, as well as conducting training sessions on calculating the water-energy regime hydroelectric power plants. The complex is developed in the high-level programming language Python on the basis of the actual requirements specified in the rules for the use of water resources of the Votkinsk reservoir. Calculation in the software package is performed by a direct method. Given that the software package

is suitable for both scientific research and training, this approach will be imprecise. To improve the quality of the calculation, one of the many methods is considered - the main and popular method of swarm optimization. The complex is planned to be used in the course of laboratory work on planning the operation of a hydroelectric power station, and for checking coursework.

Keywords: hydroelectric power plant, water-energy calculation, educational complex, operating mode, optimization methods.

Модель рабочих характеристик частотно-управляемого асинхронного двигателя и ее программная реализация

Шестаков А.В.

ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»
Киров, Российская Федерация
alexvs1975@yandex.ru

Аннотация. Актуальной остается задача разработки и программной реализации математических моделей, которые дают возможность расчета энергетических показателей, рабочих характеристик и иных электромагнитных величин частотно-управляемых асинхронных двигателей, питаемых от ШИМ-инверторов, имеющих сложный гармонический состав выходного напряжения. В предлагаемой статье изложены принципы построения программного обеспечения, реализующего ранее предложенную автором модель рабочих характеристик асинхронного двигателя с частотным управлением, алгоритмы формирования импульсного ШИМ-напряжения, его гармонического анализа, а также результаты работы этого программного обеспечения. При разработке программы, реализующей перечисленные выше алгоритмы, использовалась программная оболочка QB64. Созданная программа для ЭВМ позволяет формировать кривую импульсного напряжения, осуществлять его гармонический состав (с учетом числа фаз) и рассчитывать таблицы рабочих характеристик. В качестве исходных данных используются размеры и обмоточные данные асинхронного двигателя, а также задаваемые параметры напряжения (частота основной гармоники, несущая частота импульсов, вид модуляции). Предлагаемое программное обеспечение обладает высоким быстродействием и может быть использовано при проектной оптимизации частотно-управляемых асинхронных двигателей.

Ключевые слова: частотно-управляемый асинхронный двигатель, широтно-импульсная модуляция, гармонический состав, рабочие характеристики, энергетические показатели.

ВВЕДЕНИЕ

Расчет рабочих характеристик частотно-управляемых асинхронных двигателей (ЧУАД) и оценка их энергетических показателей – важнейший этап оптимального проектирования ЧУАД [1-5]. Поэтому определение добавочных потерь ЧУАД, вызванных импульсным полигармоническим напряжением, вырабатываемым ШИМ-инвертором, до сих пор остается актуальной задачей [6-8].

Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) широко применяется при формировании напряжения в преобразователях частоты, питающих управляемые асинхронные электроприводы. Для питания ЧУАД в настоящее время, как правило, используется «классическая» трехфазная модуляция по фронту/срезу импульса [1,9,10], поскольку схема, реализующая названный способ формирования импульсного напряжения, отличается относительной простотой реализации и сравнительно низким содержанием высших гармоник. Тем не менее, пренебрежение высшими гармоническими, содержащимися в кривой напряже-

ния, вырабатываемой ШИМ-инвертором, недопустимо, поскольку эти гармоники вызывают увеличение магнитных потерь в стали и электрических потерь в обмотках ЧУАД, приводят к понижению энергетических показателей.

Существует ряд методов [11-20], позволяющих учесть влияние высших гармоник импульсного питающего напряжения на электрические и магнитные потери ЧУАД. Однако, многие из перечисленных методик основаны на полевых расчетах и нередко требуют значительных вычислительных ресурсов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью наших исследований являлось создание программы для ЭВМ, обладающей минимальными затратами вычислительных ресурсов и реализующей алгоритмы формирования и гармонического анализа импульсного напряжения и ранее предложенную автором математическую модель рабочих характеристик ЧУАД, учитывающую влияние высших гармоник импульсного питающего напряжения ШИМ на электрические и магнитные потери ЧУАД [21-23].

МОДЕЛЬ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ИМПУЛЬСНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ШИМ-ИНВЕРТОРА

Сущность названной модели подробно изложена в [21-23]. В ее основу положена Г-образная схема замещения ЧУАД для каждой из гармоник, на которые раскладывается кривая приложенного к фазе импульсного напряжения. Увеличение магнитных потерь в стали от гистерезиса оценивается пропорционально пиковому значению импульсного напряжения. Влияние ШИМ-напряжения на магнитные потери от вихревых токов устанавливается с помощью коэффициента, зависящего от действующих значений основной и высших гармоник ЭДС и напряжений, а также коэффициента, учитывающего увеличение электрического сопротивления стали вследствие поверхностного эффекта. Аналогичным способом предложено учитывать магнитные потери в роторе, которые обусловлены только влиянием высших гармоник.

Увеличение активного и снижение индуктивного сопротивления короткозамкнутого ротора от влияния токов высших гармоник предложено оценивать по известной методике «Интерэлектро» [24].

Результирующие значения потребляемого тока I_1 , коэффициента мощности λ , полезной P_2 и потребляемой

P_1 мощности ЧУАД рассчитываются с учетом суммарного влияния токов и напряжений основной и высших гармоник.

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ МАССИВОВ ИМПУЛЬСНОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ДЕЙСТВУЮЩИХ ЗНАЧЕНИЙ ГАРМОНИК

При моделировании импульсного напряжения в соответствии с принципом «классической» трехфазной модуляции необходимо задаться действующим значением номинального фазного напряжения $U_{\Phi,ном}$, номинальной частотой первой гармоники напряжения $f_{1Н}$, фактической частотой первой гармоники напряжения f_1 , несущей частотой импульсов $f_{И}$. Моделирование ведется с временным шагом h , значение которого равно:

$$h = \frac{1}{N_{SP} \cdot f_1}, \quad (1)$$

где N_{SP} – число шагов на период первой гармоники исследуемого напряжения,

$$N_{SP} = \frac{f_{И}}{f_1} \cdot N_{СПИ}, \quad (2)$$

$N_{СПИ}$ – число шагов на период импульса. Последняя величина также должна быть задана в качестве исходных данных (при приемлемой точности расчетов $N_{СПИ}$ составляет от 30 до 100).

Опорное линейно изменяющееся напряжение при модуляции по фронту/срезу импульса при регулировании частоты напряжения по закону $\frac{U}{f_1} = const$ определяется следующим соотношением:

$$u_{ОП} = \left(\frac{f_{1Н}}{f_1} \right) \cdot \left(1 - \frac{2t}{T_{И}} + 2n_{ПИ} \right), \quad (3)$$

где t – текущее время, изменяющееся с шагом h ; $T_{И} = 1/f_{И}$ – период импульса; $n_{ПИ}$ – номер периода импульса. Значение $n_{ПИ}$ для первого периода импульса принято равным $n_{ПИ} = 0$, а в дальнейшем в каждый следующий период импульса увеличивается на 1 при выполнении условия:

$$\text{int} \left(\frac{t}{T_{И}} \right) - n_{ПИ} > 0, \quad (4)$$

где int – операция взятия целой части от деления $\frac{t}{T_{И}}$.

Формирование потенциалов линейных выводов трехфазной мостовой схемы ШИМ-инвертора осуществляется по следующему закону:

$$\begin{cases} \varphi_{A,ИМП} = u_{Лм}, & \text{если } u_{ОП} > u_{МА}; \\ \varphi_{A,ИМП} = -u_{Лм}, & \text{если } u_{ОП} \leq u_{МА}; \\ \varphi_{B,ИМП} = u_{Лм}, & \text{если } u_{ОП} > u_{МВ}; \\ \varphi_{B,ИМП} = -u_{Лм}, & \text{если } u_{ОП} \leq u_{МВ}; \\ \varphi_{C,ИМП} = u_{Лм}, & \text{если } u_{ОП} > u_{МС}; \\ \varphi_{C,ИМП} = -u_{Лм}, & \text{если } u_{ОП} \leq u_{МС}, \end{cases} \quad (5)$$

где $U_{Лм} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} U_{\Phi,ном} / 2$ – значение постоянного напряжения питания ШИМ-инвертора (без учета пульсаций выпрямителя); $u_{МА}$, $u_{МВ}$, $u_{МС}$ – мгновенные значения модулирующих фазных напряжений. Законы изменения модулирующих напряжений зависят от характера модуляции.

Затем рассчитываются значения импульсных линейных напряжений:

$$\begin{cases} u_{AB,ИМП} = \varphi_{A,ИМП} - \varphi_{B,ИМП}; \\ u_{CA,ИМП} = \varphi_{C,ИМП} - \varphi_{A,ИМП}, \end{cases} \quad (6)$$

и импульсное фазное напряжение при соединении фаз нагрузки в «звезду»,

$$u_A = \left(\frac{u_{AB,ИМП} - u_{CA,ИМП}}{3} \right). \quad (7)$$

Расчет по формулам (3) – (7) выполняется на каждом шаге h в течение одного или нескольких периодов импульсного напряжения (по заданию). Одновременно необходимо формировать массив фазных напряжений $u_{A,i}$ и соответствующих значений номеров шага i .

После этого с помощью ряда Фурье выполняется определение составляющих полученного импульсного напряжения:

- постоянной

$$u_{A0} = \frac{1}{N_{SP}} \sum_{i=1}^{N_{SP}} u_{A,i}, \quad (8)$$

- синусной

$$B_{A,v} = \frac{2}{N_{SP}} \sum_{i=1}^{N_{SP}} u_{A,i} \cdot \sin \left(\frac{2\pi \cdot v \cdot i}{N_{SP}} \right), \quad (9)$$

- косинусной

$$C_{A,v} = \frac{2}{N_{SP}} \sum_{i=1}^{N_{SP}} u_{A,i} \cdot \cos \left(\frac{2\pi \cdot v \cdot i}{N_{SP}} \right), \quad (10)$$

а также начальной фазы соответствующей гармоники,

$$\psi_v = \arctg \left(\frac{C_{A,v}}{B_{A,v}} \right), \quad (11)$$

где v – номер гармоники. Задаваемое количество гармоник может быть любым.

Затем осуществляется расчет действующего значения каждой гармоники импульсного напряжения,

$$U_{A,v} = \frac{\sqrt{B_{A,v}^2 + C_{A,v}^2}}{\sqrt{2}}, \quad (12)$$

и действующего значения импульсного напряжения,

$$U_A = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{SP}} U_{A,v}^2}. \quad (13)$$

После этого создаются массивы коэффициентов, учитывающих направление вращения гармоники $Zn(v)$ и наличие данной гармоники в кривой фазного напряжения $Koef(v)$:

- для трехфазной системы

$$Zn(v) = \begin{cases} 1, & \text{если } \text{mod}\left(\frac{v-1}{m_1}\right) = 0 \text{ или } \text{mod}\left(\frac{v}{m_1}\right) = 0; \\ -1, & \text{если } \text{mod}\left(\frac{v+1}{m_1}\right) = 0; \end{cases} \quad (14)$$

$$Koeff(v) = \begin{cases} 1, & \text{если } \text{mod}\left(\frac{v-1}{m_1}\right) = 0 \text{ или } \text{mod}\left(\frac{v+1}{m_1}\right) = 0; \\ 0, & \text{если } \text{mod}\left(\frac{v}{m_1}\right) = 0; \end{cases} \quad (15)$$

- для двухфазной системы

$$Zn(v) = \begin{cases} 1, & \text{если } \text{mod}\left(\frac{3v+1}{2m_1}\right) = 0 \text{ или } \text{mod}\left(\frac{v}{2m_1}\right) = 0; \\ -1, & \text{если } \text{mod}\left(\frac{3v-1}{2m_1}\right) = 0 \text{ или } \text{mod}\left(\frac{v}{m_1}\right) = 0; \end{cases} \quad (16)$$

$$Koeff(v) = \begin{cases} 1, & \text{если } \text{mod}\left(\frac{v}{2m_1}\right) \neq 0; \\ 0, & \text{если } \text{mod}\left(\frac{v}{2m_1}\right) = 0, \end{cases} \quad (17)$$

где m_1 – число фаз; mod – операция взятия дробной части от деления.

АЛГОРИТМ ПРОГРАММЫ, РЕАЛИЗУЮЩЕЙ МОДЕЛЬ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧУАД С УЧЕТОМ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Схема алгоритма, позволяющего сформировать и рассчитать гармонический состав импульсного напряжения при заданных его параметрах (характер модуляции REG – односторонняя или двухсторонняя, частота основной гармоники f_1 , количество учитываемых гармоник NUK, несущая частота импульсов FI, количество расчетных шагов на период NSPI), определить токи и энергетические показатели исследуемого ЧУАД приведена на рис. 1.

Исходными данными для расчета рабочих характеристик асинхронного двигателя являются размеры его активной части, обмоточные данные, активные и индуктивные сопротивления схемы замещения, магнитные, механические и добавочные потери. Все перечисленные величины определяются для синусоидального напряжения по стандартным методикам, например [25].

Затем с помощью (3)–(7), формируется массив мгновенных значений фазного напряжения $UA(I)$ (где I – номер текущего шага) на одном периоде напряжения, а также определяется его гармонический состав по (8)–(13) и коэффициенты (14)–(17), учитывающие направление вращения и наличие соответствующей гармоники в кривой напряжения.

После этого по методике [21-23] осуществляется расчет рабочих характеристик, причем отдельно вычисляется значение токов, скольжения и энергетических показателей при полезной мощности, равной номинальной. Алгоритм подпрограммы расчета рабочих характеристик ЧУАД приведен на рис. 2.

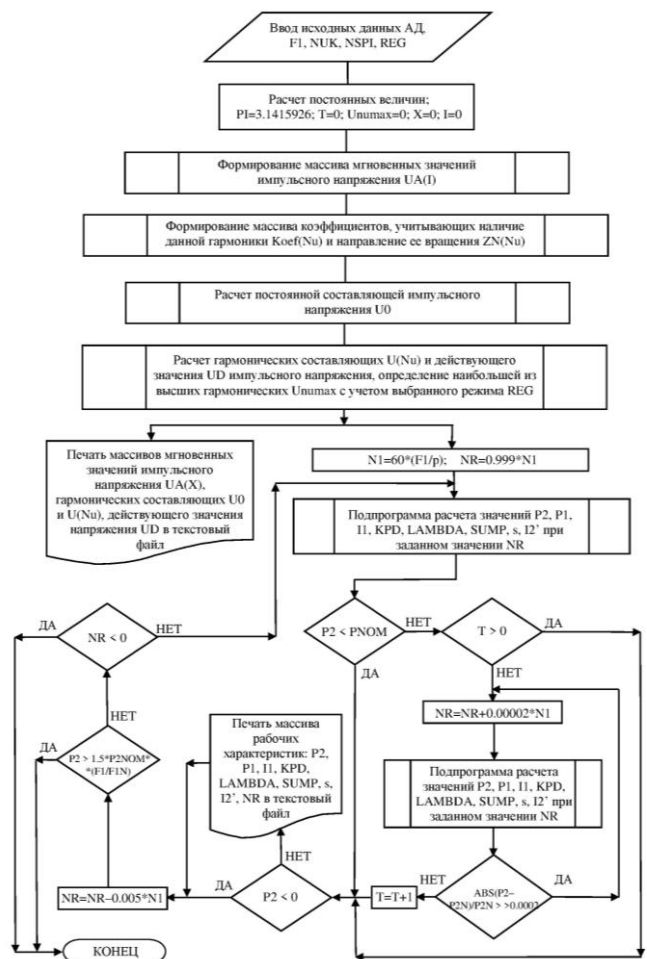


Рис. 1. Схема алгоритма программы FCAMPD

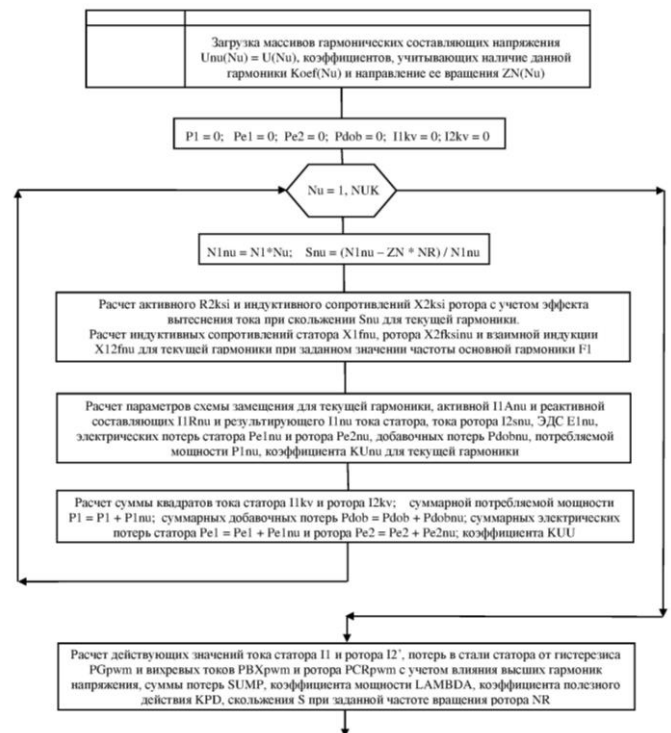


Рис. 2. Схема алгоритма подпрограммы для расчета токов, скольжения и энергетических показателей ЧУАД при заданном значении частоты вращения ротора

По представленным алгоритмам на языке Qbasic написана программа FCAMPD. bas, реализованная в среде QB64. Результаты расчета рабочих характеристик выводятся в отдельный текстовый файл.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

С помощью разработанной программы FCAMPD. bas выполнено моделирование импульсного напряжения, определение его гармонического состава и расчет рабочих характеристик асинхронного двигателя АИР56А2У3 мощностью 180 Вт, номинальным напряжением 220/380 В, синхронной частотой вращения 3000 мин⁻¹. Для этого были рассчитаны размеры, обмоточные данные, параметры схемы замещения, магнитные, механические и добавочные потери при синусоидальном питании по [25]. При расчетах по программе FCAMPD. bas количество высших гармоник NUK задано равным 1000. Пример кривой фазного напряжения при односторонней модуляции, несущей частоте импульсов $f_{И} = 4000$ Гц и частоте основной гармоники $f_1 = 40$ Гц приведен на рис. 3. Действующие значения основной и высшей гармоник для названного напряжения представлены на рис. 4.

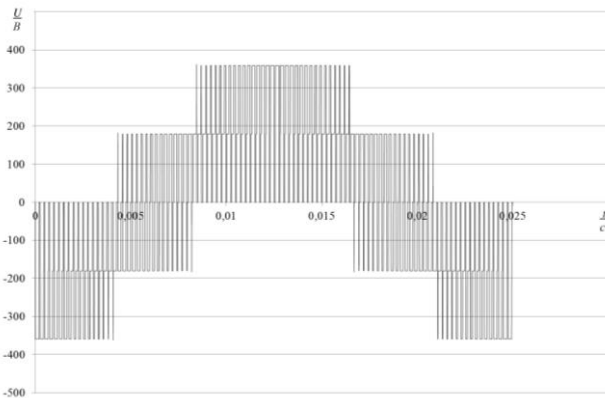


Рис. 3. Кривая фазного импульсного напряжения, полученная с помощью программы FCAMPD при частоте основной гармоники $f_1 = 40$ Гц и несущей частоте импульсов $f_{И} = 4000$ Гц

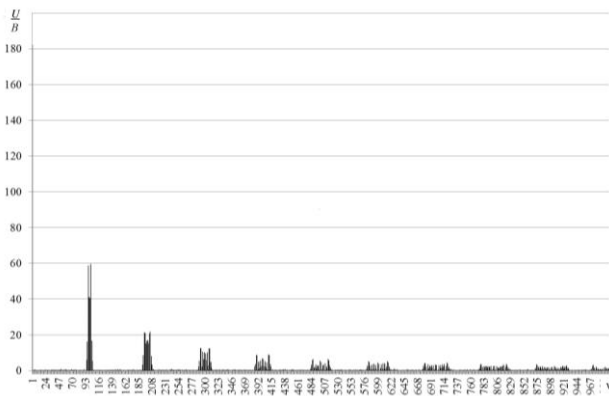


Рис. 4. Гармонический состав фазного импульсного напряжения при частоте основной гармоники при частоте основной гармоники $f_1 = 40$ Гц и несущей частоте импульсов $f_{И} = 4000$ Гц, полученный по программе FCAMPD

Также с помощью программы FCAMPD. bas было выполнено моделирование рабочих характеристик исследуемого двигателя при синусоидальном напряжении, действующие значения которого соответствовали задаваемым частотам основной гармоники f_1 .

В качестве примера на рис. 5 приведены зависимости КПД ЧУАД при синусоидальном и импульсном напряжениях для частоты основной гармоники $f_1 = 40$ Гц и несущей частоте импульсов $f_{И} = 4000$ Гц. Расчетные значения КПД близки к данным, полученным экспериментальным путем [23].

При использовании программной оболочки QB64 работа программы FCAMPD. bas и формирование текстовых файлов с результатами происходит в течение 1-2 секунд.

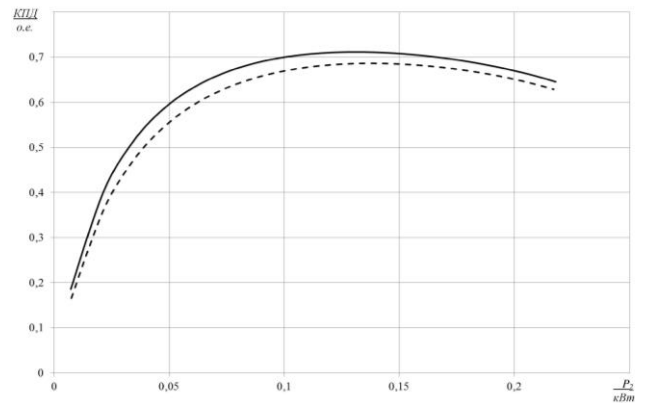


Рис. 5. Характеристики КПД асинхронного двигателя мощностью 180 Вт при синусоидальном (сплошная кривая) и импульсном (штриховая кривая) напряжениях для частоты основной гармоники при частоте основной гармоники $f_1 = 40$ Гц и несущей частоте импульсов $f_{И} = 4000$ Гц, полученные по программе FCAMPD

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная программа для ЭВМ FCAMPD, реализующая модель рабочих характеристик ЧУАД с учетом высших гармоник напряжения ШИМ, обладает высоким быстродействием и позволяет получить подробную информацию об энергетических показателях ЧУАД при любых заданных параметрах питающего напряжения. Данная программа может быть использована для оптимизационных расчетов ЧУАД, в том числе, с применением методов планирования эксперимента.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает благодарность студентам-выпускникам ВятГУ программ «Электромеханика» 2020 года: Ф.В. Малюшину (магистратура) и Е.А. Губиной (бакалавриат) за активное участие в отладке программы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шрейнер Р.Т. Энергосберегающий промышленный регулируемый электропривод нового поколения / Р.Т. Шрейнер, В.К. Кривовяз, А.И. Калыгин, С.И. Шилин // Электротехника. – 2007. – №11. – С. 52-57.

2. Филюшов Ю.П. Энергоэффективное управление асинхронной машиной / Ю.П. Филюшов // *Электротехника*. – 2014. – №6. – С. 57-64.
3. Беспалов В.Я. Разработка и освоение производства энергоэффективных асинхронных двигателей массовых серий / В.Я. Беспалов, А.С. Кобелев, О.В. Кругликов, Л.Н. Макаров // *Электротехника*. – 2015. – №4. – С. 34-40.
4. Малафеев С.И. Новая серия асинхронных частотно-регулируемых двигателей / С.И. Малафеев, А.В. Захаров, Ю.А. Сафроненков // *Электротехника*. – 2019. – №4. – С. 7-12.
5. Кобелев А.С. Применение кластерного анализа в многопоточном проектировании активных частей асинхронных электродвигателей / А.С. Кобелев // *Электротехника*. – 2015. – №3. – С. 8-15.
6. Макаров Л.Н. Особенности работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в системе частотного регулирования / Л.Н. Макаров, С.В. Ястреба // *Электротехника*. – 2007. – №11. – С. 15а-18.
7. Gmyrek Z. Iron loss prediction with PWM supply using low- and high-frequency measurements: Analysis and results comparison / Z. Gmyrek, A. Boglietti, A. Cavagnino // *IEEE Transaction on Industrial Electronics*. – 2008. – Vol. 55, is. 4. – P. 1722-1728.
8. Захаров А.В. Алгоритмы расчета скоростных характеристик регулируемых асинхронных двигателей и возможности их использования в задачах энергетического анализа / А.В. Захаров // *Электротехника*. – 2015. – №3. – С. 28-34.
9. Дыбко М.А. Гармонический анализ выходного напряжения параллельных многоуровневых преобразователей с фиксирующими диодами при различных способах ШИМ / М.А. Дыбко, С.В. Брованов, О.В. Нос // *Электротехника*. – 2015. – №8. – С. 6а-11.
10. Kirlin R.L. Shaping the noise spectrum in power electronic converters / R.L. Kirlin, C. Lascu, A.M. Trzynadlowski // *IEEE Transaction on Industrial Electronics*. – 2011. – Vol. 58, is. 7. – P. 2780-2788.
11. Осипов В.С. Исследование параметров схемы замещения и расчёт механических характеристик асинхронных двигателей серии АИР с учётом поверхностного эффекта в обмотке ротора / В.С. Осипов // *Электротехника*. – 2020. – №2. – С. 50-58.
12. Казаков Ю.Б. Анализ электромеханических процессов в асинхронных машинах при испытаниях методом взаимной нагрузки с рекуперацией энергии в сеть / Ю.Б. Казаков, И.А. Палилов, И.В. Гуляев // *Электротехника*. – 2020. – №1. – С. 2-8.
13. Ершов М.С. Модель динамических режимов асинхронного привода с учетом насыщения стали двигателя и параметров источника питания / М.С. Ершов, Р.Н. Конкин // *Электротехника*. – 2019. – №6. – С. 20-28.
14. Зайцев А.А. Определение энергетических показателей электроподвижного состава переменного тока с мощностью компьютерного моделирования / А.А. Зайцев, И.А. Ролле, М.В. Евстафьева, А.Н. Сычугов, С.А. Теличенко // *Электротехника*. – 2018. – №10. – С. 59-63.
15. Осипов В.С. К определению параметров эквивалентной схемы замещения трехфазных асинхронных электродвигателей / В.С. Осипов // *Электротехника*. – 2017. – № 12. – С. 83-87.
16. Андрианов М.В. Применение метода отдельных потерь при определении КПД асинхронного двигателя, работающего от полигармонического источника напряжения / М.В. Андрианов, Р.В. Родионов // *Электротехника*. – 2007. – №6. – С. 20-24.
17. Kim D.-J. The study of the stray load loss and mechanical loss of three phase induction motor considering experimental results / D.-J. Kim, J.-H. Choi, Y.-D. Chun, D.-H. Koo, P.-W. Han // *Journal of Electrical Engineering and Technology*. – 2013. – Vol. 8. – P. 742-746.
18. Иньков Ю.М. Потери мощности в асинхронных тяговых двигателях перспективного электроподвижного состава / Ю.М. Иньков, Т.Н. Фадейкин, Я.А. Бредихина // *Электротехника*. – 2014. – №8. – С. 44-47.
19. Lane M. Investigation of reductions in motor efficiency and power factor caused by stator faults when operated from an inverter drive under open loop and sensorless vector modes / M. Lane, A. Shaeboub, F. Gu and A.D. Ball // *Systems Science & Control Engineering*. – 2017. – Vol. 5, is. 1. – P. 361-379.
20. Bitoleanu A. Energetical performances analysis of PWM asynchronous motor and voltage inverter driving system / A. Bitoleanu, M. Popescu, M. Linca, A. Mitran // *The 7th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering*, 2011. – P. 1-6.
21. Шестаков А.В. Математическая модель рабочих характеристик асинхронных двигателей с частотным управлением / А.В. Шестаков // *Электротехника*. – 2011. – № 2. – С. 23а-29.
22. Шестаков А.В. Экспериментальное исследование рабочих характеристик асинхронного двигателя при импульсном питании / А.В. Шестаков, В.В. Желнин, Р.Н. Исмиев // *Электротехника*. – 2016. – № 6. – С. 38а-44.
23. Шестаков А.В. Моделирование и экспериментальное исследование рабочих характеристик асинхронного двигателя при различных частотах импульсного напряжения питания / А.В. Шестаков // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2016. – №2(544). – С. 63-72.
24. Радин В.И. Унифицированная серия асинхронных двигателей «Интерэлектро» / В.И. Радин, И. Лондин, В.Д. Розенкоп. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.
25. Копылов И.П. Проектирование электрических машин. – 4-е изд., перераб. и доп. / Под ред. И.П. Копылова. – Москва: Юрайт, 2015. – 766 с.

A Model of Frequency-Controlled Asynchronous Motor Performance Data and its Software Implementation

Shestakov A.V.

FGEI HE «Vyatka State University»

Kirov, Russian Federation

alexvs1975@yandex.ru

Abstract. The problem of developing and software implementation of mathematical models that allows to calculate energy indicators, performance data, and other electromagnetic values of frequency-controlled asynchronous motors powered by PWM converters with a complicated harmonic composition of the output voltage, remains relevant. This article describes the principles of building software that implements the previously proposed model of the performance data of an asynchronous motor with frequency control, algorithms for generating pulse PWM voltage, its harmonic analysis, as well as the results of operation of this software. When developing a program that implements the algorithms listed above, the QB64 software shell was used. The created computer program allows to shape a pulse voltage curve, allows to implement its harmonic composition (taking into ac-

count the number of phases), and calculate tables of performance data. As the initial data, the dimensions and winding data of the asynchronous motor, as well as the specified voltage parameters (fundamental frequency, pulse carrier frequency, modulation type) are used. The proposed software has high processing speed and can be used for design optimization of frequency-controlled asynchronous motors.

Keywords: frequency-controlled asynchronous motor, pulse-width modulation, harmonic composition, performance characteristics, energy indicators.

Импульсные преобразователи энергии в системах зажигания, электроснабжения и электрооборудования автомобилей

Сарбаев В.

Московский политехнический университет
Москва, Россия
visarbaev@gmail.com

Гармаш Ю.

Рязанское гвардейское командное училище имени
генерала армии В.Ф. Маргелова
Рязань, Россия
yury.garmasch@yandex.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается вопрос адаптации системы электроснабжения автомобиля к изменяющимся условиям эксплуатации. В настоящее время электрическая система автомобиля построена таким образом, что все потребители подключены параллельно к бортовой сети автомобиля. При таком подключении различные электрические системы транспортного средства оказывают взаимное влияние через общий источник питания, что не способствует высокой помехоустойчивости, и системы электрооборудования оказывают взаимное влияние, что снижает качество и надежность работы электрооборудования в целом. Следовательно, возникает проблема исключения подобного влияния, кроме того, для каждого потребителя необходимо изменять питающее его напряжение в соответствии с установленными закономерностями, - напряжение должно зависеть от режимов работы как потребителя, так и режимов работы двигателя внутреннего сгорания, температуры окружающей среды и значительного количества других параметров. Показано, что проблемы адаптации различных систем электрооборудования автотранспортного средства могут быть частично решены при использовании импульсных управляемых преобразователей энергии, позволяющих изменять напряжение питания каждой из систем электрооборудования (каждого потребителя электрической энергии) индивидуально, по определенному заранее закону. Подобное «раздельное» питание потребителей позволяет не только получить рациональный режим работы каждой системы электрооборудования автомобиля, но и повысить надежность работы электрооборудования в целом поскольку надежность работы современных управляемых преобразователей параметров электрической энергии очень высока, а их коэффициент полезного действия обычно превышает 90%. В работе рассмотрены и приведены результаты экспериментального исследования следующих систем электрооборудования автомобиля: системы зажигания, системы электроснабжения, вскользь затрагиваются другие системы электрооборудования автомобилей.

Ключевые слова: электрооборудование транспортного средства; адаптация, импульс; преобразователь напряжения; широтно-импульсная модуляция; закон изменения питающего напряжения, напряжение бортовой сети.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения уровня эффективности автомобильной техники (АТ), особенно в чрезвычайных ситуациях и неблагоприятных климатических условиях.

Целью работы является экспериментальное подтверждение теоретических исследований в области применения импульсных преобразователей энергии в электрооборудовании автомобилей: для системы зажигания с адаптивным преобразователем энергии, особенно в области низких температур, а также для системы электроснабжения.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Теория предложенного метода опубликована в ряде работ [1-6], в том числе в работах самих авторов. Возможные пути и средства реализации схемы известны из теории управляемых преобразователей параметров электрической энергии [1, 2, 5-9, 10-15], оценено влияние на процесс искрообразования внешних факторов и параметров системы зажигания вторичного напряжения. Известно, что наибольшее влияние на коэффициент запаса прочности оказывают напряжение и сопротивление первичной цепи. Коэффициент запаса прочности также варьируется в широких пределах, что негативно сказывается на работе системы зажигания и двигателя в целом. Значения, характеризующие катушку зажигания и двигатель внутреннего сгорания, постоянны для конкретной системы зажигания, оптимальная зависимость вторичного напряжения от частоты вращения коленчатого вала двигателя определяется законом изменения напряжения питания системы зажигания. Если уравнение для вторичного напряжения подставить в выражение для токового зазора и выразить необходимое входное напряжение системы зажигания U_B , то получим [1, 2, 4, 5]:

$$U_B = \frac{R_{1\Sigma} U_{PR} K_3}{\left[1 - \exp\left(-\frac{R_{1\Sigma} \tau_3 120}{L_1 n z}\right) \right] \varepsilon_1 \frac{W_2}{W_1} \sqrt{\frac{L_1}{C_1 + C_2 \left(\frac{W_2}{W_1}\right)^2} \eta}} \quad (1)$$

где $R_{1\Sigma}$ – суммарное активное сопротивление первичной цепи, Ом;

U_{PR} – напряжение бортовой сети автомобиля, В;

K_3 – коэффициент запаса по вторичному напряжению;

τ_3 – время замкнутого состояния контактов, с;

L_1 – индуктивность первичной цепи зажигания, Гн;

n – частота вращения двигателя, мин-1;

z – количество цилиндров двигателя;

ε_1 – коэффициент, характеризующий характеристики системы зажигания;

W_2/W_1 – отношение числа витков вторичной и первичной обмоток (коэффициент трансформации);

C_1 и C_2 – емкости первичной и вторичной цепей системы зажигания;

η – коэффициент полезного действия катушки зажигания.

Это уравнение лежит в основе модели регулирования напряжения и определяет его рациональное значение для питания системы зажигания с точки зрения постоянства коэффициента запаса по вторичному напряжению. Что касается входящего в уравнение пробивного напряжения искрового промежутка, то его можно взять, например, из диссертации Шеховцова В. И.

Основная идея теоретической части состоит в том, чтобы показать, что возможно построение схем электрооборудования автомобилей с преобразователями энергии - системой зажигания с замкнутым контуром обратной связи, что позволяет регулировать и получать вторичное импульсное напряжение системы зажигания, достаточное для пробоя искрового промежутка свечи зажигания, но не более того; системой электроснабжения, включающей в себя высокоточный регулятор напряжения, стабилизирующий напряжение бортовой сети, что примерно в 2 раза увеличивает срок службы ламп накаливания, на ~20% увеличивает срок службы аккумуляторных батарей.

Работа [16] посвящена применению того же подхода – использованию адаптивных преобразователей энергии в несколько иной области.

ЭКСПЕРИМЕНТ. СИСТЕМА ЗАЖИГАНИЯ

Улучшены эксплуатационные характеристики системы зажигания с использованием разработанных преобразователей параметров электрической энергии - адаптивного повышающего преобразователя режима пуска двигателя внутреннего сгорания и адаптивного преобразователя для поддержания запаса на всех режимах работы двигателя.

Повышающий преобразователь. При превышении уровня выходного напряжения около 10В (для бортового источника питания 12В) преобразователь должен быть отключен во избежание перегрузки системы зажигания автомобиля, для этой цели включен стабилизатор, после пробоя которого система зажигания питается непосредственно от бортовой сети автомобиля. На основе исследований внедрены принципиально новые технические решения по совершенствованию системы зажигания на основе постоянного значения коэффициента запаса по вторичному напряжению. Для получения необходимого коэффициента запаса достаточно измерить пробивное напряжение, сравнить его с вторичным напряжением и поддерживать их соотношение постоянным. Эта задача решается, если ввести в систему датчиков зажигания и вторичных пробивных напряжений схему сравнения датчика напряжения и регулируемого преобразователя напряжения. Такая конструкция позволяет автоматически поддерживать необходимый коэффициент запаса по вторичному напряжению путем регулировки выходного напряжения преобразователя, питающего первичную цепь штатной системы зажигания, что автоматически компенсирует неконтролируемый уход настроек системы зажигания из-за изменения режимов работы двигателя, износа свечей зажигания, временного и температурного дрейфа параметров системы зажигания и других переменных.

Из обработанных статистически (χ^2) экспериментальных данных следует, что вероятность пуска при использовании разработанной системы

зажигания выше, чем при использовании стандартной заряженной на 75% батареи (рис. 1). В случаях с полностью заряженной батареей использование разработанной системы зажигания имеет то преимущество, что исключает перегрузку коммутатора, катушек зажигания, распределителей.

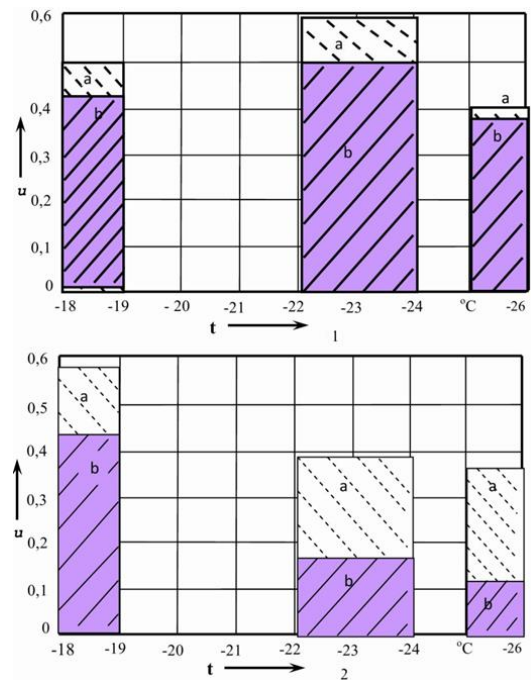


Рис. 1. Гистограммы холодного пуска для экспериментального (а) устройства и (б) штатной системы зажигания при зарядке аккумулятора (1) 100% и (2) 75%

В области рабочих частот двигателя внутреннего сгорания напряжение, определенное из (1) зависит от частоты вращения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания.

Зависимость коэффициента запаса от пробивного напряжения и вторичного напряжения системы зажигания определялись одновременно для двух систем зажигания - обычной и экспериментальной (рис. 2).

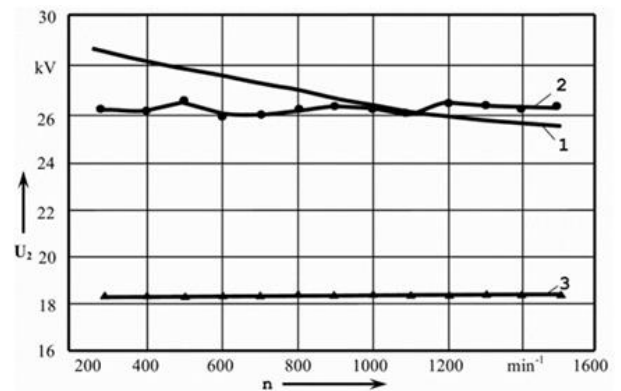


Рис. 2. Зависимости вторичных и пробивных напряжений от частоты вращения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания в области рабочих частот при зазоре между электродами искрового промежутка 7 мм: 1-вторичное напряжение, развиваемое штатной системой зажигания; 2-вторичное напряжение, развиваемое экспериментальной системой зажигания; 3-пробивное напряжение

Напряжение пробоя изменялось путем изменения величины напряжения пробоя искрового промежутка игольчатого трехэлектродного разрядника стэнда проверки систем зажигания СПЗ - 12. При зазоре между электродами 7 мм пробивное напряжение составляет ~18,3 кВ, а вторичное напряжение разработанной системы зажигания, как видно из рис. 3 остается почти постоянным при ~ 26 кВ.

Что касается вторичного напряжения стандартной системы зажигания, то оно изменяется от 28,8 кВ при $n = 300$ мин-1 до 25 кВ при 1600 об / мин (Рис.2). Как и следовало ожидать, он не зависит от пробивного напряжения искрового промежутка разрядника, а зависит от частоты.

Коэффициент запаса снижается с 1,6 до 1,36, так как с увеличением частоты уменьшается время накопления энергии в первичном контуре. Надежность электрооборудования с импульсными преобразователями параметров электрической энергии существенно выше, чем для систем, построенных на стандартной конструкции, что иллюстрируется системой зажигания и подтверждается как расчетами, так и эксплуатационными испытаниями.

Система электроснабжения [Гармаш и др. (2006), Карabanов и др. (2004)]. С точки зрения повышения эксплуатационных характеристик-обеспечения пуска двигателя внутреннего сгорания, он должен быть близок к 100% уровню заряда аккумуляторной батареи. Он также требует условия своей максимальной жизни. Для поддержания максимального заряда батареи необходимо поддерживать с высокой степенью точности напряжение, например, с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и заданного температурного коэффициента напряжения (ТКН) заряжаемой батареи.

Заметим, что в этом случае возникает явное противоречие между значением напряжения системы, необходимым для продления срока службы батареи, и напряжением, оптимальным для питания других потребителей. Выходом из этой ситуации может стать вторичный источник питания-источник, преобразующий напряжение, подаваемое от генератора для зарядки аккумуляторов, в напряжение, оптимальное для питания других потребителей. Недостатком применяемых в настоящее время регуляторов напряжения является использование параметрического стабилизатора в качестве опорного напряжения, что приводит к температурной погрешности регулирования.

ЭКСПЕРИМЕНТ. СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Разработка преобразователя (рис. 3). Измерительное звено 1 представляет собой делитель напряжения бортовой сети - два последовательно соединенных сопротивления. Схема сравнения 3 выполнена на основе дифференциального усилителя с операционным усилителем. Ключ управления представляет собой высокочастотный мультивибратор 5, который активируется от схемы сравнения опорного напряжения и напряжения бортовой сети. Силовой ключ 6 во время импульса мультивибратора 5 открывается и через катушку индуктивности 8 протекает ток. После блокировки ключа 6 ток через катушку 8 продолжает течь в том же направлении и через диод 7 заряжает фильтрующий конденсатор 9, напряжение которого подается на обмотку возбуждения генератора 14. Обмотка возбуждения генератора и конденсатор 9 являются фильтрами нижних частот. Обмотка возбуждения питается почти

постоянным средним током, пропорциональным разности опорного напряжения и напряжения, снятого с измерительного блока.

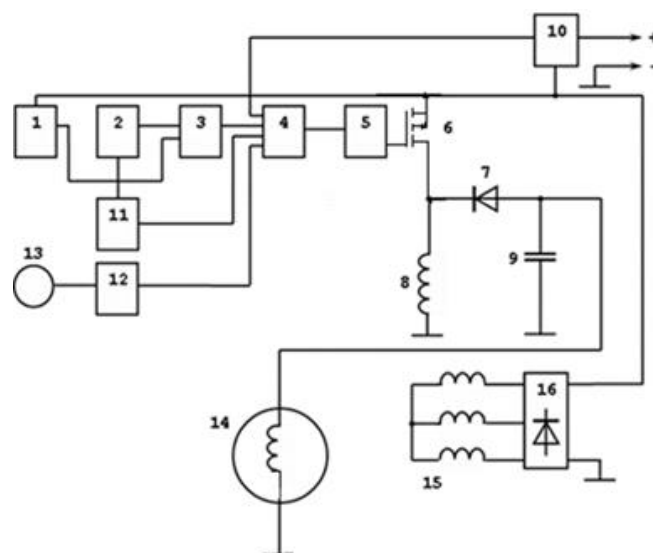


Рис. 3. Высокоточный регулятор напряжения бортовой сети автомобиля

Выводы

Очевидно, что решение проблемы низкотемпературного пуска двигателя внутреннего сгорания возможно при комплексном совершенствовании всех основных электрических систем автомобиля.

Результаты: установлено, что применение разработанной системы зажигания позволяет снизить температуру надежного пуска двигателя внутреннего сгорания на несколько градусов; применение высокоточного регулятора напряжения бортовой сети повышает уровень заряда свинцово-кислотных аккумуляторов, что улучшает надежность пуска, особенно при низких температурах.

Испытания дали следующие результаты:

- увеличение срока службы аккумуляторов за счет увеличения их средней степени заряда с учетом температуры и удобства эксплуатации за счет снижения пусковых токов в 1,2-1,4 раза;

- увеличение срока службы остальных потребителей электрической энергии за счет применения автоматического управления электроприводом и достижения рациональных режимов их работы (для ламп накаливания ~ в 2 раза).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гармаш Ю.В. Система зажигания с регулируемым напряжением питания / Ю.В. Гармаш, Е.И. Титов, А.В. Латахин // Автомобильная промышленность. – 2000. – № 5. – С. 26-27.
2. Сарбаев В.И. Система зажигания с адаптируемым преобразователем / В.И. Сарбаев, Ю.В. Гармаш // Мир транспорта. – 2014. – № 3. – С. 42-45.
3. Гармаш Ю.В. Новый автомобильный регулятор напряжения в бортовой сети АТС / Ю.В. Гармаш, Н.П. Шевченко, Л.Е. Михневич // Автомобильная промышленность. – 2006. – № 9. – С. 16-17.
4. Карabanов С.М., Гармаш Ю.В., Белов А.Б., Ясевич В.И., Голиков А.Н. Импульсный регулятор напряжения //

Патент России №2277748 МПК H02P 9/30, H02J 7/14. 2006. Бюл. № 16.

5. Айзензон А.Е. Регулятор скорости вращения вентилятора отопителя / А.Е. Айзензон, И.И. Пономарева, В.И. Ясевич // Автомобильная промышленность. – 2004. – No. 11. – С. 21-22.

6. Гармаш Ю. Управление электроприводом постоянного тока: монография / Ю. Гармаш, В. Сарбаев. – Germany, Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. – 132 с.

7. Кадацкий А.Ф. Анализ электрических процессов в импульсных преобразователях постоянного напряжения с широтно-импульсным регулированием / А.Ф. Кадацкий, А.П. Русу // Электричество. – 2005. – No. 9. – С. 43-54.

8. Белов Г.А. К синтезу одноконтурных систем управления понижающими импульсными преобразователями / Г.А. Белов, А.В. Серебрянников, А.А. Павлова // Практическая силовая электроника. – 2013. – № 2 (50). – С. 26-33.

9. Астахова Н.В. Формирование управления импульсными преобразователями напряжения на основе уравнения энергетического баланса / Н.В. Астахова, Ю.М. Казанцев // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2010. – Т. 1, № 6. – С. 184-185.

10. Дудкин М.М. Число-импульсные интегрирующие фазосдвигающие устройства для систем управления вентилями преобразователями / М.М. Дудкин, Л.И. Цытович // Электротехника. – 2015. – № 12. – С. 45-49.

11. Лукин А.В. Цифровое управление импульсными преобразователями напряжения / А.В. Лукин, М.Ю. Кастров, В.В. Крючков // Практическая силовая электроника. – 2007. – Т. 2, № 26. – С. 4-8.

12. Пеньков А.А. Подходы к построению алгоритмов цифрового управления импульсными преобразователями на основе энергетического баланса / А.А. Пеньков, Н.Н. Строев, К.Н. Строев // Вестник московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2009. – № 5. – С. 66-73.

13. Дёмкин Д.В. Использование среды «MathCAD» для синтеза регуляторов в системе управления импульсными понижающими преобразователями напряжения / Д.В. Дёмкин, А.О. Козел, Е.А. Годовников // Информационные системы и технологии. – 2006. – № 1-2. – С. 47-51.

14. Колоколов Ю.В., Моновская А.В. Поддержание показателей качества управления импульсными преобразователями на основе прогнозирования нелинейной динамики / Ю.В. Колоколов, А.В. Моновская // Электротехника. – 2012. – № 6. – С. 28-33.

15. Михеенко А.Е. Импульсные DC-DC преобразователи / А.Е. Михеенко // Science Time. – 2017. – № 1 (37). – С. 277-280.

16. Сарбаев В.И. Рекуперативный амортизатор / В.И. Сарбаев, Ю.В. Гармаш, Л.Г. Блинникова // Вестник машиностроения. – 2016. – № 8. – С. 52-54.

The Pulse Energy Converters in the Systems of Ignition, Electrical Supply and Electric Car Accessories

Sarbaev V.

Moscow Polytechnic University
Moscow, Russia
visarbaev@gmail.com

Garmash Yu.

Air Command School named after General of the Army
V.F. Margelov
Ryazan, Russia
yury.garmasch@yandex.ru

Abstract. This article discusses the issue of adapting the car's power supply system to changing operating conditions. Currently, the electrical system of the car is built in such a way that all consumers are connected in parallel to the on-board network of the car. In this connection various electrical system of the vehicle exert a mutual influence through a shared power source that is not conducive to the high noise immunity and electrical system have a mutual influence, which reduces the quality and reliability of electrical equipment in General. Therefore, there is a problem of exclusion of such influence, in addition, for each consumer it is necessary to change the voltage supplying it in accordance with the established laws - the voltage should depend on the operating modes of both the consumer and the operating modes of the internal combustion engine, the ambient temperature and a significant number of other parameters. It is shown that the problems of adaptation of various systems of electrical equipment of a motor vehicle can be partially solved by using pulse controlled energy converters that allow changing the supply voltage of each of

them. systems of electrical equipment (each consumer of electrical energy) individually, according to a pre-determined law. Such a "separate" power supply of consumers allows not only to obtain a rational mode of operation of each system of electrical equipment of the car, but also to increase the reliability of electrical equipment as a whole, since the reliability of modern controlled converters of electric energy parameters is very high, and their efficiency usually exceeds 90%. The paper considers and presents the results of an experimental study of the following systems of electrical equipment of the car: ignition systems, power supply systems, other systems of electrical equipment of cars are casually affected

Keywords: vehicle electrical equipment; adaptation, pulse; voltage converter; pulse-width modulation; law of supply voltage change, on-board network voltage.

Система электронного поджига дуги для электродугового плазматрона

Мещеряков В.Н., Пикалов В.В., Бойков А.И.
Липецкий государственный технический университет
Липецк, Россия
mesherek@stu.lipetsk.ru

Аннотация. При работе с электродуговым плазматроном технологический процесс предусматривает зажигание электрической дуги. Для упрощения и ускорения процесса зажигания электрической дуги в электродуговом плазматроне постоянного тока предложено схмотехническое решение на основе высоковольтной электронной системы зажигания с независимым источником питания. Предложенная схема позволяет формировать высоковольтные высокочастотные импульсы на дуговом интервале. Предлагаемый электрокомплекс обеспечивает надежное зажигание и стабильное поддержание горения во всех возможных режимах работы электродугового плазматрона. Рассмотрены различные системы зажигания, рассмотрены электрические дуги в атмосферной среде, а также с использованием плазмообразующих газов.

Ключевые слова: электрическая дуга, плазматрон, электрический поджиг, стабилизация горения, плазмообразующий газ.

ВВЕДЕНИЕ

Существует множество различных электроплазменных установок. Существующие электродуговые плазменные установки имеют ряд недостатков, таких как: сложность регулирования производительности плазмы, сложность конструкции, сложность процесса поджигания электрической дуги и другие.

Целью данной работы является разработка упрощенной конструкции электродуговой плазменной установки, позволяющей регулировать производительность плазмы на выходе, а также позволяющей осуществлять бесконтактный поджиг электрической дуги.

ТЕХНИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО УСТАНОВКИ

Одной из основных особенностей разработанной конструкции плазматрона является расположение электродов друг против друга, что упрощает поджиг дуги, стабилизацию ее положения, поддержание стабильного горения и возможность вытягивания внешним электромагнитным полем. Оба электрода выполнены из графита, они имеют круглое сечение и одинаковый диаметр 10 мм. Внешний вид установки представлен на рисунке 1.

Исходя из имеющихся в лаборатории ограничений по мощности электроустановок, сила тока в разработанной установке электродугового плазматрона не превышает 50 А, напряжение постоянного тока, подаваемое на электроды при горячей дуге, не превышает 400 В. Питание установки осуществляется от трехфазной промышленной сети не переменного тока (рисунок 2).

Уровень импульсного напряжения, создаваемый для

первичного зажигания дуги составляет 50-60 кВ. Точное измерение уровня напряжения пробоя в выполненных исследованиях не осуществлялось, такие измерения запланированы при проведении дальнейших исследований. При переходе к установившемуся режиму работы электродугового плазматрона увеличивалось расстояние между электродами и напряжение, подаваемое на электроды, с обеспечением заданного тока через дугу.

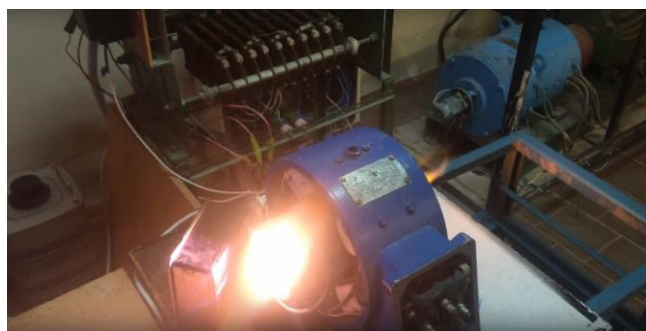


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки

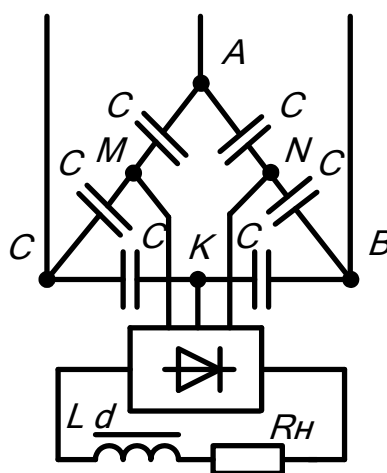


Рис. 2. Схема подключения нагрузки к сети

На начальной стадии экспериментов дуга зажигалась с помощью тонкой медной проволоки, выступающей в роли плавкой вставки, закорачивающей электроды. В процессе работы была создана система электронного поджига дуги при уменьшенном расстоянии между электродами с последующим разведением графитовых электродов. Расстояние, на которое вытягивалась дуга, фиксировалось по максимальному удалению от края камеры и методом фо-

тографирования.

Для измерений использовалась металлическая линейка.

РЕГУЛИРОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПОЛЯ ДУГИ

В качестве источника магнитного поля была принята магнитная система двигателя постоянного тока с полюсами и обмоткой возбуждения. В созданной конструкции плазматрона с помощью внешнего магнита регулируют в основном продольную составляющую магнитного поля дуги.

СИСТЕМА ПОДЖИГА

Разработанная схема электронного поджига дуги, в основе которой лежит качер Бровина, приведена на рисунке 3.

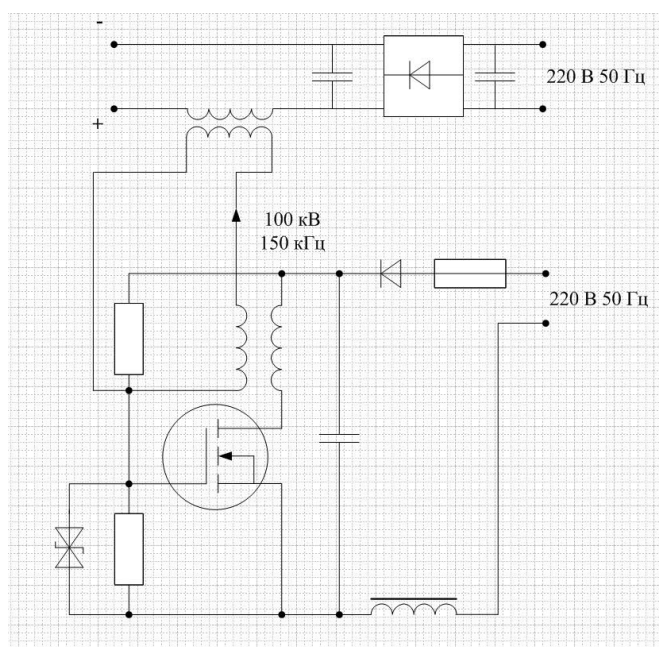


Рис. 3. Схема высоковольтного зажигания дуги

В качестве высоковольтного трансформатора выступает трансформатор «Тесла» без металлического сердечника. Первичная катушка состоит из 8 витков. Вторичная 1100 витков. Ключевой транзистор, в цепи питания первичной обмотки IRFP450 подает прямоугольные импульсы, в соответствии с требуемыми параметрами. При потреблении тока 5 А из сети цепью поджига, расстояние высоковольтного пробоя составляет порядка 30-35 мм. При увеличении тока в цепи поджига, возникает межвитковая пробой в трансформаторе с единичным коэффициентом, включенным в разрыв плюсового провода, питающего дугу. При подаче бутана в момент поджига электрической дуги в камеру сгорания, расстояние пробоя увеличивается до 55 мм, при тех же параметрах схемы. При увеличении емкости вторичной катушки (устанавливая на нее сверху плоские диски, изолированные между собой, расстояние пробоя тоже увеличивается. При значительном увеличении емкости вторичной обмотки трансформатора, происходит пробой транзистора, питающего первичную катушку. Поэтому емкость должна быть оптимально подобрана. В схеме с увеличенной емкостью вторичной обмотки

трансформатора, и при условии подачи газа в камеру сгорания, удается достигнуть пробоя 40-50 мм.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

На рисунке 4 показана зависимость длины электрической дуги, от тока, полученная в ходе проведения эксперимента при атмосферном давлении воздуха, без подачи плазмообразующего газа в рабочую область плазматрона.

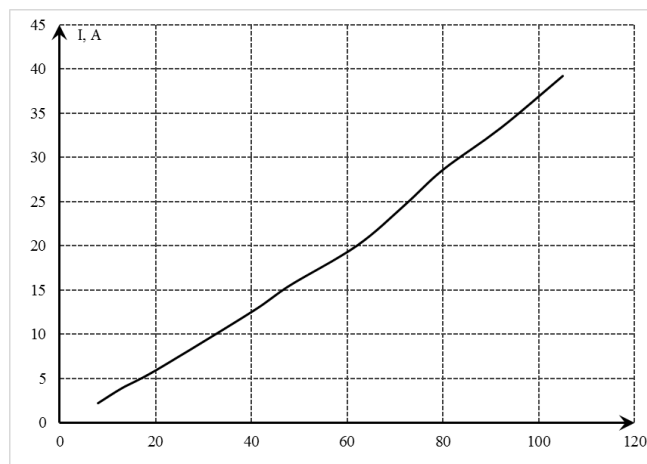


Рис. 4. Зависимость максимального расстояния между электродами для зажигания электрической дуги от тока

Экспериментально установлено, что при увеличении давления проходящего через цилиндрическое рабочее тело плазмообразующего газа и, соответственно его расхода при постоянной величине напряжения на электродах происходит вытягивание дуги, и горение дуги становится неустойчивым. Для устойчивого горения дуги по мере увеличения давления необходимо увеличивать напряжение на электродах. Зависимость между этими переменными близка к линейной. Установлено, что разрыв дуги при увеличении давления носит вероятностный характер, и разброс значений критического значения напряжения при заданном давлении составляет до 15-20 %. При наличии давления и расхода плазмообразующего газа осложняется процесс зажигания дуги.

Большинство экспериментов проводилось при атмосферном давлении.

Точное измерение поперечного диаметра дугового столба при изменении давления и расхода плазмообразующего газа выполнить не удалось. Визуально при вытягивании дуги на 10-100 мм за границу края рабочей камеры плазматрона поперечный диаметр дуги изменялся незначительно. Расщепление дуги на отдельные каналы не выявлено.

Для разработанной конструкции электродугового плазматрона наиболее важным является вытягивание дуги на заданное расстояние и стабилизация ее положения в квазистатическом режиме. Динамические процессы, связанные с движением дуги не рассматривались.

В межэлектродном зазоре при движении плазмообразующего газа дуга испытывает действие газодинамических и электромагнитных сил. Можно выделить осевую и радиальную составляющие магнитного поля электродугового столба. В рассмотрены сложные конструкции электродуговых плазматронов, в том числе и с магнитной стабилизацией дуги. В этих

известных конструкциях плазмобразующий газ движется вдоль дуги. Для горения дуги требуется высокое напряжение. Система стабилизации оказывается сложной, происходят нарушения протягивания дуги в смесительную камеру, и ее замыкание на конфузоре. Разработанная в данном проекте конструкция плазмотрона с соосным расположением электродов друг против друга лишены указанных недостатков.

УСТРОЙСТВО УСТАНОВКИ

Плазмотрон содержит трубчатый корпус, расположенный вертикально, вы-полненный из непроводящего электрический ток тугоплавкого материала. В стенке корпуса перпендикулярно оси корпуса выполнены два отверстия, в которых находятся анодный и катодный электроды. Электроды подключены к выходам блока питания. Напряжение блока питания имеет постоянный знак и регулируется по уровню. Торцевые концы трубчатого корпуса герметично закрыты крышками, выполненными из тугоплавкого материала.

Электродуговой плазматрон характеризуется простотой конструкции, обеспечивает регулирование расхода плазмобразующего газа, температуры и производительности при сжигании материала за счет возможности регулирования потребляемой мощности и стабилизации отклонения дуги. Проведены экспериментальные исследования процессов горения электрической дуги внутри полого цилиндрического корпуса, вытягивания и стабилизации положения дуги с помощью внешнего электромагнитного поля с помощью индуктора.

Для обеспечения работы данной установки необходимо также применение управляющей системы с информационно-измерительными элементами. В информационно-измерительную часть системы должны входить: датчик тока дуги, датчик тока возбуждения электромагнита, расходомер подаваемого плазмобразующего газа, расходомер получаемого синтез-газа. Сигналы от этих датчиков поступают в управляющий процессор. Он вырабатывает управляющие сигналы для регулятора напряжения питания электродов, приводов перемещения электродов, электропривода вентилятора в системе подачи плазмобразующего газа, электропривода системы выведения синтез-газа. Проведенные эксперименты показали, что возможно осуществление зажигания электрической дуги бесконтактным путем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты экспериментов показали, что магнитная система стабилизирует положение вытянутой дуги в заданном положении. Это обеспечивает устойчивое горение дуги при прохождении через нее плазмобразующего газа, что позволяет повысить температуру пламени, сжигающего отходы. Построение управляющей системы с информационно-измерительными элементами позволит регулировать производительность установки и применение ее для утилизации отходов перерабатывающих производств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чередниченко В.С. Современные методы переработки твердых бытовых отходов / В.С. Чередниченко, А.М. Казанов, А.С. Аньшаков и др. – Новосибирск: Изд-во ИТ СО РАН, 2002.

2. Лукашов В.П. Плазмотермическая переработка твердых отходов / В.П. Лукашов, С.П. Ващенко, Г.И. Багрянец, Х.С. Пак // Экология и промышленность России. – 2005. – № 11. – С. 4-9.

3. Чередниченко В.С. Плазменные электро-технологические установки / В.С. Чередниченко, А.С. Аньшаков, М.Г. Кузьмин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005.

4. Рутберг Ф.Г. Плазмохимические методы переработки. Газификация и пиролиз отходов / Ф.Г. Рутберг, А.Н. Братцев, В.Е. Попов. – В кн. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Тематический том XI-5 Прикладная химия плазмы. – М.: Янус-К, 2006. – С. 7-33.

5. Anshakov A.S. The treatment of mixed wastes using the thermal plasma / A.S. Anshakov, V.S. Cherednichenko, E.K. Urbakh et al. // Ed. P. Fauchais, J. Amouroux. Progress in Plasma Processing of Materials. – N.Y.: Begell House, Inc., 1999. – P. 737-743.

6. Мещеряков В.Н. Математическое моделирование электродугового плазмотрона / В.Н. Мещеряков, В.В. Пикалов, А.И. Бойков, А.М. Евсеев, О.В. Данилова // Современные проблемы теплоэнергетики: материалы международной научно-технической конф. – Липецк, 2019. – С. 119-126.

7. Mazzoni L. Plasma gasification of municipal solid waste with variable content of plastic solid waste for enhanced energy recovery / L. Mazzoni, I. Janajreh // 2016 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC). – 2016. – P. 907-912. doi: 10.1109/IRSEC.2016.7984049.

8. Sturm G.S.J. Microwave-driven plasma gasification for biomass waste treatment at miniature scale / G.S.J. Sturm, A.N. Muñoz, P.V. Aravind, G.D. Stefanidis // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2016. – Vol. 44, is. 4. – P. 670-678.

9. Glocker B. Steam operated small plasma torches / B. Glocker, V. Borck, G. Nentwig // 14th Inter. Symp. on Plasma Chemistry (Aug. 2-6 1999). – Prague, 1999. – P. 2037-2042.

10. Piskunkov A.F. High-resource DC arc plasmatron / A.F. Piskunkov, V.A. Ryabyj, V.V. Svitina, K.-Dzh. Li, V.Yu. Plaksin // Applied Physics. – 2009. – Vol. 6. – P. 98-107.

11. Mikhajlov B.I. Electric arc plasma-chemical reactors of separate, combined and separately combined types / B.I. Mikhajlov // Thermophysics and Aeromechanics. – 2010. – Vol. 17, is. 3. – P. 397-410.

12. Жуков М.Ф., Лыткин А.Я., Худяков Г.Н., Аньшаков А.С. Электродуговой нагреватель газа постоянного тока // Авторское свидетельство СССР № 599732. 1982. Бюл. №33.

13. Мчедлов С.Г. Электродуговой плазмотрон // Патент РФ № 2465748. 2012. Бюл. №30.

14. Аньшаков А.С. Переработка техногенных отходов в электродуговой плазме / А.С. Аньшаков, Э.К. Урбах, А.Э. Урбах, В.А. Фалеев // Альтернативная энергетика и экология. – № 9 (65). – 2008. – С. 131-135.

15. Клименко Г.К. Генераторы плазмы / Г.К. Клименко, А.А. Ляпин. – М.: изд. МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2010. – 62 с.

16. Meshcheryakov V.N. Active energy filter for compensation of harmonic distortion in motor soft starter / V.N. Meshcheryakov, A.M. Evseev., A.I. Boikov // 2018 17th

International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED). – 2018. – P. 1-5. doi: 10.1109/ACED.2018.8341701.

17. Pikalov V. Electronic arc ignition system for the electric arc plasmatron / V. Pikalov, A. Boikov, V. Znamensky, S. Ambrosimov // Proceedings - 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2020. – 2020. – P. 929-931.

18. Pikalov V. Electrical automation system for materials recovery with electro-plasma technology / V. Pikalov, V. Meshcheryakov, S. Valtchev, S. Titov // Proceedings - 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2020. – 2020. – P. 914-917.

19. Meshcheryakov V.N. Electric arc plasma installation with control information-measuring system / V.N. Meshcheryakov, V.V. Pikalov, A.M. Evseev, O.V. Danilova, S.K. Ambrosimov // Proceedings - 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019. – 2019. – P. 669-672.

20. Habibullin M. Active power filter with common DC link for compensation of harmonic distortion in power grids / M. Habibullin, V. Pikalov, V. Meshcheryakov, S. Valtchev // 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, PEMC 2014. – 2014. – P. 1345-1349.

Electronic Arc Ignition System for the Electric Arc Plasmatron

Meshcheryakov V., Pikalov V., Boikov A.
Lipetsk State Technical University
Lipetsk, Russia
mesherek@stu.lipetsk.ru

Abstract. When you are working with an electric arc plasmatron, the technological process provides for the ignition of an electric arc. To simplify and accelerate the process of igniting an electric arc in a DC electric arc plasmatron, a circuit solution based on a high-voltage electronic ignition system with an independent power source is proposed. The proposed scheme allows the formation of high-voltage high-frequency pulses on the arc interval. The proposed electrical complex provides reliable ignition and stable Gorenje maintenance in all possible modes of

operation of the electric arc plasmatron. We have considered various systems of ignition, electric arc in an atmospheric environment, as well as with the use of plasma-forming gases are considered.

Keywords: electric arc, plasmatron, electronic ignition, plasma-forming gas, combustion stabilization.

Система автоматической настройки вибрационно-частотного плотномера на основе нечеткой логики

Фархадов З.И., Амирасланов Б.К.
Сумгаитский Государственный Университет
Сумгаит, Азербайджан
amiraslanov-bk@mail.ru

Юсифов С.И.
Азербайджанский Государственный Университет
Нефти и Промышленности
Баку, Азербайджан.
siyusifov@yahoo.com

Аннотация. Представлена система автоматической настройки на резонансную частоту колебаний вибрационно-частотного плотномера жидкости на основе однотрубного резонатора повышенной добротности, учитывающая возможные нелинейности объекта. В данной статье предлагается система и алгоритм настройки на резонансную частоту колебаний вибрационно-частотного плотномера с использованием теории нечетких множеств. Применение методов нечеткого управления позволило получить систему автоматической настройки на резонансную частоту колебаний вибрационно-частотного плотномера без использования громоздких вычислительных процедур, характерных для классических методов управления.

Ключевые слова: вибрационно-частотный плотномер, нечеткое множество, нечеткая логика, автоматическая настройка, фазификация, дефазификация, функция принадлежности, частота колебаний.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для измерения плотности буровых растворов наибольшее распространение получили радиоизотопные и вибрационные измерители плотности (плотномеры). Вибрационные плотномеры благодаря большой точности измерения являются более перспективным по сравнению с радиоизотопными. При этом в виду специфической особенности бурового раствора как объекта измерения плотности – наличие твердых частиц, привело к тому, что среди вибрационных плотномеров для измерения плотности бурового раствора могут быть использованы либо вибрационно-частотные измерители плотности с трубчатыми резонаторами, совершающими крутильные колебания, либо вибрационно-частотные с прямыми трубчатыми резонаторами. Первый тип плотномеров хорошо изучен и серийно выпускается Феодосийским механическим заводом.

Вибрационно-частотные измерители плотности жидкости появились еще в 60-е годы прошлого века [1]. Однако, промышленный выпуск этих плотномеров не был освоен. Проведенный анализ [7,8] показал, что одной из причин этого является неприемлемая для серийного производства необходимость настройки электромагнитной системы возбуждения, основывающейся на человеческом опыте и навыках. В связи с выше сказанным, решение проблемы настройки электромагнитной системы возбуждения резонатора вибрационно-частотного измерителя плотности бурового раствора с использованием достижений современных информационных технологий, а именно

теории нечеткого регулирования представляется актуальным.

Цель статьи: целью работы является оценка возможности применения методов нечеткого управления для автоматической настройки частоты колебаний плотномера.

СТРУКТУРА НЕЧЕТКОЙ НАСТРОЙКИ

На основе накопленной информации и качественных рассуждений по настройке зазора между полюсом возбуждителя и трубки плотномера был осуществлен переход к качественному описанию объекта, основу которой составляет правила вида: «Если значение по частоте колебаний напряжения « очень низкое», а динамика изменения частоты напряжения (производная частоты напряжения) «положительная» тогда управляющим воздействием на возбуждитель «продолжительность очень долгая» и «направление есть вниз» и т.д. [2]. В качестве управляемой величины рассматривается перемещение приемника колебаний.

На рис.1 представлена упрощенная структурная схема системы автоматической настройки частоты колебаний резонатора.

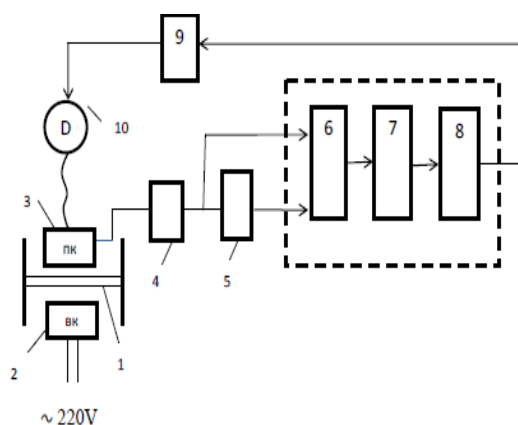


Рис. 1. Структурная схема системы автоматической настройки частоты колебаний резонатора. 1-трубка; 2 - возбуждитель колебаний (ВК); 3 - приемник колебаний (ПК); 4 - аналоговый цифровой преобразователь (АЦП); 5- вычислительный блок направления изменения частоты напряжения; 6-фазификатор; 7- таблица лингвистических правил (ТЛП); 8 - дефазификатор; 9 - блок управления двигателем; 10- двигатель (Д)

На первый вход нечеткого контроллера с приемника колебаний (ПК)-3 поступает частота колебаний напряже-

ния с аналогового цифрового преобразователя-4. На второй вход нечеткого контроллера поступает производная частоты колебаний напряжения df/dt из вычислительного блока -5. Нечеткий контроллер включает в себя: фаззификатор – 6, предназначенный для трансформации четких сигналов в нечеткие множества; таблицы лингвистических правил (ТЛП)-7 т.е. совокупность нечетких правил, описывающие нечеткие отношения между входными и выходными параметрами контроллера; дефаззификатор – 8, где полученное нечеткое значение после дефаззификации в виде четкого управляющего воздействия поступает на вход блока управления двигателем – 9 и на двигатель – 10.

АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НЕЧЕТКОЙ НАСТРОЙКИ

Для системы автоматической настройки частоты колебаний резонатора в качестве нечеткого алгоритма был выбран алгоритм Мамдани [3-6]. Данный алгоритм является наиболее часто применяемым на практике, т.к. очень хорошо себя зарекомендовал в ряде задач управления в режиме реального времени. Построение интеллектуальной системы автоматической настройки частоты колебаний резонатора осуществляется в следующей последовательности:

- 1) определение входов и выходов системы автоматической настройки частоты колебаний резонатора;
- 2) задание для каждой из входных и выходных переменных функции принадлежности;
- 3) разработка лингвистических правил;
- 4) выбор и реализация алгоритма нечеткого логического вывода;
- 5) анализ процесса автоматической настройки частоты колебаний резонатора. Общий логический вывод выполняется по схеме, представленной на рис. 2.



Рис. 2. Схема логического вывода

Функции принадлежности, использованные в данной статье, были, в основном, четырех видов: треугольные, трапециевидные, S- и Z-образные. Параметры и формулы функции принадлежности показаны в таблице 1.

Таблица 1

Параметры и формулы функции принадлежности

Функция принадлежности	Параметры	Формула
S-образная	a, b	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & b < x \end{cases}$
Z-образная	b, c	$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x < b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c \\ 0, & c < x \end{cases}$

Функция принадлежности	Параметры	Формула
Треугольная	a, b, c	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c \\ 0, & c < x \end{cases}$
Трапециевидные	a, b ₁ , b ₂ , c	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b_1-a}, & a < x < b_1 \\ 1, & b_1 < x < b_2 \\ \frac{c-x}{c-b_2}, & b_2 < x < c \\ 0, & c < x \end{cases}$

При работе контроллера по алгоритму Мамдани в системе автоматической настройки (установки уровня частоты колебаний напряжения резонатора в нормируемых пределах) на вход нечеткого контроллера подавались: вычисленное значение частоты колебаний напряжения и направление изменения напряжения. С выхода снималось направление переключения (вверх, вниз или не менять положения) и продолжительность включения электродвигателя. Все входные и выходные величины являются четкими значениями, поскольку снимаются с реальных приборов автоматике, которые выдают четкие значения измеряемых параметров. Далее, в самом контроллере, эти величины уже преобразуются к нечетким значениям. После срабатывания нечетких правил, полученные выходные переменные вновь преобразуются к четкому (нормальному) виду.

Для работы нечеткого контроллера использовались следующие лингвистические переменные:

На входе контроллера (входные переменные);

- Частота - *frequency*. Частота колебаний напряжения. Нечетные значения этой лингвистической переменной следующие (рис.2): Очень низкое (Very low) – Z-образная функция принадлежности с параметрами (0.2 0.3); Низкое (Low) - трапециевидная функция принадлежности с параметрами (0.2 0.3 0.4 0.5). Средняя (Mean) - трапециевидная функция принадлежности с параметрами (0.4 0.5 0.6 0.7); Высокое трапециевидная функция принадлежности с параметрами (0.6 0.75 0.85 0.95) (High); Очень высокое (Very High) – S-образная функция принадлежности с параметрами (0.85 0.95);

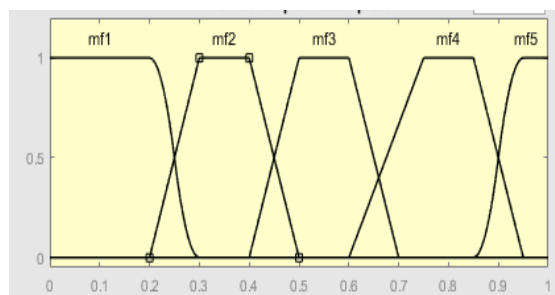


Рис.2. Нечеткие значения переменной «Частота»

- *Динамика - dFrequency*. Динамика изменения частоты колебаний напряжения резонатора (производная частоты колебаний напряжения). Значения этой переменной (рис. 3).

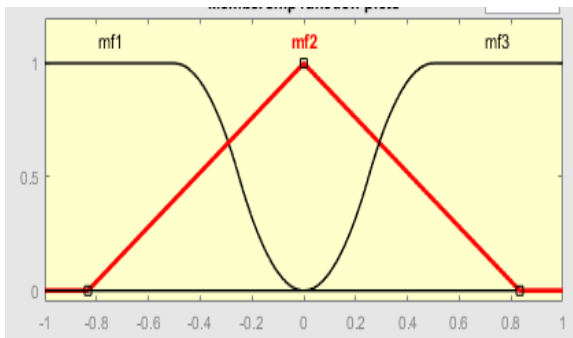


Рис. 3. Нечеткие значения переменной «Динамика»

Отрицательное (Negativ)-z-образная функция принадлежности с параметрами (-0,5 0); Нулевое (Zero)-треугольная функция принадлежности с параметрами (-0.8 0 0.8); Положительное (Positive)-S-образная функция принадлежности с параметрами (0 0.5).

2. С выхода контроллера снимались значения следующих лингвистических переменных (выходные переменные):

Направление - Direct. Направление следующего переключения двигателя. Значения этой переменной (рис.4): Вверх (Up) - трапециевидальная функция принадлежности с параметрами (0.5 0.75 1.25 1.5); Стоп (Stay) - трапециевидальная функция принадлежности с параметрами (-0.5 - 0.25 0.25 0.5); Вниз (Down) трапециевидальная функция принадлежности с параметрами (-1.5 -1.25 -0.75 -0.5);

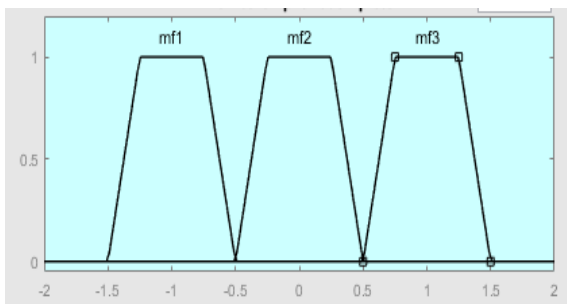


Рис. 4. Значение переменной «Направление»

Продолжительность - Duration. Продолжительность включения электродвигателя. Нечеткие значения этой переменной (рис.5); Нулевая (Zero)-Z-образная функция принадлежности с параметрами (0.2 0.3); Короткая (Short)-трапециевидальная функция принадлежности с параметрами (0.2 0.3 0.4 0.5); Средняя (Mean) - трапециевидальная функция принадлежности с параметрами (0.4 0.5 0.6 0.7); Долгая (Long)- трапециевидальная функция принадлежности с параметрами (0.6 0.75 0.85 0.95); Очень долгая (Very Long) – S-образная функция принадлежности с параметрами (0.85 0.95);

В процессе работы были опробованы различные варианты работы контроллера. По выше приведенным переменным было составлено 15 правил нечеткого вывода для данной системы. Лингвистическая таблица правил приведена на таблице. Символы в обозначениях терминов озна-

чают: ОН – очень низкое; Н – низкое; С- среднее; В- высокое; ОВ – очень высокое; О – отрицательное; Z – нулевое; П – положительное; ВВ - Вверх; СТ – Стоп; ВН – вниз; К – короткая; Д – долгая; ОД - Очень долгая.

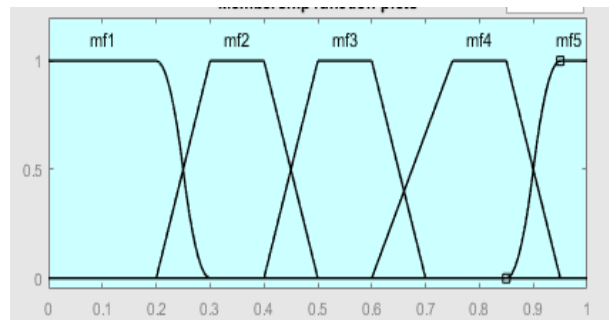


Рис. 5. Значение переменной «Продолжительность»

Таблица 2

Таблица лингвистических правил

U \ dU	ОН	Н	С	В	ОВ
О	ВВ ОД	ВВ Д	ВВ С	ВВ К	ВВ К
Z	ВН ОД	ВН Д	ВН Д	ВН К	СТ Z
П	ВН ОД	ВН ОД	ВН Д	ВН К	ВН К

Расчетные эксперименты проведены в среде Matlab с использованием программного комплекса Fuzzy Logic Toolbox.

В процессе работы исследуемой модели были получены поверхности изменения направления следующего переключения и продолжительности времени включений электродвигателя. На рис. 6 показаны поверхности изменения направления следующего переключения электродвигателя и продолжительности времени включений электродвигателя в зависимости от значения частоты колебаний напряжения и ее производной.

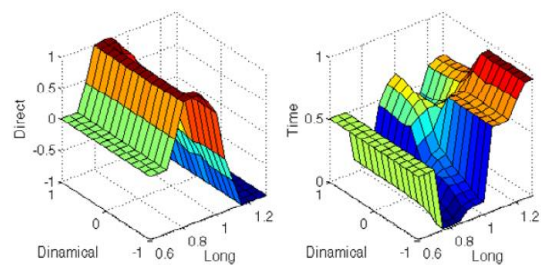


Рис. 6. Поверхностные зависимости выходных параметров от входных переменных

В результате анализа полученных результатов было выявлено, что нечеткий контроллер в большинстве случаев совершает меньшее количество переключений по сравнению с ручным, а также позволяет выдерживать зазор между трубкой и приемником колебаний. Это уменьшает время настройки уровня частоты колебаний резонатора и не предъявляет повышенные требования к точности геометрических размеров трубки. Стоит также отметить, что устройство на основе нечеткой логики обладают еще одним важным свойством - сравнительно простой расширяемостью. Добавление новых свойств, новых функциональных возможностей для таких устройств легко и не-

сложно. Т.е. при возникновении необходимости в дополнительных функциях, возможно добавление их в работу нечеткого устройства. Устройства на основе нечеткой логики сравнительно легко и просто могут перепрограммироваться под текущие нужды. Процедура добавления новых функциональных возможностей проста и не сложна. Поэтому добавление новых функций в случае возникновения такой надобности, не представляет сложности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

1. В результате исследований было получено, что нечеткий контроллер в большинстве случаев совершает меньшее количество переключений, по сравнению с ручным, а также позволяет выдерживать зазор между трубкой и приемником колебаний. Это приводит к уменьшению времени настройки уровня частоты колебаний резонатора и не предъявляет повышенные требования к точности геометрических размеров трубки.

2. Устройства на основе нечеткой логики обладают еще одним важным свойством – сравнительно простой расширяемостью. Добавление новых свойств, новых функциональных возможностей для таких устройств легко и несложно. Т.е. при возникновении необходимости в дополнительных функциях, возможно добавление их в работу нечеткого устройства. Можно утверждать, что устройства на основе нечеткой логики более предпочтительны для автоматической настройки уровня частоты колебаний плотномера, нежели устройства на основе обычной логики. Сама автоматическая настройка уровня частоты колебаний плотномера получается более качественная, количество переключений снижается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колесников В.А. Резонансный датчик для измерения плотности жидкостей // Авторское свидетельство СССР №146081. 1962. Бюл. №7.
2. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. Пер. с англ. Н.И. Ринго. Под ред. Н.М. Моисеева, С.А. Орловского. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
3. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ Петербург, 2005. – 719 с.
4. Гашимов А.М. Улучшенный алгоритм нечеткой логики для управления реактивной мощностью и напряжением в распределительных сетях / А.М. Гашимов, Н.Р. Рахманов, Г.В. Гулиев // Энергетика. – 2014. – №2. – С. 29-39.
5. Рахманов Н.Р. Идентификация структуры нечеткого регулятора реактивной мощности / Н.Р. Рахманов, Г.Б. Гулиев, З.И. Фархадов // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2015. – № 4. – С. 28-31.
6. Алиев Р.А. Теория интеллектуальных систем и ее применение / Р.А. Алиев, Р.Р. Алиев. –Баку, Чашыюглу, 2001. – 720 с.
7. Гусейнов Т.К. Обобщенная математическая модель трубчатых резонаторов для вибрационно-частотных плотномеров жидких продуктов / Т.К. Гусейнов, Б.К. Амирасланов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2009. – № 4(8). – С. 11-14.
8. Гусейнов Т.К., Абдуллаев И.М., Амирасланов Б.К. Резонансный датчик плотности // Патент Азербайджан №2008 0025 от 28.01.2008.

System of Automatic Adjustment of Vibration-Frequency Density Meter Based on Fuzzy Logic

Farkhadov Z.I., Amiraslanov B.G.
Sumgait State University
Sumgait, Azerbaijan
amiraslanov-bk@mail.ru

Yusifov S.I.
Azerbaijan State University of Oil and Industry
Baku, Azerbaijan
siyusifov@yahoo.com

Abstract. A system of automatic tuning to the resonant frequency of oscillations of a vibration-frequency density meter of a liquid based on a single-tube resonator of increased quality is presented, taking into account possible nonlinearities of the object. This thesis proposes a system and algorithm for tuning to the resonant frequency of vibrations of a vibration-frequency density meter using the theory of fuzzy sets. The use of fuzzy control methods made it possible to obtain a system

for automatic tuning to the resonant frequency of vibrations of a vibration-frequency densitometer without using cumbersome computational procedures typical of classical control methods.

Keywords: vibration-frequency density meter, fuzzy set, fuzzy logic, automatic adjustment, fuzzification, defuzzification, membership function, vibration frequency.

Динамика изменения качества деятельности организаций инновационной инфраструктуры

Кузора С.С.

Дальневосточный федеральный университет
Владивосток, Россия
webkuzora@mail.ru

Аннотация. В работе предлагается метод оценки качества деятельности организаций инновационной инфраструктуры. Рассматриваемый подход отличается возможностью учета потенциальных факторов влияния, которые используются при прогнозировании динамики изменения качества субъектов инновационной деятельности. Теоретическая часть исследования посвящена рассмотрению подходов применимых к описанию разного рода явлений во времени. Практическая часть направлена на применение проанализированных подходов для изучения динамики качества деятельности организаций. На основе проделанной работы подчеркивается целесообразность учета допустимых воздействий на изучаемый субъект инновационной деятельности.

Ключевые слова: оценка качества деятельности организаций, прогнозирование качества, теория нечетких множеств и нечеткая логика, динамические системы, инновационная деятельность.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день инновационное развитие России сохраняет свою актуальность по причине появления перспективных технологий, формирования рынков высокотехнологичной продукции, появления новых индустрий, модернизации традиционных отраслей. В процессе развития участвуют такие субъекты инновационной деятельности как технопарки, кластеры, малые инновационные предприятия, бизнес-инкубаторы, пр.

Деятельность организаций инновационной инфраструктуры предполагает не только разработку новых технологий и выпуск высокотехнологичной продукции, но также и оценку соответствующих показателей, по результатам которой определяются приоритеты и инструменты инновационной политики, выстраиваются новые механизмы взаимодействия с участниками развития. К одному из подразумеваемых показателей относится показатель качества деятельности перечисленных субъектов, который позволяет обратить внимание на общее состояние организации по вопросам выполненных работ и оказываемых услуг.

В результате проделанного анализа выявлена недостаточная проработанность методов оценки качества деятельности организаций инновационной инфраструктуры. Наблюдается автономный характер подходов, применимых в пределах решения конкретных задач. Также следует отметить, что существующие методы оценки не учитывают потенциальные факторы влияния и возможность применения полученных результатов для прогнозирования изменения качества.

Ввиду этого актуальным является разработка метода оценки качества деятельности организаций инновацион-

ной инфраструктуры, совокупность свойств которого позволит учитывать потенциальные факторы влияния и спрогнозировать будущее положение качества.

ТЕОРИЯ

Перед тем как речь пойдет о динамике различного типа социально-экономических систем необходимо понимать, что имеется в виду под системой, которая находится в покое. С точки зрения механики, под статикой понимается учение о равновесии тела, в то время как под динамикой учение о движении тела. Исторически определение статики и динамики широко применялось в физике и химии. Впоследствии эти два понятия проникли в социально-экономическую сферу жизни, и остаются используемыми во многих областях знаний сегодня [1].

Теория динамических систем берет свое начало со времен Ньютона. Ученым был предложен ряд математических моделей, позволяющий описать движение планет Солнечной системы. Знание об операторе (математическом отображении множеств) дает возможность предсказать последующее движение планет, основываясь на начальных данных, зависящих от времени. Таким образом, решение математической задачи прогнозирования положения небесных тел состояло в интегрировании системы дифференциальных уравнений первого порядка [2].

На основании вышеизложенного и дополнительного проведенного анализа под динамической системой в наиболее общем смысле понимается множество переменных, описываемых изменение состояния системы во времени [1-8].

Как уже упоминалось, динамические системы часто встречаются за пределами физики. К таким областям знаний относятся: биология, химия, экономика, география, история. Методы исследования систем разнообразны, однако можно выделить две основных категории: первая основана на решении разностных и дифференциальных уравнений, вторая на статистических данных. Как правило, для описания динамических систем в физике, биологии, химии применима первая категория. Соответственно для таких наук как экономика, география и история – вторая.

Выбор одного из методов зависит от таких особенностей как постановка проблемы исследования, сведения переменных системы, возможность практического использования результатов. Зачастую применение одного метода недостаточно для изучения конкретного явления, тогда возникает целесообразность обратиться к нескольким способам одновременно.

Статистические методы исследования

Подробнее рассмотрим упомянутые категории методов исследования. Начнем с наиболее простой, с точки зрения обработки информации и получения результатов, категории методов, основанной на статистических данных [9,10]. Необходимо отметить, что для обработки статистических данных существует несколько способов. К распространённым относятся: линейный тренд, регрессионный анализ, метод экстраполяции, элементы искусственного интеллект, метод экспертных оценок. Суть каждого способа сводится к предвидению дальнейшего развития исследуемого процесса.

В качестве практического примера рассмотрим метод экстраполяции, используемый для обработки статистических данных валютного рынка. Данный метод является одним из основных в области прогнозирования экономических явлений. Экстраполяция стремится к поиску закономерностей, основанных на прошлых и настоящих тенденциях с целью распространения полученной информации на будущее. Обратим внимание на график (рис. 1), отображающий историю цен валютной пары USD/RUB на период с мая 2018 г. по июнь 2019 г.

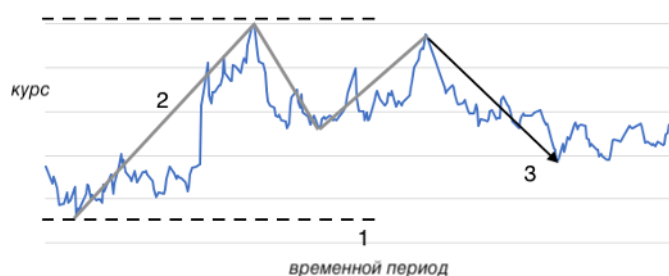


Рис. 1. График волатильности валютной пары USD/RUB

На рис. 1 изображен набор инструментов технического анализа, используемый аналитиками для изучения валютного рынка. Название первого инструмента «Уровни поддержки и сопротивления», отмеченный двумя параллельными прямыми (ценовым максимумом и минимумом). Как показано на графике, в период с мая по сентябрь цена достигает максимума, после чего меняет направление, что свидетельствует о снижении цены на актив. Под номером 2 представлен инструмент «Фигуры графического анализа», обозначенный четырьмя линиями в виде двойной вершины. Согласно этой фигуре, ценовое колебание имеет следующую закономерность: если три построенные линии изображают неполную двойную вершину, тогда при построении четвертой линии будущее направление цены имеет тенденцию к снижению. Третьим инструментом является «Анализ тренда», который определяет движение цены. В соответствии с графиком, нисходящий тренд изменит свое направление после пересечения противоположного тренду цвета. Данный сигнал получил свое подтверждение спустя два месяца, когда цена на актив изменилась с отметки 64.3 до 65.2 [11].

Математические методы исследования

Обратимся к категории методов исследования динамических систем, основанных на решении уравнений [6,8,13,14]. Такие системы бывают с дискретным и непрерывным временем, где в первом случае система описывается разностными уравнениями, во втором дифференци-

альными. Изучение систем сводится к построению математических моделей, параметры которых определяют начальное состояние, и задается переменная времени с целью отслеживания ее эволюции. Рассмотрим динамическую систему с непрерывным временем, для изучения которой воспользуемся теорией дифференциальных уравнений.

В рассматриваемом примере известны начальные условия динамической системы, которую можно свести к решению задачи, именуемой *начальной задачей* или *задачей Коши* [14].

Обратим внимание на постановку задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(t, x), t > 0, x(0) = x_0;$$

для систем обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dX(t)}{dt} = F(t, X), t > 0, X(0) = X_0;$$

где $X(t) = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T, F = (f_1, f_2, \dots, f_m)^T$.

В качестве решения дифференциального уравнения первого порядка рассмотрим логистическое уравнение Ферхюльста, описывающее динамику численности популяции [3]. Исходное предположение сформулировано следующим образом: скорость прироста населения пропорциональна количеству населения, однако лимитировано максимальной численностью популяции.

Уравнение выглядит так:

$$\frac{dP}{dt} = rP\left(1 - \frac{P}{K}\right),$$

где параметр r – скорость роста, K – максимальная численность популяции, P – начальная численность популяции, t – время.

Решением уравнения является график:

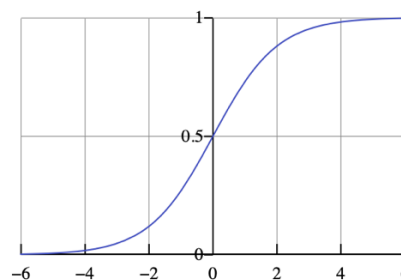


Рис. 2. Логистическая кривая популяции ($K=1, P=0.5, r=1$)

На основании вышеописанных двух принципиально разных категорий методов исследования динамических систем напрашивается вывод, что изучение динамики различного типа систем зависит от области знаний, известных переменных и постановки задачи.

ПРАКТИКА

Практическая часть работы включает в себя применение проанализированных методов исследования динамики с целью описания изменения качества деятельности организаций, тип которых был определен в ведении данного исследования, а также использование теории нечетких

множеств и нечеткой логики для формализации необходимых данных.

Изучение динамики начинается с процесса подготовки данных. На основе проделанного анализа выявлены переменные, которые имеют отношение к любому типу элементов инновационной инфраструктуры. Первой переменной является информационное сопровождение, под которым понимается открытость, доступность и актуальность информации, представленная на официальном сайте определенной организации. Второй переменной выступает информация по материальным возможностям организации, куда относится материально-техническое обеспечение, международное взаимодействие, экспертиза и поддержка. Третьей переменной является компетентность сотрудников организации, которая включает материальную мотивацию, повышение квалификации, условие труда.

Количественную информацию идентифицированных переменных предлагается получить с помощью применения теории нечетких множеств и нечеткой логики, так как присутствует некоторая неопределенность в процессе присвоения значений конкретной переменной. Данная теория является разделом математики, которая позволяет описывать качественные характеристики объектов исследования, может быть использована для устранения нечеткости суждений, а также применима в вычислительных процессах [15].

Представим полученную информацию по переменным в виде таблицы 1, где определим диапазон значений для оценки, ссылаясь на который приступим к математическому описанию исследуемого объекта – изменение качества деятельности организаций инновационной инфраструктуры.

Таблица 1

Переменные по качеству

№	Наименование переменной	Диапазон значений (услов.зн.)
1	Информационное сопровождение	от 0 до 5
2	Материальные возможности	от 0 до 5
3	Компетентность сотрудников	от 0 до 5

Для математической формализация представленной информации воспользуемся одним из алгоритмов нечеткого вывода, который лежит в основе теории нечетких множеств и нечеткой логики. Математическая процедура алгоритма Мамдани имеет вид:

1) Фаззификация (установка соответствия между функцией принадлежности и входной лингвистической переменной на прямоугольной системе координат):

$$\tilde{a}_1 = \mu_{an}(x)$$

2) Процесс активизации (сопоставление входных-выходных лингвистических переменных):

$$\mu_{an}(x) = \mu_{dn}(y)$$

3) Формирование баз правил (нечеткая база знаний):

$$(\tilde{a}_1 = x_1 \theta \tilde{a}_2 = x_2 \theta \dots \tilde{a}_n = x_n) \Rightarrow (\tilde{d}_n = y_n)$$

4) Дефаззификация (процесс перехода от нечеткости к числовому значению):

$$\bar{y} = \left(\frac{\sum y_n}{n} \right)$$

После подстановки соответствующих значений решается уравнение, результат которого указывает на статическое состояние качества деятельности определенной организации. Иными словами, дается оценка качеству, полученное значение которой 2.6.

Подготовленные данные позволяют перейти к следующему этапу практической части работы. Для исследования динамики изменения качества сформулируем задачу Коши, которая подразумевает частное решение дифференциальных уравнений. Уравнение выглядит как:

$$P(t) = \frac{P}{K},$$

где параметр, P – начальная оценка (статика), K – предельная оценка, t – время.

Подставляя допустимые значения таблицы 1, решим дифференциальное уравнение первого порядка:

$$P(t) = \frac{2,6}{5},$$

$$\frac{dy}{dt} = 0,52,$$

$$dy = 0,52 dt,$$

$$\int dy = \int (0,52) dt,$$

$$y = 0,52t + C$$

График решения представлен в виде рис. 3.

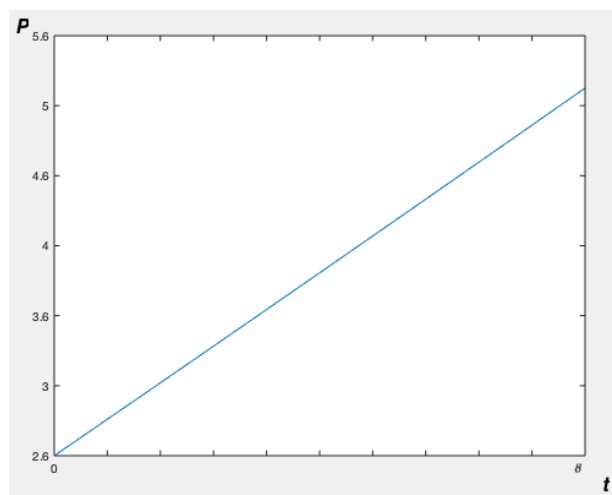


Рис. 3. Динамика качества деятельности организации (P – оценка, t – неопределенное время)

Прямая графика показывает, насколько поменяется значение оценки за неопределенный интервал времени с учетом положительных изменений в деятельности организации. Под положительными изменениями понимается ряд проделанных работ, результат которых приводит к достижению поставленных целей по повышению каче-

ства. Отметим, что отсутствие таких работ может привести к снижению качества.

На момент постановки задачи не было предложено конкретных действий, выполнив которые можно проследить положительную или отрицательную динамику изменения качества. Такие действия носили бы скорей субъективный характер, так как каждая организация имеет индивидуальный подход по улучшению качества. Другой причиной отсутствия рекомендаций по улучшению является возникновение потребности в соответствующих метриках, позволяющих отследить изменение качества после ряда проделанных работ.

Факторы влияния

Повысить объективность прогнозируемой динамики можно иным способом, обратив внимание на потенциальные факторы, оказывающие воздействие на организации инновационной инфраструктуры. К наиболее объективным факторам влияния относятся: валютный курс, уровень инфляции страны, ключевая ставка Банка России. Однако не стоит забывать о локальных факторах, например таких как географическое и социальное положение региона.

Относительно указанных в таблице 1 переменных предлагается выявить фактор влияния, который будет учтен при повторном решении дифференциального уравнения с целью повышения объективности изучения динамики изменения качества.

Обратим внимание на переменную Материальные возможности, включающая следующие статьи затрат*:

1. Приобретение оргтехники, оборудования и приборов, в том числе программного обеспечения.
2. Осуществление зарубежных командировок, включая стажировки, выставки, конференции.
3. Привлечение сторонних специалистов (предпринимателей, экспертов, консультантов).

Основываясь на данной информации сделаем предположение, что бюджет организации, предусматривающий перечисленные статьи затрат, зависит от валютного курса так как материально-техническое обеспечение и международное сотрудничество имеют непосредственное отношение к иностранной валюте. Одной из мировых валют является доллар США, который служит для большого количества интернациональных платежей. Ввиду этого обоснуем взаимосвязь курса российского рубля и американского доллара в контексте совершения предполагаемых денежных операций.

Проанализируем валютную пару USD/RUB за последние десять лет и воспользуемся статистическим методом исследования (временные ряды) с целью обоснования зависимости курса валют с последующим выявлением значения фактора влияния, который задействуем для продолжения исследования динамики качества деятельности организаций.

Одной из основных статистических характеристик временного ряда является среднее значение, которое находится по следующей формуле:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j,$$

где сигма – сумма числовых значений, n – количество переменных.

Основываясь на данных рис. 4 среднее значение курса равно 49,3. Воспользуемся полученным значением для нахождения разницы между валютным курсом в определенный период времени. Внесем результат вычислений в табл. 2.

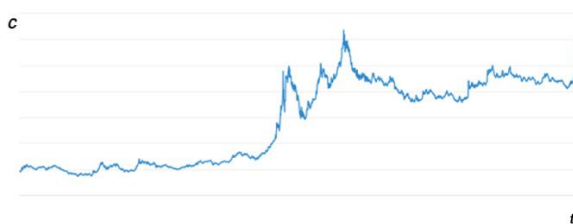


Рис. 4. Валютный курс доллара к рублю (C) с 2010 по 2020 г. (t) [16]

Таблица 2
Статистические показатели динамики валютной пары

i	год	курс (руб.) x_i	x_i от \bar{y} k_i	коэф. откл. z_i
1	23.04.2011	27	0,54	1,5
2	23.04.2012	29	0,58	1,4
3	23.04.2013	31	0,62	1,4
4	23.04.2014	34	0,68	1,3
5	23.04.2015	50	0,98	1
6	23.04.2016	64	1,29	0,7
7	23.04.2017	56	1,13	0,9
8	23.04.2018	61	1,23	0,8
9	23.04.2019	65	1,31	0,7
10	23.04.2020	76	1,54	0,5

Значения колонки k_i могут быть использованы следующим образом: на примере четырех возможных значений изобразим график, который показывает зависимость потраченных денежных средств от валютного курса. Допустим, запланированные статьи затрат* на один календарный год при курсе 49,3 руб. составляют 2 млн. руб., тогда сумма расходов при значении 64 руб. рассчитывается по формуле:

$$s_i = k_i s_n,$$

где s_n – 2 млн. руб.

Аналогичные расчеты сделаем для значений 31 и 76 руб. Результат представим на рис. 5.

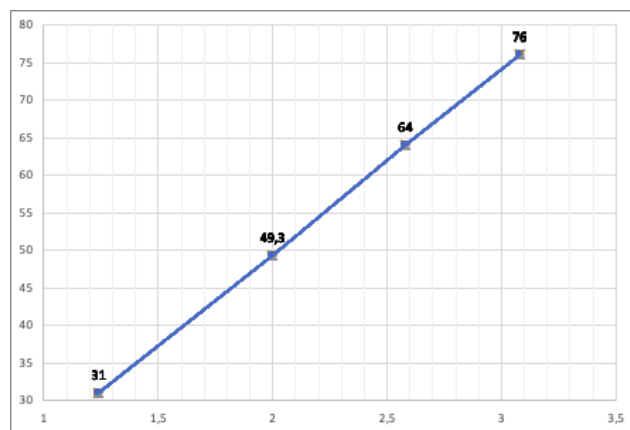


Рис. 5. Зависимость s_n (статья затрат) от k_i (курс)

Показано, что валютный курс определяет условия для совершения соответствующих операций, где под средним значением предполагается нормальность условий, которые могут быть выражены единицей. Тогда отклонение от единицы определит состояние условий на конкретный период времени. Коэффициент отклонения находится по формуле:

$$z_i = 1 - k_i.$$

Таким образом, полученные значения колонки z_i могут быть использованы в качестве показателя фактора влияния. Допустим, на момент исследования динамики валютный курс находится на отметке 76, тогда фактор влияния принимает значение 0,5 (таблица 2).

Определив значение фактора, составим дифференциальное уравнение для прогнозирования динамики изменения качества с учетом выявленного воздействия:

$$P(t) = f\left(\frac{P}{K}\right),$$

где параметр f – фактор влияния.

После подстановки значений результат решения выглядит следующим образом:

$$y = 0,26t + C.$$

График решения представлен в виде рис. 6.

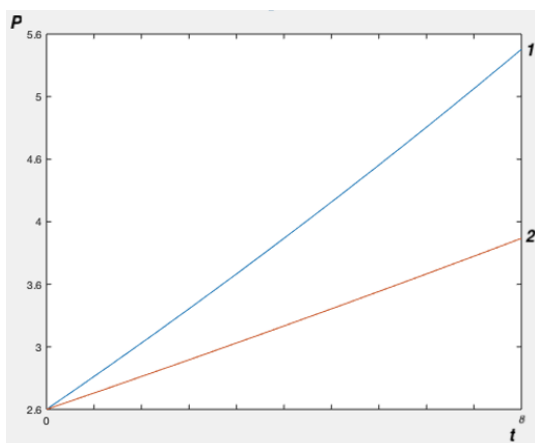


Рис. 6. Динамика без учета фактор влияния (1); динамика с фактором влияния (2)

График рисунка демонстрирует изменение в положении оценки качества деятельности организации, учитывая разницу валютного курса. Сравнивая два направления заметно отличие, интерпретируемое следующим образом: при выше среднем значении курса доллара к рублю тенденция к повышению качества деятельности организации замедлится. Другими словами, высокий курс доллара является сдерживающим фактором относительно повышения качества деятельности той или иной организации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы отметим несколько пунктов:

1) Совокупное использование проанализированных методов исследования динамики может рассматриваться как один из способов прогнозирования социально-экономических явлений.

2) Теория нечетких множеств и нечеткая логика является действенным математическим инструментом в процессе описания явлений в условиях неопределённости.

3) Процедура идентификации и учета факторов влияния может повысить объективность оценки качества деятельности организаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондратьев Н.Д. Основные проблемы экономической статики и динамики: Предварительный эскиз / Н.Д. Кондратьев; изд. подгот.: В.В. Иванов, М.С. Ковалева. – М.: Наука, 1991. – 569 с.

2. Неймарк Ю.И. Динамические модели теории управления / Ю.И. Неймарк, Н.Я. Коган, В.П. Савельев. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 400 с.

3. Verhulst F. Nonlinear differential equations and dynamical systems / F. Verhulst. – 2nd edition (rev. and expanded ed. 1996). – Springer, 2006. – 315 p.

4. May R.M. Simple mathematical models with very complicated dynamics / R.M. May // Nature. – 1976. – Vol. 26 (5560). – P. 457.

5. Wang W.-X. Data based identification and prediction of nonlinear and complex dynamical systems / W.-X. Wang, Y.-C. Lai, C. Grebogi // Physics Reports. – 2016. – Vol. 644. – P. 1-76.

6. Дыхта В.А. Динамические системы в экономике. Введение в анализ одномерных моделей: учеб. пособие / В.А. Дыхта. – Иркутск: Изд-во БГУЭП, 2003. – 178 с.

7. Анищенко В.С. Динамические системы // Соросовский образовательный журнал. – №11. – 1997.

8. Царев И.Г. Динамические системы в экономике // Аудит и финансовый анализ. – 2006. – №3. – С. 285-303.

9. Costantini V. The dynamics of environmental and economic systems. Innovation, environmental policy and competitiveness / V. Costantini, M. Mazzanti (Eds.). – Londres: Springer, 2013. – 231 p.

10. Zaggi M.A. The dynamics of openness and the role of user communities: A case study in the ecosystem of open source gaming handhelds / M.A. Zaggi, T.G. Schweisfurth, C. Herstatt // IEEE Transactions on Engineering Management. – 2019.

11. Bloomberg News. Official website – URL: <https://www.bloomberg.com/quote/USDRUB:CUR> (дата обращения 11.01.2021).

12. Петров Л.Ф. Методы динамического анализа экономики: учеб. пособие / Л.Ф. Петров. – М.: ИНФРА-М, 2010. – 239 с.

13. Stanojevic J. Dynamical systems in economics / J. Stanojevic, K. Katarina // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 1926. – 020043.

14. Тихонов А.Н. Курс высшей математики и математической физики. Выпуск 7. Дифференциальные уравнения / А.Н. Тихонов, А.Б. Васильева, А.Г. Свешников. – М.: Наука, 1980. – 231 с.

15. Zadeh L. Fuzzy sets / L. Zadeh // Information and Control. – 1965. – Vol. 8. – P. 338-353.

16. Официальный сайт Банка России. Динамика курса валюты Доллара США – URL: <https://www.cbr.ru/currency> (дата обращения 11.01.2021).

The Change in Quality of Activities of the Innovation Organizations

Kuzora S.S.

Far Eastern Federal University
Vladivostok, Russia
webkuzora@mail.ru

Abstract. The paper proposes a method for assessing the quality of innovation organizations. The approach takes into account potential influencing factors that are used in predicting the quality of the innovation organization. The theoretical part of the research is devoted to the consideration of approaches applicable to the description of various kinds of phenomena in time. The practical part is aimed at applying the

analyzed approaches to study the dynamics of the quality of organizations' activities. Based on the work done, the author emphasizes the feasibility of taking into account the permissible impacts on the studied subject.

Keywords: assessment of the quality, quality forecasting, fuzzy logic, innovation activity.

Внедрение результатов имитационного моделирования ГПС в реальных производственных системах

Ахмедов М.А., Ахмедова С.М., Магомедли Х.М.
Сумгаитский государственный университет
Сумгаит, Азербайджан
axmedova60@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются вопросы внедрения результатов имитационного моделирования гибкой производственной системы в реальных производственных системах. Рассмотрены выполненные работы авторами при исследовании ГПС методами имитационного моделирования до этапа испытаний и внедрения в реальных производственных условиях: обоснованы целесообразность применения имитационного моделирования при исследовании на этапе системотехнического проектирования и выбор для этого программного комплекса RAO-studio; этапы имитационных экспериментов, воспроизведение результатов имитации методами анимации и управление динамических процессов с использованием временной сети Петри; показано, что компьютерные эксперименты имитационной модели проводятся в идеальной среде, без учета внешних и внутренних возмущений; предложен алгоритм управления ГПС с использованием результатов имитационных экспериментов и с учетом возмущений, на основе производственных правил.

Ключевые слова: имитационное моделирование, анимация, ГПС, производственное правило, сети Петри.

ВВЕДЕНИЕ

В результате анализа этапов развития производственных систем, с точки зрения «степени неопределенности» и «разновидностей» состава элементной базы, можно сделать вывод о том, что их эволюционный процесс развивается из относительно простых к категории достаточно сложных производственных систем, а имен-но: автоматические линии → гибкие производственные модули → гибкие производственные системы → компьютеризированные интегрированные производства → виртуальные производства и др. Ясно, что с расширением разновидностей элементной базы, также повышаются эффективность и функциональные возможности производственной системы в целом [1].

Опыт проектирования производственных систем до этапа гибких производственных систем (ГПС) показал, что их исследование на этапе системотехнического проектирования (техническое задание, эскизное и техническое проектирование) с точки зрения целесообразности их создания с применением аналитических моделирующих аппаратов, таких как конечные автоматы, параллельно-функционирующие асинхронные процессы, производственные правила, фреймовые и логические модели, автоматические сети Петри и др., обеспечивается получение достаточной информации для дальнейшего продолжения этапов процесса проектирования.

ГПС по сравнению с предыдущими этапами автоматизации производственных систем создается с использова-

нием различного назначения мехатронных устройств, которые облегчают физический труд человека и повышают его функциональные возможности во вредных для человеческого организма условиях. В состав ГПС также входят основные и дополнительные оборудования, автоматически управляемые транспортные системы, станки с ЧПУ, рабочих ячеек, системы управления на базе компьютерной техники и др. Пере-численные элементы ГПС имеют между собой сложные связи и должны функционировать во взаимодействии всех компонентов в виде динамических мехатронных систем с общими рабочими зонами, соблюдением принципов асинхронности и параллелизма. Поэтому, ГПС относятся к категории сложных производственных систем и для их исследования выше перечисленные моделирующие аппараты не позволяют получить желаемый результат и требуется применение новых эффективных подходов. Одним из таких подходов является применение методов имитационного моделирования.

В тезисе доклада обсуждается последовательное использование метода имитационного моделирования для исследования ГПС и использование результатов имитации на этапах испытания и внедрения в реальном объекте.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Требуется рассмотрение вопросов практического применения методов имитационного моделирования, в целях оценки целесообразности проектирования и создания конкретного объекта в виде ГПС, на этапе системотехнического проектирования и использование результатов имитации на этапах испытания и внедрения в реальном объекте.

Для решения поставленной задачи авторами выполнены ниже перечисленные исследовательские и практические работы, результаты которых обсуждались на международных научно-практических конференциях и опубликованы на страницах ведущих научно-технических журналов.

Последовательно рассмотрим выполненные авторами научные и практические работы.

В работе [2] обосновано исследование и оценка целесообразности проектирования ГПС с использованием методов имитационного моделирования на этапе системотехнического проектирования. Показано, что ГПС относится к категории сложных систем и состоит из множества динамических мехатронных устройств, которые функционируют во взаимодействии для достижения конечной цели в реальном масштабе времени. Следовательно, идеи проектировщиков на начальном этапе проектирования в большинстве случаев не оправдывают себя при

испытании натурально реализованных физических моделей. Сказанное еще более усугубляется при внедрении ГПС в реальных производствах. Отмечено, что эффективным подходом является исследование проектируемого объекта компьютерными экспериментами с использованием методов имитационного моделирования. Для решения поставленной задачи предложено использование программного комплекса RAO-complex, предназначенного для разработки и отладки имитационных моделей на языке PDO. С использованием инструментов среды RAO-complex предложена и разработана архитектура инструмента автоматизированного моделирования.

В работах [3÷6] с учетом требований RAO-studio на примере конкретного объекта «ГПС резка рулонных алюминиевых металлических листов на листы требуемого размера и листов на карточки, и очистка их поверхности» (далее в тексте ГПС) последовательно решены следующие задачи: разработка концептуальной модели участка, принятого в качестве объекта исследования; разработка структурно-кинематической схемы ГПС; разработка архитектуры инструмента автоматизированного моделирования; разработка имитационной модели ГПС на языке PDO с использованием закладок RAO-studio; разработка алгоритма управления ГПС в виде временной сети Петри с использованием закладок RAO-studio; разработка обобщенной структуры системы управления ГПС в действующем производстве.

Анализ полученных результатов исследования ГПС методами имитационного моделирования позволяет сделать следующие основные выводы.

1. Выбор для решения поставленной задачи программного комплекса RAO-studio, предназначенного для разработки и отладки имитационных моделей на языке PDO, который позволяет воспроизводить на компьютере динамику проектируемого объекта, принятие решений сложной системой управления, решение задачи системного анализа и синтеза, полностью оправдывал себя и может быть использован для моделирования и исследования ГПС относительно сложных структур и назначения.

2. Результаты компьютерных экспериментов с использованием методов имитационного моделирования и воспроизведение результатов имитации анимацией, позволяет заказчику и исполнителю на начальном этапе проектирования пересмотреть некоторые пункты технического задания. Кроме этого демонстрацией результатов имитации предполагаемого объекта на начальном этапе проектирования обеспечивается вотум доверия исполнителю со стороны заказчика.

3. С учетом принципа декомпозиции (разбиение описания объекта на составные части с целью их раздельного исследования с учетом согласования принимаемых решений), ГПС, состоящая из четырех гибких производственных модулей (ГПМ), каждый из которых имитационным моделированием исследуется независимо друг от друга. Следовательно, процедуры каждого ГПМ, с учетом требований принципа декомпозиции, выполняются раздельно и в контексте объединяются в виде ГПС и исследуются в комплексе.

4. После окончательной отладки имитационной модели воспроизведением динамики анимацией, эксперт или высококвалифицированный специалист в данной области, определяет узкие места в ГПМ и предьявляет рекомендации по их устранению. Одновременно с учетом степени загрузки компонентов ГПМ, функционально законченном

в каждом цикле, принимается решение об эффективном выборе элементов ГПМ.

5. Исследование ГПС имитационным моделированием осуществляется без учета внутренних и внешних возмущений во время компьютерных экспериментов. Управление функционированием ГПМ в реальном времени осуществляется временной сетью Петри, в которой также не учитываются различного характера возмущения.

Как видно из анализа результатов, все процессы происходящие во время компьютерных экспериментов имитационной модели осуществляются в идеальной среде без учета внешних (изменение: температуры, давления воздуха, электрических параметров, влажность и др., среды где функционирует ГПМ) и внутренних (аварийные, не предусмотренные производственные простои и др.), возмущений, которые существенно повлияют на производительность ГПС и её безопасному функционированию в целом. Следовательно, для обеспечения эффективного функционирования ГПС в реальных производственных условиях требуется учитывать устранение этих возмущений в системе управления всего комплекса.

В работе на примере ГПМ резки стандартного плоского металлического листа (1) на лист (2) требуемого размера (в зависимости от требований производства) и передачи листа 2 к рабочей зоне следующего ГПМ, рассматривается обеспечение функционирования ГПМ в реальном объекте.

Структурно-кинематическая схема ГПМ (рис.1) состоит из следующих мехатронных устройств: гильотинная ножница (ГН), транспортная система (ТС1,2), подъемно-позиционирующий манипулятор (ППМ) и промышленный робот (ПР).

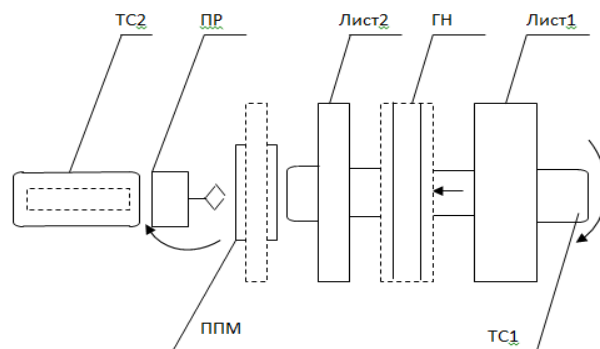


Рис. 1. Структурно-кинематическая схема ГПМ

С использованием временной сети Петри ГПМ функционирует следующим образом: Лист1 по ТС1 поступает к рабочей зоне ГН; осуществляется резка Лист1 на Лист2, который по ТС1 перемещается к позиции ППМ; ПР схватывает Лист2, поворачивается на 1800 и перемещает Лист2 к рабочей зоне ТС2.

Для функционирования ГПМ в реальном объекте разработан алгоритм управления на основе производственных правил. В целях формирования производственных правил экспертами после визуального осмотра результата имитации определяются позиции, где должны устанавливаться сенсоры для идентификации текущих ситуаций. В ГПМ, информации поступающие из различных сенсоров и сигналы для управления мехатронных устройств называются глобальной базой данных. На основе информации, посту-

пающих в различных ситуациях, формируются продукции, которые создают базу знаний и алгоритм управления ГПМ.

В данном случае глобальная база данных создается в виде:

- X₁ – ТС1 включена;
- X₂ – ГН включена;
- X₃ – ППМ включен;
- X₄ – рука манипулятора в исходном положении;
- X₅ – рука манипулятора в конечном положении;
- X₆ – на ТС1 имеется Лист1;
- X₇ – в рабочей зоне ГН находится Лист1;
- X₈ – в рабочей зоне ППМ находится Лист2;
- X₉ – рабочая зона ТС2 свободна;
- X₁₀ – захват ПР отключен;
- X₁₁ – рабочая зона ППМ свободна;
- U₁ – включение ТС1;
- U₂ – включение ГН;
- U₃ – включение ППМ;
- U₄ – включение руки ПР вперед;
- U₅ – включение поворота руки ПР;
- U₆ – включение захвата ПР.

На основе информации глобальной базы данных формируется база знаний в виде продукционных правил с использованием логических операций И, ИЛИ, НЕ (\neg) и импликаций в виде «ЕСЛИ..., ТО...».

- (P1) ЕСЛИ на ТС1 имеется Лист1
И рабочая зона ГН свободна
И рабочая зона ППМ свободна
И ГН отключена
ТО обеспечивается условие включения ТС1
- (P1) $(X_6 \& X_{11} \& \neg X_2 \& \neg X_3) \Rightarrow U_1$
- (P2) ЕСЛИ ГН отключена
И имеется Лист1 в рабочей зоне ГН
И рабочая зона ППМ свободна
ТО обеспечивается условие включения ГН
- (P2) $(\neg X_2 \& X_7 \& \neg X_3) \Rightarrow U_2$
- (P3) ЕСЛИ отключен ППМ
И имеется Лист2 в рабочей зоне ППМ
И рука ПР в исходном положении
ТО обеспечивается условие включения ППМ
- (P3) $(\neg X_3 \& X_8 \& X_4) \Rightarrow U_3$
- (P4) ЕСЛИ имеется Лист2 в рабочей зоне ППМ
И ППМ включен
И захват ПР отключен
И рука ПР в исходном положении
ТО обеспечивается условие включения руки

ПР

- (P4) $(X_8 \& X_3 \& X_{10} \& X_4) \Rightarrow U_4$

- (P5) ЕСЛИ захват ПР включен
И рука манипулятора в исходном положении

нии

- И рабочая зона ТС2 свободна
- И ГН отключена
- ТО обеспечивается условие включения поворота руки

$$(P5) (\neg X_{10} \& X_4 \& X_9) \Rightarrow U_5$$

- (P6) ЕСЛИ рука манипулятора в исходном положении

- И имеется Лист2 в рабочей зоне ППМ

- И ППМ включен

- И ГН отключена

- ТО обеспечивается условие включения захвата ПР

$$(P6) (X_4 \& X_8 \& X_3) \Rightarrow U_6$$

Аналогичным образом формируются управляющие сигналы отключения мехатронных устройств.

Таким образом идентификацией 12-ти текущих ситуаций и формированием управляющих воздействий в циклическом режиме функционирует ГПМ.

При испытании и внедрении ГПС в реальных объектах требуется также учитывать функционирование ГПМ общими рабочими зонами в комплексе ГПС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Емельянов В.В. Имитационное моделирование системы / В.В. Емельянов, С.И. Ясиновский. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 584 с.
2. Ахмедов М.А. Разработка архитектуры инструмента автоматизированного проектирования имитационной модели гибкого производственного модуля / М.А. Ахмедов, С.М. Ахмедова // Системы управления и информационные технологии. – 2015. – № 4-1(62). – С. 104-107.
3. Ахмедов М.А. Разработка алгоритма имитационного моделирования гибкой производственной системы с использованием программного комплекса RAO-STUDIO на языке РДО / М.А. Ахмедов, С.М. Ахмедова // 62-я Международная научная конференция Астраханского государственного технического университета (Астрахань, 23-27 апреля 2018 г.). – Астрахань, 2018. – С. 145.
4. Ахмедова С.М., Магомедли Х.М. Исследование гибкой производственной системы методами имитационного моделирования на этапе системотехнического проектирования / // Инженерные системы: труды научно-практической конференции с международным участием (Москва, 4-5 апреля 2019 г.). – Москва, 2019. – С.493-503.
5. Akhmedova S.M. Research of a flexible production system by methods of imitating modeling at a stage of sistemotechnical design / S.M. Akhmedova // Программные системы и вычислительные методы. – 2019. – №4. – С. 77-86.
6. Ахмедова С.М., Ахмедов М.А. Реализация алгоритма имитационной модели на примере гибкой производственной системы // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. III Международной научно-практической конференции (Брянск, 24-25 октября 2019). – Брянск, 2019. – С. 159-162.

Implementation of FPS Simulation Results in Real Production Systems

Akhmedov M.A., Akhmedova S.M., Mahammedli H.M.

Sumgait State University

Sumgait, Azerbaijan

axmedova60@mail.ru

Abstract. The issues of implementing the results of simulation of a flexible production system in real production systems are considered. The work performed by the authors in the study of FPS by methods of simulation modeling before the stage of testing and implementation in real production conditions is considered: the expediency of using simulation modeling in research at the stage of system engineering design and the choice for this software complex RAO-studio are substantiated; stages of simulation experiments, reproduction of simulation results by animation methods and control of dynamic processes using a temporary Petri net; it is shown that computer experiments of the

simulation model are carried out in an ideal environment, without taking into account external and internal disturbances; an algorithm for the control of the FPS is proposed using the results of simulation experiments and taking into account disturbances, based on production rules.

Keywords: simulation, animation, FPS, production rule, Petri nets.

Применение двуручных роботов-манипуляторов в гибких технологических процессах

Халилов Э.О.

Мингечевирский государственный университет
Мингечевир, Азербайджан
elnur_29@hotmail.com

Аннотация. В исследовании рассматривается применение двуручных роботов-манипуляторов при создании робототехнических комплексов. Анализируются оптимальные методы проектирования любой технической области, подчеркивается использование графики и трехмерной анимации для описания моделирования и его результатов. Проанализировано количество степеней свободы манипуляторов, операции, которые они будут выполнять в технологических процессах. Траектория возможных перемещений исследуется в трехмерной системе координат. Для этого система управления роботом отличается гибкостью. На первый план выходит функциональность режима обучения. С помощью этого режима записываются методы, используемые при программировании роботов. Сам процесс обучения сочетает в себе функции обучения, редактирования и выполнения, а также преимущества таких функций, как запись координат перемещения отдельных элементов в памяти робота.

Ключевые слова: робот, манипулятор, 3D модель, робототехнический комплекс, степень свободы, двурукий робот, захватные устройства.

ВВЕДЕНИЕ

На современном уровне производственных и технологических объектов возникает необходимость замены инструментов автоматизированных систем проектирования на вновь создаваемые интеллектуальные системы и информационные технологии. Таким образом, существующее оборудование (компьютерное оборудование), программные пакеты заменяются новыми технологиями, при условии, что стоимость проекта не будет увеличена для ускорения и повышения качества работы проекта. Проектирование промышленных роботов на основе новых технологий способствует развитию гибких производственных систем.

Промышленные роботы позволяют добиться следующих преимуществ для предприятия:

- повышение производительности труда;
- снижение себестоимости продукции;
- повышение качества продукции;
- повышение гибкости производственного процесса;
- простое и гибкое программирование;
- возможность работы в токсичных зонах;
- улучшение качества рабочего участка;
- минимизация затрат на диагностику и настройку;
- сокращение времени самоокупаемости;
- быстрая окупаемость капитальных вложений.

Помимо перечисленных преимуществ, следует указать и недостатки:

- если манипулируемая деталь не позиционируется, робот не может взять ее из необходимого положения;
- при манипулировании деталей различного размера требуются значительные изменения в конструкции схвата промышленного робота;
- неопределенность рабочих участков в зависимости от принципа управления и др.

В качестве основных областей применения современных промышленных роботов можно указать следующие:

1. Литье под давлением. Применение промышленных роботов в этой сфере избавляет человека от присутствия на неблагоприятном производственном участке.

2. Точечная сварка. Эта операция в основном применяется в автомобильной промышленности. В настоящее время большинство этих операций проводится с помощью роботов и манипуляторов. Точности позиционирования позволяет улучшить качество изделия.

3. Дуговая сварка. Возможность адаптации промышленных роботов позволила автоматизировать индивидуальные сварочные процессы. Технологически сложная и требующая точности данная операция успешно выполняется с помощью роботов и манипуляторов.

4. Литье. В этой области использование роботов ограничивается перемещением деталей из одного участка на другой.

5. Ковка. Использование роботов в этой области ограничено, в виду редкого использования технологической операции при изготовлении деталей.

6. Обработка под давлением. Роботы, используемые для выполнения этих операций, в основном применяются в автомобильной промышленности для штамповки новых деталей. Основная причина – это частые несчастные случаи среди работников при штамповке деталей.

7. Обработка и окраска поверхностей. В качестве причин использования промышленных роботов в этих областях можно указать следующие: наличие токсичных веществ на рабочем участке; плавность движений робота, равномерная подача краски и экономия краски.

8. Пластиковая формовка. Использование промышленных роботов и манипуляторов в процессе загрузки и разгрузки пластмассовых формовочных стержней, устранение выступов при отливке пластмассовых деталей считается достаточно эффективным.

9. Литейное производство. Операция заливки расплава в литейные формы считается опасной и токсичной для жизни человека. Выполнение этих операций с применением роботов позволяет добиться экономии металла (за счет быстрого литья) и повышения производительности.

10. Погрузочные машины. В отличие от обычных машин, применение роботов при выполнении погрузочно-разгрузочных работ более эффективно.

Кроме этих областей роботы с успехом используются в различных областях производства, в быту, при исследовании космоса, дна океанов, зон, подверженных радиации и стихийным бедствиям, шахт и т.д.

Итак, роботы и манипуляторы применяются во многих сферах человеческой деятельности. Поэтому потребность в увеличении их производства растет с каждым днем. Это можно достичь за счет их автоматизированного проектирования и производства.

Одним из важных вопросов при создании робототехнических систем является организация информационного обеспечения систем автоматизированного проектирования. Знания и базы данных, их системы управления обеспечивают создание интеллектуальных программных средств, повышающих гибкость и надежность информационного обеспечения проектных операций. Одной из основных особенностей робототехнических систем является создание компьютерных моделей, позволяющих определять движения объекта и отдельных его узлов, геометрическое описание деталей, непрерывная отчетность, автоматизация технологической документации с использованием типовых решений без проведения натурных испытаний. Компьютерная модель объекта может быть использована на всех этапах развития производства. Особую роль в этой области играет создание дизайнерских 3D-моделей. Оно позволяет оценить прочностные свойства элементов и оптимизировать их с точки зрения запаса прочности и веса.

В статье рассматривается программирование двуручного робота-манипулятора и его применение в технических процессах.

ГИБКИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ (ГПС)

Рассматривая производственную систему как объект проектирования, важно выделить ряд формальных признаков, характеризующих новый системный подход. К таким признакам и характеристикам относятся:

- большое количество взаимозависимых и взаимодействующих элементов;
- многофункциональность и иерархичность структуры;
- общность цели и функционирования системы
- стохастический характер взаимодействия структурной системы, подсистем и элементов всей системы с внешним миром;
- множество эргономических функций, так как большая часть функций системы выполняются автоматами, а другая людьми.

Учитывая перечисленные выше признаки, приведем несколько понятий и определений, характеризующих производственную систему, ее подсистемы и элементы.

ГПС можно рассматривать в трех аспектах: функциональном, структурном и организационном.

Функциональный аспект определяет набор функций, которые выполняют ГПС, ее устройства и элементы. Эти функции выявлены на основе цели создания, т.е. составом выполняемых ГПС задач. В конечном итоге они определяют логику функционирования ГПС.

Структурный аспект состоит из построения ГПС как системы, исследование и определение ее состава. Он необходимо при синтезе структуры ГПС и ее анализа при проектировании.

Организационный аспект определяет отношение структуры ГПС конкретного предприятия к организационной группе, а также определяет вопросы, связанные с функциональной целью. К ним относятся:

- определение и систематизация состав задач, выполняемых при создании ГПС (т.е. определение функциональной структуры ГПС);
- обеспечить необходимый состав аппаратных средств информационного и программного обеспечения, а так же квалифицированного персонала, работающего с этими средствами (т. е. определить компонентную структуру ГПС);
- обеспечение целенаправленных действий путем объединения функциональных подсистем и отдельных элементов в существующую структуру производства (т.е. определение организационной структуры ГПС).

В общем случае, для целенаправленного функционирования ГПС необходимо обеспечить реализацию следующих задач:

- планирование, учет, диспетчеризация и контроль производственного процесса;
- сбор полуфабрикатов изделий, промежуточных материалов, инструментов и их транспортировка к технологическому оборудованию;
- загрузка и разгрузка оборудования;
- управление всем технологическим оборудованием;
- диагностика функционирования всех технических средств с указанием ошибок при принятии соответствующих решений в управляемом вычислительном комплексе;
- контроль точности обоснования продукции и качества обработки;
- диагностика состояния устройства и его автоматическая замена с внесением изменений в программу управления;
- подача дополнительных материалов, смазочно-охлаждающих жидкостей и др.;
- удаление отходов из рабочей зоне ГПС;
- монтаж комплектующих устройств и их настройка;
- техническое обслуживание и ремонт технических средств и др.

При определении функциональной структуры ГПС выполняется группировка однородных задач, выполняемых каждой функциональной подсистемой. Функционирование ГПС и ее подсистем осуществляется под влиянием входящих воздействий. Сигналы, характеризующие результаты функционирования ГПС и отражающие результат входного воздействия, называются выходными высотами. Входные воздействия формируются целенаправленно, что в основном необходимо для мгновенной адаптации ГПС от одной ситуации к другой. Возмущающие воздействия имеют случайный характер и обычно принимают форму потока неподвижной окружающей среды. Поток информации включает в себя информацию об окружающей среде, состоянии рассматриваемой ГПС и других системах, с которыми она взаимодействует. Материальный поток включает в себя разные виды ресурсов. Возмущающие воздействия, так же как и управляющие воздействия вызывают ответную реакцию ГПС, которая проявляется в изменении состояния элементов ГПС, их характеристик и выходных значений.

Обобщая вышесказанное, функциональную структуру ГПС можно объяснить как многоуровневую систему. Эта система функционирует в соответствии с заданной глобальной целью и объединяет большое количество взаимо-

связанных функциональных элементов, выполняющих несколько локальных целей. Реализация локальных целей обеспечивает достижение глобальной цели.

На основе принципа иерархической декомпозиции в структуре ГПС выделяются обеспечивающая и функциональная части.

Обеспечивающая часть ГПС состоит из технической, материальной, технологической, программной, математической, информационной и организационной частей.

Функциональная часть ГПС состоит из набора подсистем, выделенных по функциональным признакам.

Функциональные подсистемы в зависимости от выполняемых функций можно разделить на два типа: технологические и вспомогательные. К технологическому типу относятся подсистемы, реализующие данный технологический процесс, например, подсистему механического производства, подсистему литейного производства, подсистему сборного производства и т.д.

Подсистемы технологического обоснования формируются на базе различных видов производств, таких как механическая обработка, литье, сборка, штамповка, гальваника, лакировка, сварка и др.

Подсистема механической обработки сочетает в себе функции механизации и автоматизации переходов основной и вспомогательной обработки с момента передачи деталей на станок до момента передачи обрабатываемых данных, а также обеспечивает передачу различных сигналов и команд в другие подсистемы. Реализация этих функций осуществляется с помощью специально разработанных средств серийного или основного технологического оборудования (промышленных роботов, сборщиков, кассет деталей и инструментов и т. д.).

Вспомогательные подсистемы решают следующие задачи:

Подсистема перемещения объектов осуществляет складирование, транспортировку внутрицеховых и межмашинных деталей, передачу информации, монтаж и демонтаж технологического оборудования, также функции деталей и их переориентацию. Эта подсистема включает в себя автоматизацию, внутрицеховые склады, транспортные работы, конвейеры, транспортировщики, средства, выполняющие погрузочно-разгрузочные и транспортные работы.

О СТЕПЕНЯХ СВОБОДЫ МАНИПУЛЯТОРОВ

Рассмотрим вопрос об оперативной передаче листов (по сигналам обратной связи) двуручным роботом-манипулятором, расположенным между конвейерами.

Во-первых, необходимо определить степени свободы манипулятора. Число степеней свободы манипуляторов определяется после определения траектории операций, которые они будут выполнять в технологических процессах. Степень свободы определяется как выполнение любого из возможных действий в системе координат (трехмерной, рис. 1). Давайте посмотрим на возможные перемещения в пространстве. Как видно из рисунка, в пространстве возможно шесть степеней свободы. Предоставляя эти степени свободы механизмам, мы добиваемся автоматизации любого технологического процесса. Что касается степени свободы механизмов, то в одной кинематической паре их возможно от одного до пяти. Порядок степеней свободы классифицируется по классам кинематической пары. Кинематическая пара с одной степенью свободы принадле-

жит к пятому классу, кинематическая пара с двумя степенями свободы - к четвертому классу, кинематическая пара с тремя степенями свободы - к третьему классу, кинематическая пара с четырьмя степенями свободы - к второму классу и, наконец, кинематическая пара с пятью степенями свободы - к первому классу.

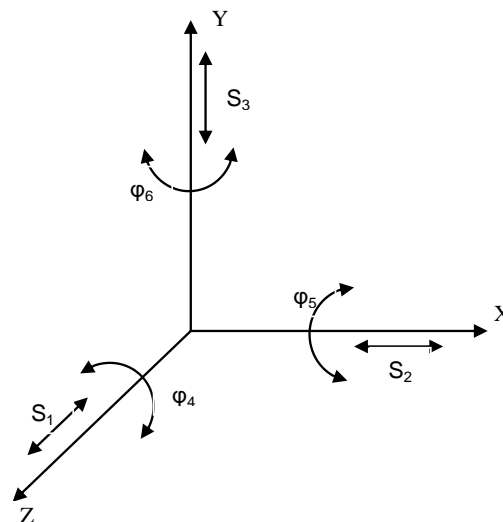


Рис 1. Степень свободы манипулятора в трехмерном пространстве

ПРОГРАММИРОВАНИЕ РОБОТОВ В ОБУЧАЮЩЕМ РЕЖИМЕ

Современный робот должен уметь перемещать данную деталь из любой возможной точки в другую с необходимой последовательностью и траекторией. Эта траектория может меняться в зависимости от заданных условий и потребностей. Для этого желательно иметь гибкую систему управления роботом. Программирование в режиме обучения считается одним из методов, используемых при программировании роботов. В этом режиме оператор заставляет робота двигаться по заданной траектории и одновременно контролирует, правильно ли робот пересекает эту траекторию. Учебный процесс включает в себя функции обучения, редактирования и исполнения. Координаты движения отдельных элементов запоминаются и записываются в память робота. В некоторых точках оператор может командовать другими устройствами в робототехническом комплексе. Режим обучения позволяет оператору управлять роботом в различных этапах производительности и достигать оптимального эффекта. Одним из преимуществ программирования в режиме обучения является то, что оператор может выбрать правильное (безопасное) место для наблюдения. С другой стороны, одно из преимуществ этого метода объясняется тем, что оператору, программирующему робота этим методом, не требуется большого производственного опыта. Может быть использован даже оператор без специальной подготовки по робототехнике. Благодаря обучающему режиму программу можно разработать в кратчайшие сроки. Отсутствие программирования в методике обучения объясняется использованием дополнительного оборудования. Однако современный научно-технический прогресс доказывает, что этот метод является наиболее выгодным и эффективным.

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПУЛЬТА УПРАВЛЕНИЯ

Выше мы упоминали, что этот тип программирования завершается оператором, перемещающим робота в требуемых координатах. Давайте посмотрим на программирование в следующем примере (рис. 2). Робот должен взять листы (одновременно две), которые идут с конвейером и находятся на подъемно-позиционирующем столе, и передать их в транспортную систему (конвейер) справа.

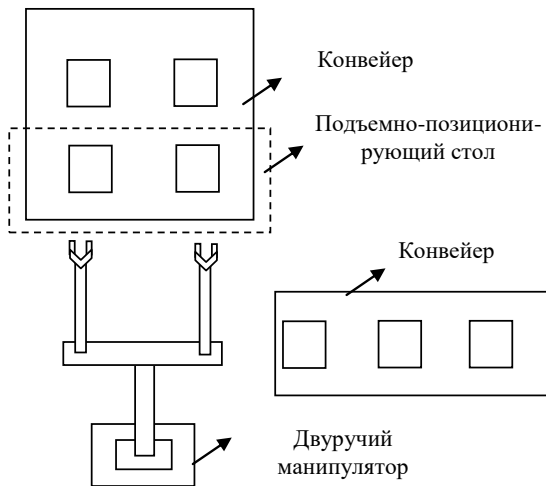


Рис. 2. Схема технологического процесса

Двурукий манипулятор позволяет брать эти листы парно. Это также позволяет выполнять работу быстрее.

Система управления роботом должна быть связана с системами управления обрабатывающего центра и обеих транспортных систем. Оператор шаг за шагом перемещает робота в течение всего цикла и записывает каждое движение в его память. Таким образом, необходимо разработать алгоритм, чтобы запрограммировать последовательность операций. Согласование задач точек привязки:

Шаг 1. Конвейер на рабочем состоянии.

Шаг 2. Наличие листов на конвейере перед манипулятором.

Шаг 3. Наличие листов в манипуляторе подъемно-позиционного стола.

Шаг 4. Двуручный манипулятор находится в исходном положении (т.е. манипулятор находится на конвейере).

Шаг 5. Захваты двуручного манипулятора открыты.

Шаг 6. Двуручный манипулятор наклоняется в сторону конвейера.

Шаг 7. Захватные устройства двуручного манипулятора прижимаются к листам.

Шаг 8. Отмечается точка привязки.

Шаг 9. Двуручный манипулятор берет листы. Теперь их можно поднимать.

Шаг 10. Отмечается точка привязки.

Шаг 11. Поднимите листы на центральную высоту обрабатываемого участка.

Шаг 12. Отмечается точка привязки.

Шаг 13. Перемещаем двуручный манипулятор так, чтобы листы можно было разместить на конвейере справа.

Шаг 14. Проверить правильность положения конвейера.

Шаг 15. Отмечается точка привязки.

Шаг 16. Манипулятор наклоняется к конвейеру, листы готовы к выпуску из обрабатываемого центра.

Шаг 17. Отмечается точка привязки.

Шаг 18. Поднимаем манипулятор до тех пор, пока между деталью и столом от обрабатываемого центра возникает расстояние (незначительное).

Шаг 19. Отмечается точка привязки.

Шаг 20. Тянем манипулятор назад, пока он не выйдет из рабочей зоны обрабатываемого центра.

Шаг 21. Отмечается точка привязки.

Шаг 22. Записываем цикл, вернув манипулятор в исходное положение.

Таким образом, после того, как все эти точки отмечены оператором, робот перемещается в цикле заданной последовательности операций. Кроме того, согласно требованиям технологической операции, оператор может вводить роботу команды ожидания в любых точках.

ВЫВОДЫ

Проанализированы степени свободы двуручного робота-манипулятора и изучены возможности управления движением робота в режиме обучения. При этом показано пошаговое программирование процесса через пульт управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лобарева Л.А. Программное обеспечение OLP промышленных роботов-манипуляторов / Л.А. Лобарева // Вестник Полоцкого государственного университета, серия С. – 2018.

2. Частиков А.П. Компьютерная симуляция программного управления виртуальным роботом: монография / А.П. Частиков, С.П. Глушко, К.Е. Тотухов. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 145 с.

3. Курышкин Н.П. Основы робототехники: учеб. пособие / Н.П. Курышкин. – Кемерово: Издательство КузГТО, 2012. – 168 с.

4. Рыжова Т.П. Система управления коллективом мобильных роботов: автореф. дис. ...канд. техн. наук. – Москва, 2013. – 16 с.

Application of Two-Handed Robotic Manipulators in Flexible Technological Processes

Khalilov E.O.

Mingachevir State University
Mingachevir, Azerbaijan
elnur_29@hotmail.com

Abstract. The study examines the use of two-handed robotic manipulators in the creation of robotic systems. It analyzes the best design methods for any technical area, highlighting the use of graphics and 3D animation to describe the simulation and its results. The number of degrees of freedom of manipulators, the operations that they will perform in technological processes have been analyzed. The trajectory of possible displacements is investigated in a three-dimensional coordinate system.

For this, the robot control system is flexible. The functionality of the training mode comes to the fore. With the help of this

mode, the methods used for programming robots are recorded. The learning process itself combines the functions of learning, editing and execution, as well as the benefits of functions such as recording the coordinates of movement of individual elements in the robot's memory.

Keywords: robot, manipulator, 3D model, robotic complex, degree, two-handed robot, gripping devices.

Модели на раскрашенных сетях Петри для управления техническим обслуживанием компьютерного оборудования предприятия

Орлов С.П., Учайкин Р.А.

Самарский государственный технический университет

Самара, Россия

orlovsp1946@gmail.com, uchaykinra@yandex.ru

Аннотация. Современное индустриальное предприятие имеет большое число компьютеров различных моделей, используемых для автоматизации производственных процессов и обработки информации. Эффективное и рациональное использование компьютерного оборудования неразрывно связано с временным расписанием процессов и учетом их особенностей. В статье рассмотрены известные подходы и методы управления жизненным циклом обслуживающего информационного сервиса, однако во многих случаях они направлены только на уменьшение стоимости оборудования и снижение эксплуатационных затрат. В настоящей работе предложена оптимизационно-имитационная процедура, заключающаяся в последовательном решении задачи оптимального распределения компьютеров и имитационном моделировании процессов при выполнении производственных задач. Разработана имитационная модель на базе временных раскрашенных сетей Петри. Модель состоит из компонентов, имитирующих техническое обслуживание компьютеров, случайные процессы появления отказов и вывода компьютеров из эксплуатации в ремонт. Рассмотрен пример построения фрагментов сети Петри для процесса конструкторской отработки изделия перед выпуском в производство. Определены условия возникновения конфликтов, рассчитан показатель изменения сроков выполнения задач. Предлагаемая методика построения имитационной модели может быть применена для оптимизации использования парка компьютерного оборудования предприятия.

Ключевые слова: вычислительная техника, техническое обслуживание, время наработки на отказ, имитационное моделирование, временные раскрашенные сети Петри.

ВВЕДЕНИЕ

Система управления жизненным циклом производственных систем (PLM) включает все этапы развития: от концептуального решения, проектирования и до завершения эксплуатации. В настоящее время имеется большое число теоретических и практических работ в области PLM [1, 2]. При этом создан ряд программных систем, поддерживающих технологию PLM [3]. Важнейшую роль в современном машиностроительном производстве играют информационные технологии и компьютерная техника. Комплекс средств вычислительной техники (СВТ) крупного предприятия насчитывает десятки тысяч единиц. В связи с этим возникает задача эффективного использования СВТ как с точки зрения финансовых затрат, так и обеспечения производственных и бизнес-процессов. В настоящее время активно развивается подход ITSLM (IT

Service Lifecycle Management), обеспечивающий оперативность и прозрачность поддержки ИТ-процессов и снижающий стоимость затрат при реализации их на предприятии [4, 5].

Традиционный подход к управлению СВТ на крупном предприятии связан с финансовым и материально-техническим учетом компьютерного оборудования [8]. При этом в стороне остаются проблемы эффективной организации информационно-вычислительных процессов в связи с выполняемыми задачами проектирования, конструирования и производства изделий. Часто возникают ситуации, когда при выходе из строя компьютера уникальной конфигурации в резерве отсутствует оборудование для немедленной замены. Это приводит к сдвигу сроков выполнения производственных задач.

Особенность современного состояния управления СВТ в том, что в процессе их эксплуатации, как правило, управленческие задачи решает отдельное подразделение информационных технологий. В его функции входит анализ потребностей в СВТ и сопровождение технического состояния компьютерного оборудования и программных средств. Вопросы распределения компьютерного оборудования часто решаются административными методами, без учета особенностей выполняемых задач, их временных графиков. Периодичность регламентного обслуживания СВТ и организация ремонта, создание обоснованного резерва СВТ, учитывающих графики календарного планирования бизнес-процессов, выполняются не всегда эффективно.

На многих машиностроительных предприятиях принятие решений о распределении компьютеров между проектными подразделениями происходит без учета производственной программы и конкретных графиков проектных процессов. Не рассматриваются вопросы перераспределения высвобождающихся вычислительных ресурсов. Отсутствует системный подход к использованию новых видов компьютерных ресурсов: облачных технологий, виртуальных сетей, хранилищ данных.

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ

В работах [6, 7] предлагаются сложные сетевые модели для изучения влияния структуры связи на совместное использование вычислительных ресурсов в Системах систем (SoSs). Эти подходы ориентированы на социотехнические системы.

Задача осложняется высокой степенью неопределенности при учете всех факторов, влияющих на эффектив-

ное использование компьютерного оборудования [9].

Модели и задачи сетевого программирования для оптимизации ИТ-процессов на этапах жизненного цикла рассмотрены в работе [10]. При этом использованы критерии, учитывающие инвестиционные затраты на реализацию ИТ-проектов и изменение операционных затрат на их эксплуатацию.

Подходы к оптимизации доступности и стоимости ИТ-услуг рассмотрены в статьях [11, 12]. В этих работах определяется многокритериальная проблема распределения избыточности для проектирования ИТ-услуг. Используется моделирование сети Петри методом Монте-Карло, при этом оценивается доступность и стоимость конкретного ИТ-продукта. Также здесь рассмотрен адаптированный генетический алгоритм для оптимизации затрат на поддержку ИТ-системы поставщика прикладных услуг.

В работах [13 -14] были предложены оптимизационные модели распределения СВТ, учитывающие технические характеристики компьютерного оборудования и структуру каналов связи. Этот подход был нами развит в работах [15, 16], где была поставлена и решена задача дискретной оптимизации с булевыми переменными. Ограничения задачи учитывали многообразие номенклатуры серверов, рабочих станций, инженерных и офисных компьютеров.

Однако решение статического распределения компьютерного оборудования по подразделениям предприятия не дает информации об эффективном использовании СВТ в течение жизненного цикла. Остаются не рассмотренными условия возникновения конфликтных ситуаций, связанных с недостаточностью вычислительных ресурсов, необходимостью периодического технического обслуживания и выполнения ремонтных работ. Для решения этой проблемы мы предложили использовать оптимизационно-имитационный подход, при котором решение оптимизационных задач распределения на следующем этапе верифицируется на имитационной модели [17, 18].

В настоящей статье рассмотрены имитационные модели на временных сетях Петри, которые применяются для исследования эффективности использования компьютерного оборудования в процессе проектирования и производства промышленных изделий с учетом регламентного технического обслуживания и ремонтных операций СВТ.

ЗАДАЧА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТЕХНИКИ ПО ПОДРАЗДЕЛЕНИЯМ ПРЕДПРИЯТИЯ

Решение задачи базируется на оптимизационно-имитационном подходе, который реализуется в виде итерационной процедуры с двумя последовательными этапами: 1) решение оптимизационной модели ОМ с аналитическими ограничениями R_{AN} , 2) исследование имитационной модели ИМ с алгоритмическими ограничениями R_{AL} (рис. 1).

Оптимизационная модель позволяет получить статическое распределение компьютеров по подразделениям или производственным участкам индустриального предприятия при задании критерия минимальной стоимости оборудования и эксплуатации. На имитационной модели проверяется корректность назначения компьютеров на различные задачи.

Оптимизационная задача задается в виде

$$Y_{OM} = \arg \text{extr}(F(Y)) \quad (1)$$

с аналитическими ограничениями R_{AN} в форме:

$$f_i(Y) \leq 0, i \in I, \quad (2)$$

где F - целевая функция с заданными критериями оптимизации, $Y: X \rightarrow Z$ - возможные распределения единиц вычислительной техники X на работы Z .

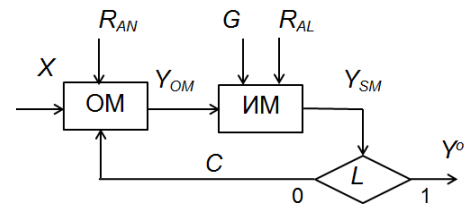


Рис. 1. Оптимизационно-имитационная процедура решения задачи распределения СВТ

В результате первоначального планирования работы определяется диаграмма Ганта, согласно которой задаются времена и последовательность выполнения отдельных задач

$$G = (Z_p, T_p, V_G),$$

где $Z_p = \{z_1, \dots, z_{M_z}\}$ – конструкторские (проектные, технологические, производственные) задачи; $T_p = \{\tau_1, \dots, \tau_{M_z}\}$ – множество заданных длительностей выполнения сроков задач и; V_G – связи между задачами.

Таким образом, после получения решения Y_{OM} оптимизационной задачи (1) – (2) и используя диаграмму Ганта G , следует найти отображение $(G, Y_{OM}) \rightarrow \Psi_{SM}$ в имитационную модель с учетом алгоритмических ограничений R_{AL} .

Искомое распределение Y^0 компьютерного оборудования есть матрица с булевыми переменными $\{y_{ij}\}$, при этом $y_{ij} = 1$, если компьютер с индексом i назначен работе z_j ; $y_{ij} = 0$ – в противном случае.

Условие L проверяет, удовлетворяет ли решение Y_{SM} алгоритмическим ограничениям, и при необходимости передает управление на коррекцию C оптимизационной модели ОМ.

РАСКРАШЕННЫЕ СЕТИ ПЕТРИ ПРИ ИМИТАЦИОННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В статье [18] нами была предложена графовая модель взаимодействия комплекса средств вычислительной техники и выполняемых в подразделении предприятия задач.

Модель приведена на рис. 2 и представляет собой двудольный граф с множеством вершин Z задач и множеством вершин U компьютеров. Рассматривается множество из шести компьютеров u_1, \dots, u_6 , которые назначаются для управления и обработкой данных в производственном процессе из шести задач z_1, \dots, z_6 .

Предположим, что было проведено решение оптимизационной модели ОМ и получен булевый вектор Y_{OM} распределения компьютеров для задач. При этом компьютер u_6 находится в резерве.

Компьютер u_2 выходит из строя, выводится из эксплуатации и передается в ремонт **Repair** (дуга *Out*). Тогда резервный компьютер u_6 передается для выполнения задачи z_2 (дуга *Rp*). Компьютер u_2 после ремонта переводится в резерв **Reserve** (дуга *Rt*). Другая ситуация - компьютер

u_3 по регламенту выводится на техническое обслуживание **Maintenance** (дуга *Out*). Для исключения простоя задачи z_3 необходимо использовать другой компьютер. Однако в резерве свободных компьютеров в данный момент нет. Тогда для задачи z_3 используется компьютер u_4 (дуга *Rp*) при условии, что задача z_4 еще не начиналась. Компьютер u_3 возвращается из технического обслуживания и, соответственно, компьютер u_4 возвращается для выполнения z_4 . Такая схема распределения компьютерных ресурсов будет работать корректно при выполнении определенных временных условий. Например, задача z_4 может не получить в нужный момент ресурс компьютера u_4 , если будет превышено время технического обслуживания u_3 .

В настоящее время аппарат временных сетей Петри широко используется для имитационного моделирования процессов и систем как в информационных технологиях, так и в промышленном производстве [19, 20]. При изучении объектов, описываемых мультимножествами параметров, целесообразно применять временные раскрашенные сети Петри [21]. С этой целью будем использовать инструментальную программную систему CPN Tools [22].

Раскрашенная сеть Петри - это графоориентированный язык для описания, проектирования и имитации распределенных систем и параллельных процессов.

Временные сети Петри отличаются от классических маркированных сетей введением задержек срабатывания переходов и временными метками для задержки маркеров в позициях. Раскрашенная сеть Петри, кроме того, отличается наличием цветов, приписываемых позициям.

Формальное определение временной раскрашенной сети Петри задается следующим образом:

$$PN_{tc} = (P, T, C, R^-, R^+, \mu_0, V, S),$$

где P – конечное непустое множество позиций, T – конечное непустое множество переходов, C – множество цветов сети, R^- – блочная матрица инцидентности входящих дуг для переходов, R^+ – блочная матрица инцидентности выходящих дуг из переходов, μ_0 – матрица начальной разметки сети, V – вектор временных штампов позиций, S – вектор задержек срабатывания переходов.

Представленная на рис. 2 схема носит упрощенный характер. В реальных условиях каждой задаче может быть назначен набор различных компьютерных единиц.

В соответствии со структурой данных, принятой при постановке задачи оптимального распределения в [16], будем описывать компьютер кортежем $(n, conf, type)$. Здесь n – индивидуальный номер, $type$ – модель (тип) компьютера и $conf$ – конфигурация заданного типа компьютера. Тогда набор компьютеров для некоторой задачи z_k может быть представлен мультимножеством

$$U_k = \{(n_{1k}, conf_{1k}, type_{1k}), \dots, (n_{jk}, conf_{jk}, type_{jk})\},$$

причем элементы U_k могут повторяться.

Структуры мультимножеств хорошо моделируются в раскрашенных сетях Петри.

На рис. 3 показан фрагмент Z_k раскрашенной сети Петри, которая имитирует выполнение работы **Activity** с назначенным ей набором компьютеров U_k и процессами технического обслуживания **Maintenance** и ремонта **Repair**. Из таких фрагментов конструируется вся сеть для производственного процесса с множеством задач Z .

Поскольку моделируемый производственный процесс

циклически повторяется, то имитация в модели сети Петри выполняется многократно. Однако в определенные моменты времени в позициях и появляются маркеры, соответствующие событиям: **M** – вывод компьютера на техническое обслуживание или **F** – отказ компьютера и вывод на ремонт. Вывод компьютера из позиции **Uk** приводит к остановке процесса **Activity** до завершения обслуживания и возврата компьютера из позиции резерва **Reserve**.

Рис. 2. Графовая модель взаимодействия производственных задач и набора обслуживающих компьютеров

Рис. 3. Фрагмент задачи с набором компьютеров и организацией ремонта или технического обслуживания

Сеть Петри на рис. 4 включает позицию **Uk** с определенным мультимножеством цветов и описывает процесс случайного выбора компьютера, в котором происходит отказ (**Failure**).

В этом примере предполагается, что задаче назначен набор из четырех компьютеров. В нотации CPN Tools эта информация записывается в виде:

$$1^*(1, 2, "Type 1")@0+++1^*(2, 1, "Type 2")@0+++1^*(3, 1, "Type 3")@0+++1^*(4, 5, "Type 4")@0,$$

где @ – признак временной метки, знак +++ – опера-

Данные исследуемых задач производственного процесса

Задача	τ , дни	Содержание	Набор назначенных компьютеров
z_1	20	Анализ образцов изделия	Тип 1, конфигурация 1 Тип 2, конфигурации 1 и 2
z_2	10	Выбор оптимального технического решения	Тип 1, конфигурация 1 Тип 2, конфигурация 1 Тип 4, конфигурация 1
z_3	10	Выбор конструктивных элементов изделия	Тип 1, конфигурация 1 Тип 2, конфигурация 2 Тип 3, конфигурация 1 Тип 4, конфигурация 2
z_4	5	Выбор материалов для изготовления	Тип 4, конфигурации 1 и 2
z_5	20	Разработка конструкции изделия	Тип 1, конфигурация 1 Тип 2, конфигурации 1 и 2 Тип 4, конфигурация 2
z_6	10	Выполнение технической документации и сдача изделия в производство	Тип 1, конфигурация 1 Тип 4, конфигурация 2 Тип 4, конфигурация 2

Будем использовать следующее выражение для описания временного состояния компьютера в модели:

$$u_k(t) = ((n_{ik}, conf_{ik}, type_{ik}), t_M, t_{RUL}), \quad (3)$$

где t_M - оставшееся время до технического обслуживания, t_{RUL} - время наработки на отказ (RUL).

На основе рассмотренных ранее фрагментов сетей Петри сконструирована общая модель процесса Z , представленная на рис. 5. Реализация имитационной модели выполнена средствами системы CPN Tools, в соответствии с языком которой описаны типы множеств цветов и переменных:

```
colset Z=unit with Task timed;
var z: Z;
colset B = bool with (No, Yes) timed;
var b: B;
colset INT=int timed;
colset N= INT;
colset Conf=INT;
colset TYPE=string;
colset Up=product N*Conf*TYPE timed;
var n:N;
var conf: Conf;
var tp: TYPE;
var v: Up;
```

Решение Y_{OM} оптимизационной задачи (1) – (2) дает распределение компьютеров из табл. 1 по задачам с условием выполнения необходимых ограничений. Это распределение на модели отражается в виде мультимножеств в позициях U_k .

Переходы tz_1, \dots, tz_6 имитируют выполнение соответствующих задач z_1, \dots, z_6 . Для этого каждому переходу назначена задержка срабатывания τ из табл. 1. Начальные разметки позиций U_1, \dots, U_6 содержат маркеры компьютеров, распределенных на соответствующие задачи. Дуги, соединяющие позиции компьютеров с переходами, двунаправленные, что обеспечивает постоянство маркеров в этих позициях. В результате осуществляется циклический процесс выполнения задач. Кроме того, дугам приписаны условия, показывающие, какие компьютеры должны участвовать в выполнении данной задачи.

ция сложения временных мультимножеств.

Случайный характер появления отказов компьютеров имитируется функцией пуассоновского закона на входной дуге, принимающей маркеры в позицию **Failure**. Техническое обслуживание компьютеров выполняется каждые 100 дней. На рис. 4 показано состояние сети Петри через 186 дней. При этом на 90-м дне произошел отказ компьютера (2, 1, "Type 2"), а через 4 дня он был отремонтирован и возвращен в эксплуатацию.

Компьютер (4, 5, "Type 4") на 100-й день выведен на техническое обслуживание и возвращен в **Uk** через 2 дня, а компьютер (1, 2, "Type 1") на 201-й день будет обслужен и переведен в резерв (позиция **Reserve**).

Рис. 4. Генерация отказов и вывод компьютеров на ремонт и техническое обслуживание

Аналогичная логика сети Петри использована при имитации процесса технического обслуживания компьютеров. Отличие состоит в том, что вывод компьютеров на обслуживание производится не случайным образом, а по заранее известному графику. Рассмотренные фрагменты раскрашенных сетей Петри использованы при построении общей имитационной модели для конкретного производственного процесса.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА

Предлагаемая модель ориентирована на использование на крупном машиностроительном предприятии, на котором существует большое число проектных, конструкторских и производственных процессов.

Будем рассматривать процесс Z конструкторской разработки выпуска некоторого изделия. Пусть в результате иерархической декомпозиции работ получена совокупность частных задач z_k и определена диаграмма Ганта G . Соответствующие данные приведены в табл. 1.

В группу компьютеров, обеспечивающих производственный процесс Z , входят следующие типы: графические рабочие станции Тип 1, Тип 2 и Тип 3 и инженерный компьютер Тип 4. Каждый тип компьютера может иметь несколько конфигураций, различающихся производительностью, объемом памяти и другими характеристиками.

Если происходит отказ в компьютере или вывод компьютера на техобслуживание, то маркер этого компьютера изымается из разметки позиции **Uk**. Условие на дуге уже не выполняется и переход не сработает, т.е. выполнение задачи заблокируется до возвращения компьютера в эксплуатацию.

В данной модели используется иерархическая органи-

зация сети Петри. Позиции **Uk** компьютеров, в свою очередь, представлены фрагментами временных раскрашенных сетей, показанных на рис. 4. Эти сетевые фрагменты моделируют случайный пуассоновский поток отказов, а также расписание технического обслуживания компьютеров. Позиция **N** служит для подсчета количества циклов выполнения совокупности задач z_1, \dots, z_6 .

Рис. 5. Имитационная модель на временной раскрашенной сети Петри Z

ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В процессе имитации фиксировался коэффициент невыполнения работ в срок:

$$K_Z = \Theta_S(\lambda, t_M, t_O, t_R) / \Theta_Z,$$

где Θ_Z – плановый срок выполнения всей работы Z, рассчитанный по диаграмме Гантта, Θ_S – время выполнения работы Z на имитационной модели, λ – интенсивность отказов, t_M – период между техническим обслуживанием оборудования, t_O – время технического обслуживания, t_R – время ремонта компьютера.

Выход из строя любого компьютера, назначенного задачам на критическом пути, приводит к сдвигу срока выполнения всей работы.

Аналогично, вывод компьютера на техническое обслуживание в момент выполнения задачи, находящейся на критическом пути, также задерживает завершение работы. Эти ситуации моделируются на рассматриваемой имитационной модели.

Моделирование отказов компьютеров проводится в предположении о стационарности, ординарности и отсутствия последствия в потоке событий. Тогда можно использовать распределение Пуассона с интенсивностью λ .

Исходные данные для имитационного эксперимента приведены в Таблице 2.

Таблица 2

Исходные данные для имитационного эксперимента

Параметр	Значения параметра		
Интенсивность λ	0,015	0,022	0,03
Время до технического обслуживания, t_M (день)	75	100	125
Время ремонта компьютеров, t_R (день)	2	4	6

На рис. 6 приведен один из графиков, полученных по

результатам имитации процесса.

Рис. 6. Диаграмма зависимости коэффициента K_Z от времени до технического обслуживания t_M и времени ремонта компьютеров t_R при $\lambda=0,022$:
1 - $t_R = 2$ дня; 2 - $t_R = 4$ дня; 3 - $t_R = 6$ дней

Допустимое значение сдвига срока выполнения работы было принято $K_Z = 1,03$. Таким образом, при плановом сроке равном 100 дням допускается сдвиг не более, чем на три дня.

Анализ графиков на рис. 6 показывает, что наибольшее влияние имеет частота повторения технического обслуживания. Это обусловлено тем, что при высокой надежности компьютеров слишком частое техническое обслуживание становится причиной приостановки выполнения отдельных задач.

Алгоритм выявления конфликтных ситуаций с ресурсами заключается в следующих операциях.

1. Анализ времени окончания всех задач и вычисление коэффициента K_Z . Если допустимое значение K_Z не пре-

вышено, то выполняется повторение имитации с другими параметрами.

2. В противном случае, определяется, на каком шаге и при выполнении какой задачи был проведен ремонт или обслуживание компьютера.

3. Выполняется коррекция распределения Y_{OM} компьютеров путем нового решения оптимизационной задачи.

Полный анализ результатов имитационного эксперимента позволяет определить:

а) наилучшее значение периода технического обслуживания;

б) максимально допустимое время ремонта компьютеров различных конфигураций;

в) определение оптимального набора компьютеров в резерве;

г) выявить критические задачи и скорректировать предварительное распределение компьютеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование аппарата временных раскрашенных сетей Петри обеспечивает описание различных факторов, влияющих на совместное выполнение производственного процесса и обработки данных и управления с помощью компьютерной техники.

Дальнейшие исследования предполагается вести в направлении использования прогнозного диагностического обслуживания [23]. В частности, большое значение имеет исследование взаимной связи между предшествующими периодами эксплуатации компьютеров и прогнозируемыми отказами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chryssolouris G. Manufacturing systems: Theory and practice / G. Chryssolouris. – 2nd ed. – New York: Springer Verlag, 2010. – 606 p.

2. Grieves M. Product lifecycle management: Driving the next generation of lean Thinking / M. Grieves. – New York: The McGraw-Hill Education, 2005. – 288 p.

3. Xcelerator – Embrace the Digital Future – URL: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/> (дата обращения 20.12.2020).

4. Cannon D. ITIL service strategy, 2011 edition / D. Cannon. – London: The Stationery Office, 2011.

5. Jamous N. Towards an IT service lifecycle management (ITSLM) concept / N. Jamous, S. Bosse, C. Görling, J. Hintsch, A. Khan, F. Kramer, H. Müller, K. Turowski / 4th International Conference on Enterprise Systems (ES) (Melbourne, VIC). – Melbourne, 2016. – P. 29-38.

6. Mosleh M. Resource allocation through network architecture in systems of systems: A complex networks framework / M. Mosleh, P. Ludlow, B. Heydari // Proc. of the 2016 Annual IEEE Systems Conf. (SysCon) (Orlando, FL, USA). – Orlando, 2016. – P. 1-5.

7. Mosleh M. Distributed resource management in systems of systems: An architecture perspective / M. Mosleh, P. Ludlow // System Engineering. – 2016. – № 19 (4). – P. 362-374.

8. Democ V. Proposal for optimization of information system / V. Democ, Z. Vyhnalikova, P. Alac // Procedia Economics and Finance. – 2015. – № 34. – P. 477-484.

9. Gromov Y.A. Determination of information system structure parameters in conditions of uncertainty / Y.A. Gromov, Y. Minin, S. Kopylov, A.A. Habib Alrammahi, F.

Sarit // Proceedings of 1st Int. Conf. on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA. – 2019. – P. 338-343.

10. Zymin A.V. Models and mechanisms for planning service improvements / A.V. Zymin, I.A. Zolin, I.V. Burkova, V.V. Zimin // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2020. – Vol. 865. – 012016.

11. Bosse S. Multi-objective optimization of IT service availability and costs reliability / S. Bosse, M. Splieth, K. Turowski // Engineering & System Safety. – 2016. – Vol. 147. – P. 142-155.

12. Bosse S. Optimizing IT service costs with respect to the availability service level objective / S. Bosse, M. Splieth, K. Turowski // 10th International Conference on Availability, Reliability and Security (ARES) (Toulouse, France). – Toulouse, 2015. – Vol. 1. – P. 20-29.

13. Дидрих В.Е. Задача распределения ресурсов в сетевой информационной системе / В.Е. Дидрих, И.В. Дидрих, Ю.Ю. Громов, М.А. Ивановский // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2016. – Т. 22, № 4. – С. 541-549.

14. Ауад М. Оптимизационные задачи выбора и распределения ресурсов в информационных системах / М. Ауад, В.В. Борщ, А.В. Лазаренко, Ю.В. Минин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2014. – № 1. – С. 43-46.

15. Учайкин Р.А. Задача распределения средств вычислительной техники на машиностроительном предприятии / Р.А. Учайкин, С.П. Орлов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2019. – Вып. 4(69). – С. 84-98.

16. Orlov S.P. System models of organization the use of computer equipment for mechanical engineering production / S.P. Orlov, R.A. Uchaikin, A.V. Burkovsky // IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng. – 2020. – Vol. 862. – 042004.

17. Antonova G.M. Modern ability of optimization-simulation approach / G.M. Antonova, A.D. Tsvirkun // IFAC Proceedings. – 2008. – Vol. 41(2). – P. 15811-15816.

18. Uchaikin R.A. Optimization-simulation approach to the computational resource allocation in a mechanical engineering enterprise / R.A. Uchaikin, S.P. Orlov // Journal of Phys.: Conf. Ser. – 2020. – Vol. 1679. – 032015.

19. Silva J.R. Timed Petri nets / J.R. Silva, P.M.G. del Foyo // Petri Nets – Manufacturing and Computer Science. – IntechOpen, 2012. – Chapter 16. – P. 359-378.

20. Pla A. Petri net based process monitoring. A workflow management system for process modeling and monitoring / A. Pla, P. Gay, J. Melendez, B. Lopez // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2014. – Vol. 25. – P. 539-554.

21. Jensen K. Coloured Petri nets: Modelling and validation of concurrent systems / K. Jensen, L.M. Kristensen. – Berlin: Springer Berlin, 2014.

22. CPNTools. Modeling with Coloured Petri Nets – URL: <http://cpntools.org/2018/01/16/getting-started/> (дата обращения 20.12.2020).

23. Cachada A. Maintenance 4.0: Intelligent and predictive maintenance system architecture / A. Chachada et al. // 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) (Turin, Italy). – Turin 2018. – P. 139-146.

Colored Petri Net Models for Computer Equipment Maintenance Management at an Enterprise

Orlov S.P., Uchaikin R.A.

Samara State Technical University

Samara, Russia

orlovsp1946@gmail.com, uchaykinra@yandex.ru

Abstract. Modern industrial enterprise has many different computer models used for the automation of production processes and information processing. Effective and efficient use of computer hardware is inextricably linked with the schedule of operations and their specific features. The article discusses the well-known approaches and methods of information technology service lifecycle management. Still, in many cases, they aim only to reduce the equipment and operating costs. This paper proposes an optimization-simulation procedure, which consists of the sequential solution of the computer's optimal distribution problem and simulation of processes when performing production tasks. A simulation model has been developed based on timed colored

Petri nets. The model consists of components that simulate extracting computers for maintenance and repair and a random process of failures. An example of the Petri net fragments for the operation of design development of a product before release into production is considered. The conflict occurrence conditions are determined; the completion time shift factor is calculated. The proposed method for constructing a simulation model can be applied to optimize using the enterprise's computer equipment.

Keywords: computer technology, maintenance, remaining useful life, simulation, timed colored Petri nets.

Исследование работы замкнутой системы управления процессом аддитивного формообразования с помощью модели нелинейного теплообмена

Гапонова Д.А., Родякина Р.В., Щербаков А.В.
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Москва, Российская Федерация
reginarodyakina@mail.ru

Аннотация. Описана математическая модель, предложенная авторами для исследования процессов нелинейного теплообмена при электронно-лучевой наплавке с прямой подачей присадочного материала в область воздействия источника нагрева. Модель реализована в виде компьютерной программы на основе численных методов решения уравнения энергии с подвижными граничными условиями. Описан алгоритм, позволяющий учитывать скрытую теплоту плавления при расчете температурного поля. С использованием данной дескриптивной модели и дискретной модели ПИД-регулятора разработана квазинормативная модель, позволяющая анализировать процессы замкнутого управления для стабилизации температуры наплавляемого слоя. Показана принципиальная возможность применения ПИ- и ПИД-регуляторов для управления мощностью источника нагрева при многослойной наплавке прямой стенки из стали AISI 316L, а также необходимость отключения обратной связи при переходе от одного слоя к другому.

Ключевые слова: аддитивное формообразование, теплообмен, нормативная модель, цифровой двойник, ПИ-регулятор, ПИД-регулятор.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в промышленности широко внедряются технологии быстрого прототипирования с применением металлических материалов. В качестве источника энергии для расплавления металла выступает лазерный или электронный луч [1]. Применение технологий быстрого прототипирования с прямой подачей материала (Direct Metal Deposition, DMD) позволяет снизить затраты на производство за счет того, что используется практически 100% подаваемого материала. Большой интерес представляет технология электронно-лучевого аддитивного формообразования, где в качестве материала выступает металлическая проволока, а источником энергии является электронный пучок [2,3]. Технология еще не используется повсеместно в промышленности, так как не существует готовых решений в области систем управления. На данный момент многие исследователи занимаются разработкой различных (замкнутых и разомкнутых) систем управления [4,5,6]. Для разработки систем управления процессом необходимы как теоретические, так и экспериментальные методы. Теоретические методы (математическое моделирование) позволяет оценить влияние изменения теплофизических свойств материала в процессе наплавки

на структуру наплавляемого валика, рассчитать параметры для каждого материала (мощность пучка, размеры пятна на нагрев). Используя математическое моделирование можно рассчитать необходимое уменьшение или увеличение вводимой в изделие мощности во избежание перегрева. Сложность разработки системы управления для электронно-лучевого аддитивного формообразования заключается в том, что необходимо контролировать большое количество параметров в режиме реального времени, а именно: мощность пучка, размеры пятна нагрева, скорость подачи проволоки, температуру валика, высоту наплавляемого изделия. В настоящее время уже существуют разработки в этой области, но пока этого недостаточно для того, чтобы использовать эти методы в промышленности [7,8]. Разработки замкнутых систем ведутся и для процессов, использующих другие источники нагрева – лазерный луч [9] и электрическую дугу [10], что также подтверждает актуальность данного исследования. Для оценки возможности создания замкнутой системы управления процессом электронно-лучевого аддитивного формообразования в данной статье предлагается разработать математическую модель процесса наплавки валика и оценить результаты моделирования с применением обратной связи по температуре на основе различных законов регулирования.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА

Для моделирования процесса электронно-лучевого наплавки с замкнутым регулированием температуры предлагается использовать уравнение энергии. Процесс переноса тепла в наплавленном слое может быть описан с помощью нестационарного уравнения энергии

$$\rho(T) \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\lambda(T)}{c(T)} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\lambda(T)}{c(T)} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\lambda(T)}{c(T)} \frac{\partial H}{\partial z} \right) + Q, \quad (1)$$

где H – энтальпия, Дж/кг, t – время, с, $\rho(T)$ – плотность материала, кг/м³, Q – количество теплоты от внутренних источников энергии в единицу объема в единицу времени, Вт/м³, x , y , и z – декартовы координаты текущей расчетной точки, м, $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К), $c(T)$ – теплоемкость материала, Дж/(кг·К).

Для решения уравнения был использован метод Яненко (метод дробных шагов) [11] и неявная разностная схема. Неявная схема в этом случае решается методом про-

гонки. На прямом ходе метода прогонки рассчитываются прогоночные коэффициенты [12], а на обратном ходе рассчитывается энтальпия. Расположение контрольных объемов и шаблон схемы показаны на рис. 1.

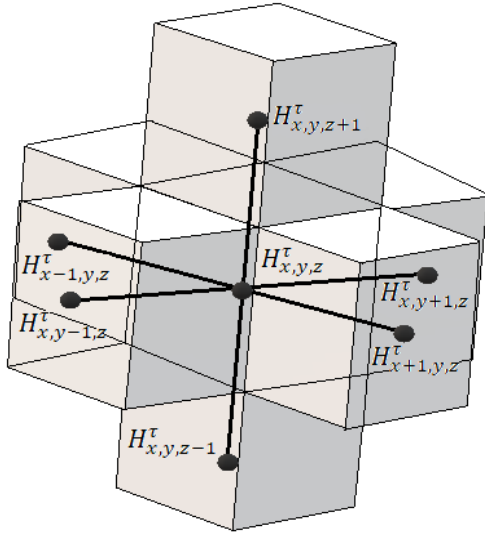


Рис. 1. Расположение контрольных объемов

В соответствии с методом Яненко многомерные уравнения разбиваются на одномерные по каждой координате x , y и z :

$$\frac{H_{x,y,z}^{\tau+\frac{1}{3}} - H_{x,y,z}^{\tau}}{\Delta\tau} = \frac{\lambda(T_{x,y,z}^{\tau})}{c(T_{x,y,z}^{\tau})\rho(T_{x,y,z}^{\tau})\Delta x^2} \times (H_{x-1,y,z}^{\tau+\frac{1}{3}} - 2H_{x,y,z}^{\tau+\frac{1}{3}} + H_{x+1,y,z}^{\tau+\frac{1}{3}}) + \frac{1}{3} \frac{Q_{x,y,z}^{\tau}}{\rho(T_{x,y,z}^{\tau})}, \quad (2)$$

$$\frac{H_{x,y,z}^{\tau+\frac{2}{3}} - H_{x,y,z}^{\tau+\frac{1}{3}}}{\Delta\tau} = \frac{\lambda\left(T_{x,y,z}^{\tau+\frac{1}{3}}\right)}{c\left(T_{x,y,z}^{\tau+\frac{1}{3}}\right)\rho\left(T_{x,y,z}^{\tau+\frac{1}{3}}\right)\Delta y^2} \times (H_{x,y-1,z}^{\tau+\frac{2}{3}} - 2H_{x,y,z}^{\tau+\frac{2}{3}} + H_{x,y+1,z}^{\tau+\frac{2}{3}}) + \frac{1}{3} \frac{Q_{x,y,z}^{\tau}}{\rho(T_{x,y,z}^{\tau+\frac{1}{3}})}, \quad (3)$$

$$\frac{H_{x,y,z}^{\tau+1} - H_{x,y,z}^{\tau+\frac{2}{3}}}{\Delta\tau} = \frac{\lambda\left(T_{x,y,z}^{\tau+\frac{2}{3}}\right)}{c\left(T_{x,y,z}^{\tau+\frac{2}{3}}\right)\rho\left(T_{x,y,z}^{\tau+\frac{2}{3}}\right)\Delta z^2} \times (H_{x,y,z-1}^{\tau+1} - 2H_{x,y,z}^{\tau+1} + H_{x,y,z+1}^{\tau+1}) + \frac{1}{3} \frac{Q_{x,y,z}^{\tau}}{\rho(T_{x,y,z}^{\tau+\frac{2}{3}})}, \quad (4)$$

где $H_{x,y,z}^{\tau}$ представляет значение энтальпии в каждом узле сетки с индексами x , y , и z на временном шаге τ ; $\Delta\tau$ – временной шаг, c , $\Delta x = \Delta y = \Delta z$ – координатный шаг, м. Как видно из выражений (2)–(4), для учета температурных зависимостей коэффициентов уравнения $\rho(T)$, $\lambda(T)$ и $c(T)$, при расчете энтальпии на текущем временном шаге, значения данных коэффициентов брались для температур, рассчитанных на предыдущем дробном шаге. Температурные зависимости ρ , λ и c для рассматриваемых материалов – сталей аустенитного класса, были взяты из литературных данных [13].

На прямом ходе прогонки находятся прогоночные коэффициенты, которые определяются при преобразовании уравнений в трехдиагональную матрицу. На обратном ходе рассчитывается энтальпия, которая связана с температурой металла следующими выражениями:

$$H(T) = \begin{cases} \int_{25^{\circ}\text{C}}^T c(T)dT, & T < T_S \\ \int_{25^{\circ}\text{C}}^{T_S} c(T)dT + \frac{T_L - T}{T_L - T_S}(H_L - H_S), & T_S < T < T_L, \\ \int_{25^{\circ}\text{C}}^{T_S} c(T)dT + H_L - H_S + \int_{T_L}^T c(T)dT, & T > T_L \end{cases} \quad (5)$$

где T_S и T_L – температуры солидуса и ликвидуса; H_S и H_L – значения энтальпии при этих температурах [13]. Температура рассчитывается методом итерации с величиной шага $\Delta T = 1$ К для каждого контрольного объема со значением энтальпии $H_{x,y,z}$ по уравнению (5). Блок-схема расчета приведена на рис. 2.

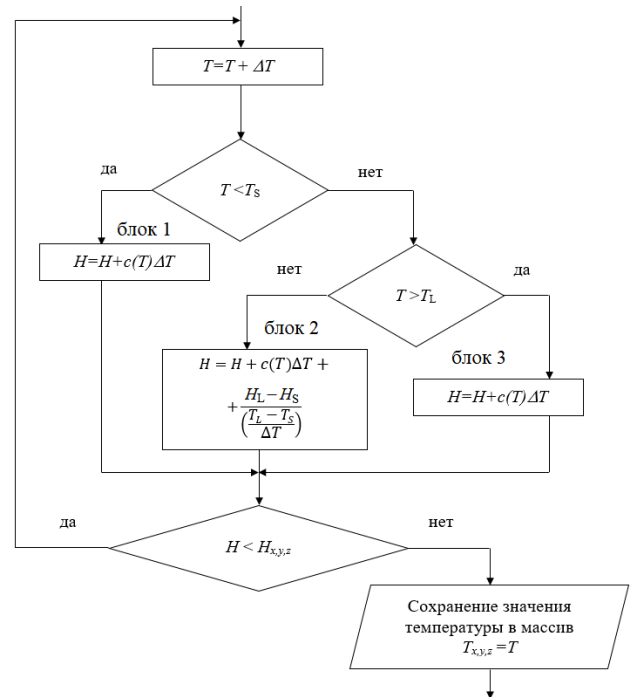


Рис. 2. Расположение контрольных объемов

Кроме того, для решения поставленной задачи принимались граничные условия 3-го рода. Так, для узла с индексом $(x+1, y, z)$ в случае, если он “попадает” в вакуум, граничные условия принимают вид:

$$-\varepsilon(T_{x,y,z}^{\tau-1/3}) \cdot \sigma \cdot ((T_{x,y,z}^{\tau-1/3})^4 - (T_{\text{chamber}})^4) = \lambda(T_{x,y,z}^{\tau-1/3}) \frac{T_{x,y,z}^{\tau-1/3} - T_{x-1,y,z}^{\tau}}{\Delta x}. \quad (6)$$

В последнем выражении $\varepsilon(T)$ – степень черноты для излучающей поверхности, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана, T_{chamber} – температура стенки вакуумной камеры, с которой осуществляется лучистый теплообмен (принята равной 25°C). Температурная зависимость $\varepsilon(T)$ была взята из литературных данных [14].

В среде разработки Microsoft Visual Studio была создана программа, с помощью которой решались уравнения (2) – (6). Шаг по времени был принят равным 0,1 с, а координатный шаг расчетной сетки – 0,5 мм. В рассмотренных примерах в качестве материала проволоки и подложки была выбрана сталь AISI 316 L. Температура T_{mes} из-

мерялась в хвосте жидкой ванны на расстоянии 5 мм от центра пучка и сохранялась в csv-файл. Подача присадочной проволоки реализована путем добавления новых контрольных объемов, имеющих температуру 25°C, в область действия пучка.

Источник нагрева был представлен в модели в виде объемной функции $Q_{x,y,z}^t$, которая вдоль оси z распределена равномерно по всей глубине наплавляемого слоя (в нашем случае – 2 мм). Такой подход согласуется с мировым опытом применения уравнения теплопроводности для моделирования сварочных процессов, использующих концентрированные источники нагрева [15-17]. Это обусловлено тем, что в таких моделях не представляется возможным воспроизвести динамику проникновения источника нагрева в материал за счет давления отдачи паров. Поскольку в реальном случае пучок обычно осциллирует с высокой частотой (около 500 Гц) по кольцевой траектории, функция Q в плоскости xy равномерно распределена по поверхности, заключенной между окружностями радиусом 1,5 мм и 2,5 мм (источник имеет трубчатую объемную конфигурацию).

Описанная выше модель является дескриптивной, то есть позволяет рассчитывать температурное поле для каждого временного шага при воздействии источника нагрева с заданными пространственно-энергетическими характеристиками. Особый интерес для практики представляет нормативная модель, которая позволяет определять параметры воздействия, например, мощность источника нагрева при заданной скорости наплавки, обеспечивающие требуемую температуру жидкой ванны. Для решения задачи определения требуемой мощности источника нагрева созданная дескриптивная модель была дополнена цифровым алгоритмом, реализующим обратную связь по температуре. В этом случае можно говорить лишь о квазинормативной модели, поскольку сама постановка задачи теплообмена является чисто дескриптивной.

Для моделирования замкнутой системы управления в программу был введен цифровой пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор [18]. Он был реализован в программе в следующем виде:

$$U(\tau) = K_p \cdot E(\tau) + K_i \cdot \Delta\tau \sum_{k=0}^{\tau} E(k) + \frac{K_d}{\Delta\tau} (E(\tau) - E(\tau - 1)), \quad (7)$$

где K_p – пропорциональный коэффициент, K_i – интегральный коэффициент, K_d – дифференциальный коэффициент, $E(\tau) = T_{set} - T_{mes}$ – значение рассогласования на временном шаге τ , T_{set} – уставка температуры. Схема регулирования температуры приведена на рис. 3.

В реальных условиях в качестве датчиков температуры на электронно-лучевой установке могут быть применены пирометры или камеры ближнего инфракрасного диапазона [19]; они устанавливаются на электронную пушку и снабжаются устройствами защиты от воздействия паров и перегрева (защитные кожухи, диафрагмы). Сигнал пирометра T_{mes} сравнивается с заданной температурой T_{set} и разность этих двух сигналов подается в регулятор тока пучка, который воздействует на источник питания напряжения смещения, с помощью которого изменяют ток электронного пучка (рис. 3).

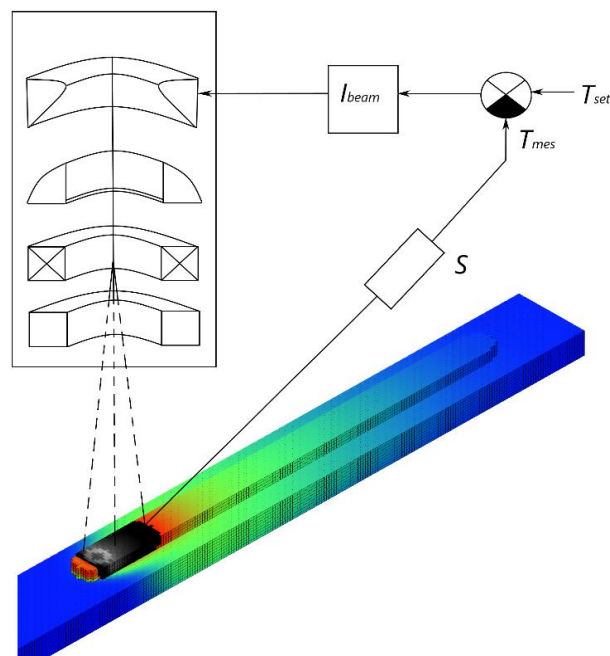


Рис. 3. Схема регулирования температуры: S – бесконтактный датчик температуры (пирометр или инфракрасная камера), I_{beam} – регулятор тока пучка, T_{mes} – фактическая измеряемая температура в хвосте ванны, T_{set} – уставка температуры

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты моделирования процесса наплавки с введенной обратной связью по температуре с применением ПИД-регулятора приведены на рис. 4.

На рис. 4, а, показан процесс наплавки первого слоя, черным цветом (градиентом серого) обозначена жидкая ванна, на рис. 4, б – д показаны последующие наплавляемые слои. Из рисунков видно, что от слоя к слою размеры жидкой ванны практически не изменяются, однако присутствует незначительный перегрев предыдущего слоя. Для выбора наиболее подходящего закона регулирования сравнивались два типа регуляторов – ПИ и ПИД. На рис. 5 приведены зависимости стабилизируемой (измеряемой) температуры от времени $T_{mes}(t)$ и зависимости регулирующего воздействия от времени $U(t)$, причем $t = \tau \cdot \Delta\tau$. Необходимо отметить, что при моделировании не учитывалось время перемещения пушки от конца слоя к началу, т.е. наплавка следующего слоя начиналась сразу после завершения предыдущего.

На рис. 5 черным цветом обозначены зависимости, полученные для ПИД-регулятора с настройками: $K_p = 6 \cdot 10^{-3}$, $K_i = 1 \cdot 10^{-3}$, $K_d = 0,5 \cdot 10^{-3}$ (столь малые значения коэффициентов обусловлены тем, что $U(t)$ является множителем мощности пучка, которая равна 600 Вт). Красным цветом обозначены зависимости, полученные для ПИ-регулятора (при $K_d = 0$). На рис. 5, а, б показано изменение температуры во времени: в начале процесса (а) и после наплавки всех четырех слоев (б). На рис. 5, в, д показаны зависимости выходного воздействия регулятора $U(t)$ для начала процесса (в), и после наплавки всех четырех слоев (д). По графическим результатам видно, что независимо от типа регулятора удается стабилизировать температуру процесса за счет постепенного снижения мощности, вводимой в изделие. В начале процесса U задается равным 1, и в изделие вводится мощность 600 Вт. Далее мощность резко

снижается из-за того, что интегральная составляющая еще равна нулю, а затем происходит стабилизация температуры по уставке $T_{set} = 1800^{\circ}\text{C}$.

При переходе от слоя к слою U снова задается равным 1, на этот период интегрирование рассогласования во втором слагаемом выражения (7) приостанавливается, а затем снова запускается режим стабилизации температуры. Вве-

дение дифференциальной составляющей обеспечивает снижение перерегулирования, для полного исключения которого требуется дополнительная настройка. Такая настройка может быть осуществлена с использованием существующих методов [18].

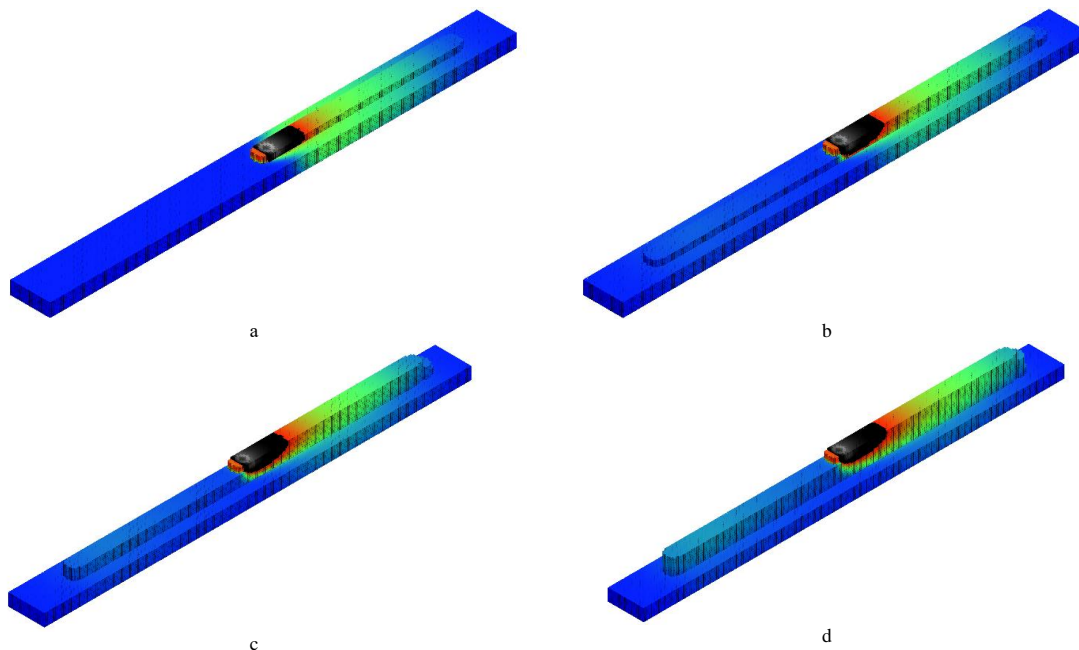


Рис. 4. Результаты моделирования процесса наплавки многослойной стенки:
а – первый слой, б – второй слой, с – третий слой, d – четвертый слой

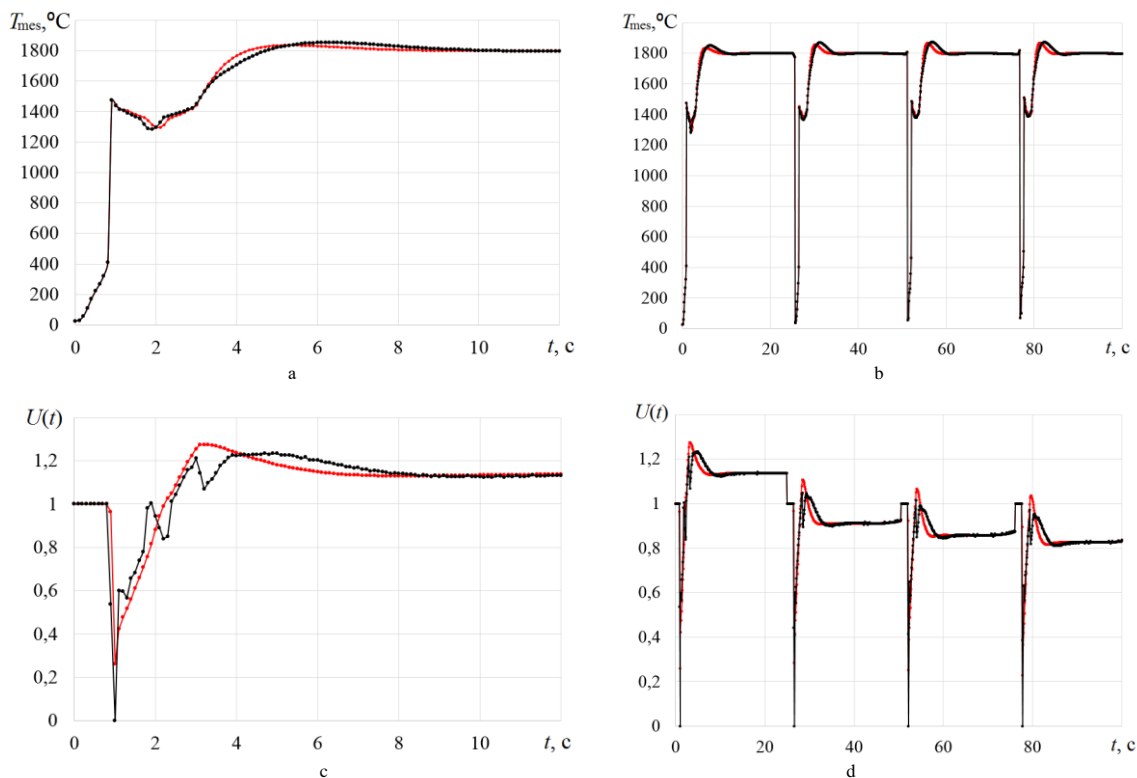


Рис. 5. Переходные процессы изменения стабилизируемой температуры T_{mes} (a, b) и выходного воздействия регулятора U (c,d)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

1. Описана методика построения дескриптивной математической модели процесса электронно-лучевого аддитивного формообразования изделий из металлических материалов с прямой подачей присадочного материала в область воздействия луча. Данная методика основана на численном решении нелинейного нестационарного уравнения энергии и итерационного алгоритма для учета скрытой теплоты плавления. Обоснована корректность использования объемно-распределенной модели источника нагрева и подвижных граничных условий. Показана актуальность применения модели для анализа процессов теплообмена при наплавке многослойных металлических конструкций с использованием концентрированных источников нагрева.

2. На основе предложенной дескриптивной модели разработана комбинированная квазинормативная математическая модель процесса электронно-лучевого аддитивного формообразования, позволяющая определять желаемое состояние объекта управления, например, мощность пучка, необходимую для достижения требуемой температуры жидкой ванны. Показано, что данная модель особенно актуальна для изучения динамических характеристик процесса наплавки при использовании цифровых моделей регуляторов, таких как ПИД-регулятор.

3. С помощью предложенной комбинированной модели показана принципиальная возможность стабилизации температуры жидкой ванны в процессе наплавки за счет применения различных регуляторов (ПИ и ПИД). Модель позволяет осуществлять синтез и настройку регуляторов, устанавливаемых на промышленные электронно-лучевые установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gibson I. Additive Manufacturing Technologies / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker. – New York: Springer Science + Business Media, 2015. – 484 p.

2. Taminger K.M. Electron-beam freeform fabrication technology development for aerospace applications / K.M. Taminger // Airbus Materials & Structures Workshop: Proceedings (Hampton, USA, April 6-7 2006 г.) – Hampton, 2006. – P. 1-20.

3. Stecker S. Electron beam layer manufacturing // Patent US № 8,546,717 B2. 2011. Prior Publication data US 2011 FOO61591 A1, Mar. 17, 2011.

4. Seufzer W.J. Control methods for the electron beam free form fabrication process / W.J. Seufzer, K.M. Taminger // 18th International Solid freeform fabrication symposium: Proceedings (Austin, USA). – Austin, Texas, 2007. – P. 13-21.

5. Zalameda J.N. Thermal imaging for assessment of electron-beam freeform fabrication (EBF3) additive manufacturing deposits / J.N. Zalameda, E.R. Burke, R.A. Hafley, K.M. Taminger, C.S. Domack, A. Brewer, R.E. Martin // Proceedings of the SPIE. – US, Baltimore, Maryland, 2013. – Vol. 8705. – 87050M.

6. Stecker S., Wollenhaupt P.E. Electron beam layer manufacturing using scanning electron monitored closed loop

control // Patent US № 8,809,780 B2. 2014. Prior Publication data US 2014/OO61167 A1, Mar. 6, 2014.

7. Chang S. Closed-loop control of droplet transfer in electron-beam freeform fabrication / S. Chang, H. Zhang, H. Xu, X. Sang, L. Wang, D. Du, B. Chang // Sensors. – 2020. – Vol. 20, is. 3, Pub. – 923.

8. Mitchell S.W. Real-time analysis and control of electron beam manufacturing process through x-ray computed tomography // Patent US-10113981-B2. 2017. Pub. date Jan. 26, 2017.

9. Gibson B.T. Melt pool monitoring for control and data analytics in largescale metal additive manufacturing / B.T. Gibson, Y.K. Bandari, B.S. Richardson, A.C. Roschli, B.K. Post, M.C. Borish, A. Thornton, W.C. Henry, M. Lamsey, L.J. Love // Solid Freeform Fabrication 2019: Proceedings of the 30th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium (Austin, USA, 12-14 Aug. 2019). – Austin, 2019. – P. 1412-1429.

10. Xiong J. Closed-loop control of variable layer width for thin-walled parts in wire and arc additive manufacturing / J. Xiong, Z. Yin, W. Zhang // Journal of Materials Processing Technology. – 2016. – Vol. 233. is. 7. – P. 100-106.

11. Yanenko N.N. The method of fractional steps (The solution of problems of mathematical physics in several variables) / N.N. Yanenko; Engl. transl. ed. by M. Holt. – Berlin etc.: Springer-Verl., 1971. – 156 p.

12. Samarskii A.A. The theory of difference schemes / A.A. Samarskii. – N. Y.; Basel: Marcel Dekker, Inc, 2001. – 761 p.

13. Kim C.S. Thermophysical properties of stainless steels / C.S. Kim. – USA, Springfield: Argonne National Laboratory, 1975. – 33 p.

14. Hunnewell T.S. Total hemispherical emissivity of SS 316L with simulated very high temperature reactor surface conditions / T.S. Hunnewell, K.L. Walton, S. Sharma, T.K. Ghosh, R.V. Tompson, D.S. Viswanath, S.K. Loyalka // Nuclear Technology. – 2016. – Vol. 198, is. 3. – P. 293-305.

15. Farrokhi F. A numerical model for full and partial penetration hybrid laser welding of thick-section steels / F. Farrokhi, B. Endelt, M. Kristiansen // Optics & Laser Technology. – 2019. – Vol. 111. – P. 671-686.

16. Wang Y. Research on modeling of heat source for electron beam welding fusion-solidification zone / Y. Wang, P. Fu, Y. Guan, Z. Lu, Y. Wei // Chinese Journal of Aeronautics. – 2013. – Vol. 26, is. 1. – P. 217-223.

17. Chowdhury S. Finite element based transient heat transfer analysis of Ti2AlNb electron beam welds using hybrid volumetric heat source / S. Chowdhury, Y. Nirsanametla, M. Muralidhar // Indian Welding Journal. – 2019. – Vol. 52, is. 1. – P. 49-55.

18. Astrom K.J. PID controllers: theory, design, and tuning / K.J. Astrom, T. Hagglund. – 2nd ed. – Piedmont: ISA Society, USA, 1995. – 343 p.

19. Everton S.K. Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing / S.K. Everton, M. Hirsch, P. Stravroulakis, R.K. Leach, A.T. Clare // Materials & Design. – 2016. – Vol. 95. – P. 431-445.

Investigation of the Closed-Loop Control System Operation for the Additive Manufacturing Process Using a Nonlinear Heat Transfer Model

Gaponova D.A., Rodyakina R.V., Shcherbakov A.V.
National research university "MPEI"
Moscow, Russia
reginarodyakina@mail.ru

Abstract. A mathematical model, proposed by the authors to study the processes of nonlinear heat transfer during electron-beam deposition with direct feeding of filler material into the heating source influence zone, is described. The model is implemented in the form of a computer program based on numerical methods for solving the energy equation with moving boundary conditions. An algorithm is described that makes it possible to take into account the latent heat of melting when calculating the temperature field. Using this descriptive model and a discrete model of PID-controller, a quasi-normative model has been developed that allows analyzing closed-loop control processes to

stabilize the deposited layer temperature. The fundamental possibility of using PI- and PID-controllers for heating source power controlling in multilayer deposition process of a straight wall made of AISI 316L steel is shown, as well as the need to turn off feedback when passing from one layer to another.

Keywords: additive manufacturing, heat transfer, normative model, digital twin, PI-controller, PID-controller.

Создание системы поддержки принятия решений для послепродажного обслуживания авиационной техники

Зрячев С.А., Ларин С.Н.

Ульяновский Государственный Университет

Ульяновск, Россия

sergeyzryachev@outlook.com

Аннотация. Данная работа нацелена на повышение качества послепродажного обслуживания при помощи использования системы поддержки принятия решений за счет автоматизации взаимодействия участников послепродажного обслуживания. Система поддержки принятия решений рассматривается через взаимодействие участников послепродажного обслуживания авиационной отрасли машиностроения и может быть применена в других отраслях машиностроения. Целью работы является разработка метода создания системы поддержки принятия решений и интерфейсных решений взаимодействия участников через предложенную систему. Основой разработанной системы является одновременное взаимодействие между всеми участниками послепродажного обслуживания на всех этапах жизненного цикла изделия. Работа с системой поддержки принятия решений представлена в виде интерфейсных решений взаимодействия авиационных предприятий с операторами авиационной техники.

Ключевые слова: самолетостроение, послепродажное обслуживание, техническое обслуживание и ремонт, авиационная техника.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на этапе производства жизненного цикла (ЖЦ) авиационной техники (АТ) производится внедрение элементов автоматизации процессов [1]. Процессы эксплуатации также автоматизируются как со стороны производителей АТ [2], так и со стороны эксплуатантов и операторов технического обслуживания и ремонта (ТОиР) АТ [3].

Процессы ТОиР АТ занимают существенную часть ЖЦ изделия [4], качество их выполнения напрямую влияет на надежность флота эксплуатанта [5] и безопасность полетов в целом [6]. В тоже время процессы ТОиР являются наименее автоматизированными [7].

Компании производители АТ представили такие программные продукты как Analytix [8] и Skywise [9]. Также свои программные продукты в сфере интеллектуализации ТОиР АТ представили операторы ТОиР АТ и производители авиационных двигателей [10] [11].

Одним из способов интеллектуализации послепродажного обслуживания является разработка и внедрение системы поддержки принятия решений (СППР).

СППР была выбрана в качестве системы автоматизации из-за возможности использования интеллектуальной обработки информации и последующего интеллектуального поиска, а также автоматической выдачи информации. Оператор может создавать неструктурированные запросы в систему [12] и получать структурированный ответ, что

является важным не только в авиационной и последующем послепродажном обслуживании (ППО) АТ, но и в других отраслях машиностроения, так как большая номенклатура компонентов изделий затрудняет четкое структурирование запросов.

Внедрение СППР на этапе проектирования изделия позволяет сохранить всю информацию, возникающую на всех этапах ЖЦ, что в дальнейшем помогает проводить глубокий анализ обслуживания АТ, что является наиболее важным, так как этап обслуживания является основой надежности АТ [13].

Кратко рассмотрим подходы к анализу и созданию СППР. Исторический анализ развития и совершенствования СППР был проведен такими учеными как David Arnott и Graham Pervan [14]. Roger Alan провел глубокий анализ положительных эффектов от внедрения СППР [15]. Своё начало СППР берут в 60-х годах [16], хотя сам термин СППР появился только в 1971 году [17]. С развитием вычислительной техники и увеличения объёмов информации, проходящей через данные системы, СППР также стали усложняться и укрупняться [18].

В настоящее время СППР широко используются в отраслях машиностроения [19][20].

Целью создания СППР является создание общего информационного поля для всех участников ППО АТ, накопление и в дальнейшем использование результатов экспертного анализа для повышения скорости исполнения и качества работ ТОиР АТ, автоматизация повторяющихся задач, с учетом наработки каждой конкретной машины, результатов экспертного анализа, а также общей статистики проведения работ ТОиР АТ, повышение скорости выполнения экспертного анализа в виде конструкторско-технологических решений при неповторяющихся задачах, их учет в статистике и последующая автоматизация и перевод в разряд повторяющихся.

Для выполнения поставленной цели необходимо выполнение следующих задач:

1. Создание моделей взаимодействия участников ППО АТ;
2. Моделирование потоков информации между участниками ППО АТ;
3. Формирование методики взаимодействия участников ППО АТ и использованием базы данных (БД) и СППР ППО АТ;
4. Проектирование интерфейсных решений для операторов СППР ППО АТ.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

СППР ППО АТ представляет собой систему, состоящую из программного комплекса, экспертов участников ППО АТ и операторов системы. Экспертам заводоизготовителей и ОКБ предоставляется информация от всех эксплуатантов типа АТ для последующего анализа и совершенствования как процессов изготовления, так и эксплуатации АТ. На основе эксплуатационной документации (ЭД) и результатов экспертного анализа формируется информация для эксплуатантов АТ в виде витрины данных для общего поиска информации и в виде электронных карт ТООР АТ для проведения работ по техническому обслуживанию и ремонту АТ.

Для успешного функционирования предлагаемой системы СППР ППО АТ необходимы обобщенные модели участников ППО АТ, а также взаимодействие данных участников. Базисом является обобщенная математическая модель $M_{\text{общ}}$, представляющая из себя множество включенных подмножеств.

Для описания взаимодействия участников ППО АТ в модели $M_{\text{общ}}$ вводятся модели участников, а именно:

1. $M_{\text{изг}}$ —модель завода-изготовителя.
2. $M_{\text{ОКБ}}$ —модель опытно-конструкторского бюро.
3. $M_{\text{АК}}$ —модель авиакомпаний, эксплуатантов типа АТ.

Для описания процессов, происходящих между участниками ППО АТ, вводятся модели:

1. $G_{\text{общ}}$ —модель множества графических данных, использующихся как при производстве, так и при эксплуатации типа АТ.
2. $T_{\text{общ}}$ —модель множества текстовых данных типа АТ.

Рассмотрим потоки информации, возникающие между участниками авиационной отрасли в процессе ЖЦ АТ. Взаимный обмен информацией между опытно-конструкторским бюро и заводами-изготовителями начинается еще на стадии черного проектирования и длится в течение всего жизненного цикла типа АТ. На начальной стадии проектирования АТ, ОКБ и заводы-изготовители производят обмен информацией, представленной в $T_{\text{КД}}$; $T_{\text{ТД}}$ и $G_{\text{КД}}$; $G_{\text{ТД}}$, которые представляют собой графическую и текстовую информацию, представленную в конструкторской (КД) и технологической (ТД) документации (Рис. 1).

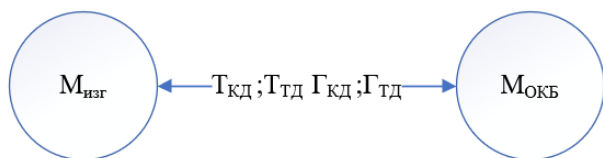


Рис. 1. Потоки информации между ОКБ и заводоизготовителем на стадии проектирования

В ходе дальнейшего проектирования и опытного производства формируются множества $T_{\text{РЛЭ}}$; $T_{\text{РТО}}$; $T_{\text{РЭ}}$, $G_{\text{РЛЭ}}$; $G_{\text{РТО}}$; $G_{\text{РЭ}}$, представляющие собой текстовую и графическую информацию из руководства по летной эксплуатации (РЛЭ), регламента технического обслуживания (РТО) и руководства по эксплуатации (РЭ), в дальнейшем данные подмножества будут рассматриваться в виде множеств $T_{\text{ЭД}}$ и $G_{\text{ЭД}}$, т.е. в виде множеств графической и текстовой информации эксплуатационной документации (ЭД), которые также дополняются на основе обмена ин-

формации, полученной в ходе опытного производства (Рис. 2).

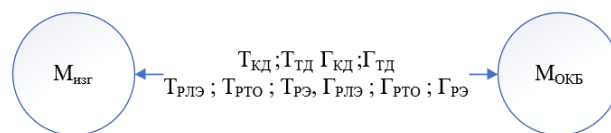


Рис. 2. Потоки информации между ОКБ и заводоизготовителем на стадии опытного производства

В дальнейшем, при выходе на серийное производство, формируется постоянный поток данных $T_{\text{КД}}$; $T_{\text{ТД}}$; $G_{\text{КД}}$; $G_{\text{ТД}}$; $T_{\text{ЭД}}$; $G_{\text{ЭД}}$, которым обмениваются участники, задействованные в производстве АТ.

В ходе всех этапов информация передается как в виде измененных элементов, например, изменение модели детали, текстовая составляющая модели $T_{\text{дет_КД}}$, $T_{\text{дет_ТД}}$ и графическая составляющая $G_{\text{дет_КД}}$, $G_{\text{дет_ТД}}$, кроме того обмен информацией между ОКБ и заводами-изготовителями может происходить при помощи дополнительных формальных документов, например, отчеты по конструкторской технологической обработке (КТО), разрешения на отклонения (РНО), графической и текстовой составляющей извещений и предварительных извещений и другой технической и нормативной документации, создающейся и участвующей в процессах производства АТ. Такая информация может не являться частью КД и ТД, ее можно формально представить в $T_{\text{доп}}$ и $G_{\text{доп}}$, на основании обмена, которым в том числе вносятся изменения в КД, ТД и ЭД. Также ЭД и все изменения по ЭД поступают эксплуатантам АТ. В свою очередь эксплуатанты передают статистические данные по эксплуатации АТ $T_{\text{СТ}}$ и $G_{\text{СТ}}$ (Рис. 3). Представленные потоки, возникающие в ходе ЖЦ АТ, загружаются в общую базу данных (БД), которая является основой для формирования СППР ППО АТ.

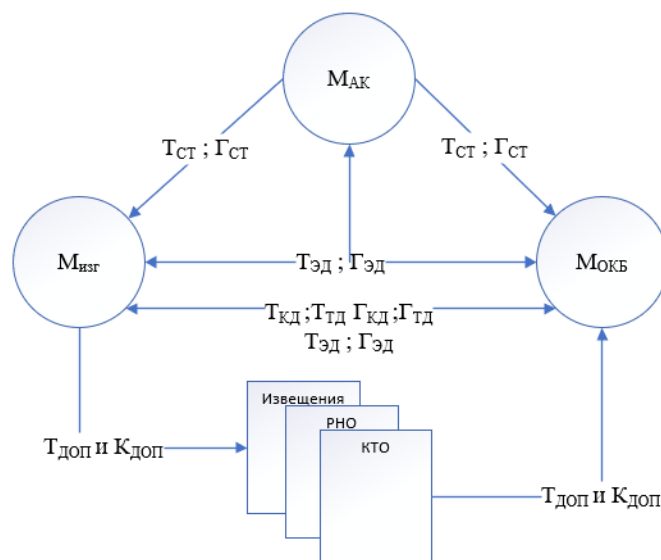


Рис. 3. Потоки информации между ОКБ, заводоизготовителем и эксплуатантами АТ при серийном производстве АТ

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Вся информация, возникающая в ходе ЖЦ АТ, при обмене между участниками, загружается в БД типа АТ.

Рассмотрим работу с СППР в плане передачи и обработки информации (Рис. 4). Вся информация в БД поставляется участникам через витрины данных, что позволяет контролировать параметры доступа к информации. Авиа-

компании через витрину данных автоматизировано передают статистические данные, такие как отчеты по эксплуатации от летной, инженерно-авиационной служб, а также от службы объективного контроля. Также операторы системы могут передавать запросы на создание экспертного решения, а также создавать заказы на запасные части и компоненты (ЗИП).

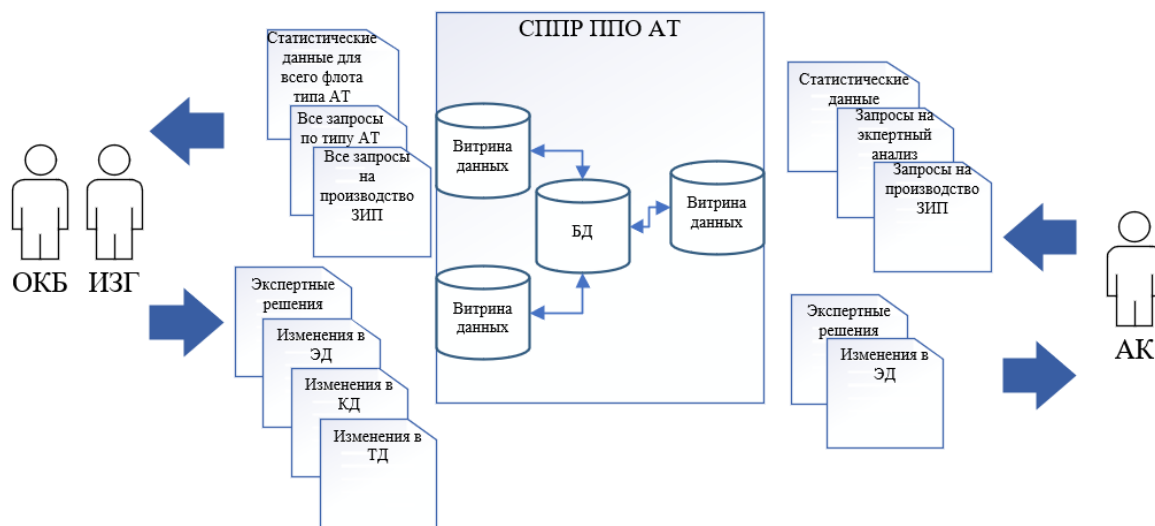


Рис. 4. Взаимодействие между участниками СППР ППО АТ через витрины данных

В свою очередь операторы и эксперты заводоизготовителей и ОКБ получают через витрины данных статистические данные не только от отдельных эксплуатантов, но и общую статистику в целом. Также заводы-изготовители и ОКБ получают все запросы на экспертные решения и производство ЗИП.

На основе получаемых данных, а также за счет того, что вся история изменения документации хранится в БД, эксперты могут провести глубокий анализ всех аспектов АТ и оперативно создавать экспертные решения по ТОиР АТ. Также на основе данных в БД заводы-изготовители и ОКБ могут вносить изменения в документацию типа АТ, которая также загружается в БД.

Рассмотрим работу с СППР ТОиР АТ операторами и экспертами заводоизготовителей и ОКБ (Рис. 5).

При нажатии на любую из задач появляется новое окно со статистикой по данной проблеме (Рис. 6). Благодаря сбору информации от всех участников процесса ППО, появляется возможность показа статистики по всему флоту типа АТ.

При нажатии на вкладку поиск, появляется возможность интеллектуального поиска в информации, предоставленной через витрину данных для данного оператора СППР (Рис. 7). Для минимизации затрат времени на создание решений по повторяющимся проблемам, возникающим в ходе эксплуатации типа АТ, СППР предлагает историю решений по данной проблеме (Рис. 8). При превышении количества однотипных проблем выше значения, заложенного разработчиками АТ, оператор производителя АТ увидит замечание, а также типовые способы снижения данного параметра ниже предельных значений.

Текущие задачи

Текущие задачи		Проблема
Оператор	Operator 1	В течение полета возник отказ в хх Оператор выполнил: 1. 2. Отказ не устранен.
Тип АТ	Типе X	
Бортовой номер	RA00000	
Событие	АОГ	
		Контрольный срок 23 декабря 2021
		ВНИМАНИЕ
Текущие задачи		Problem
Оператор	ВСЕ	Повторяющийся отказ в системе вентиляции
Тип АТ	Типе X	
Бортовой номер	ВСЕ	
Событие	Задержка	
		Контрольный срок 28 ноября 2022
		В процессе

Рис. 5. Заглавный экран СППР для производителя АТ

Выводы

Сформированная СППР ППО АТ позволит автоматизировать взаимодействие участников ППО АТ. Хранение всей информации по типа АТ в одной БД позволит проводить глубокий анализ как самого АТ, так и обслуживания АТ, что в дальнейшем повысит качество новых типов АТ. Взаимодействие всех участников процесса ППО АТ позволит:

1. Сократить сроки ожидания всех участников процессов ППО АТ ответа от остальных участников;
2. Создавать рабочие группы не только внутри одной организации, но и между организационными группами. Привлечение специалистов от разных организаций позволит повысить надежность эксплуатации АТ.
3. Поддерживать всю документацию у всех участников процессов ППО АТ в актуальном состоянии;
4. Автоматизировано контролировать права доступа к информации, хранящейся в единой БД.

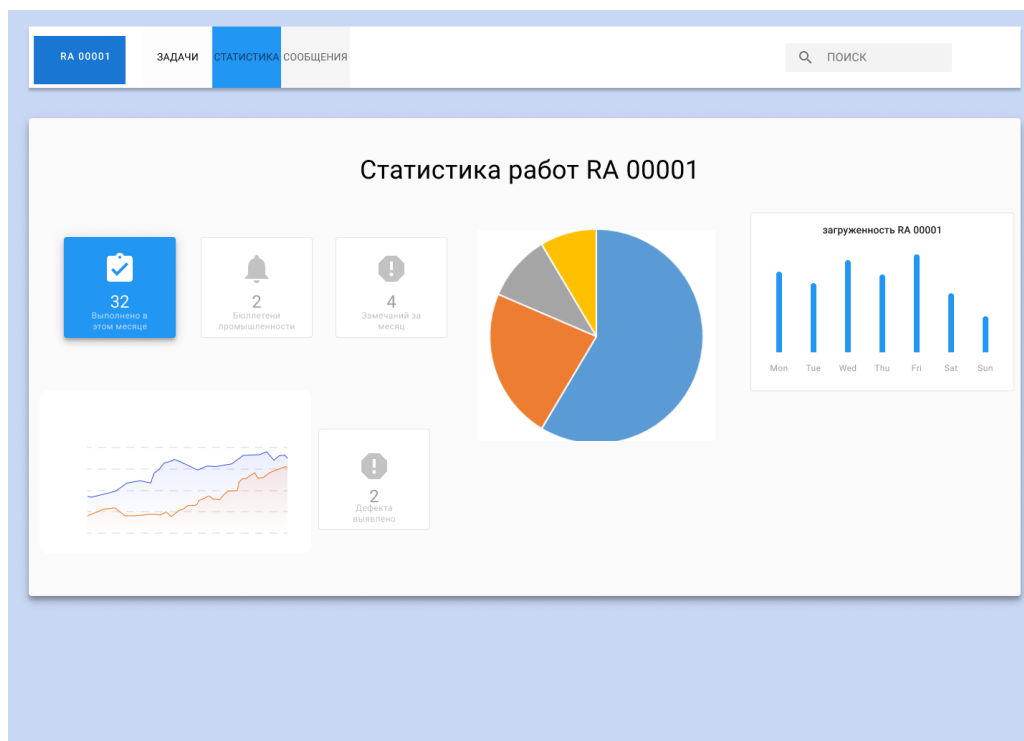


Рис. 6. Статистика СППР

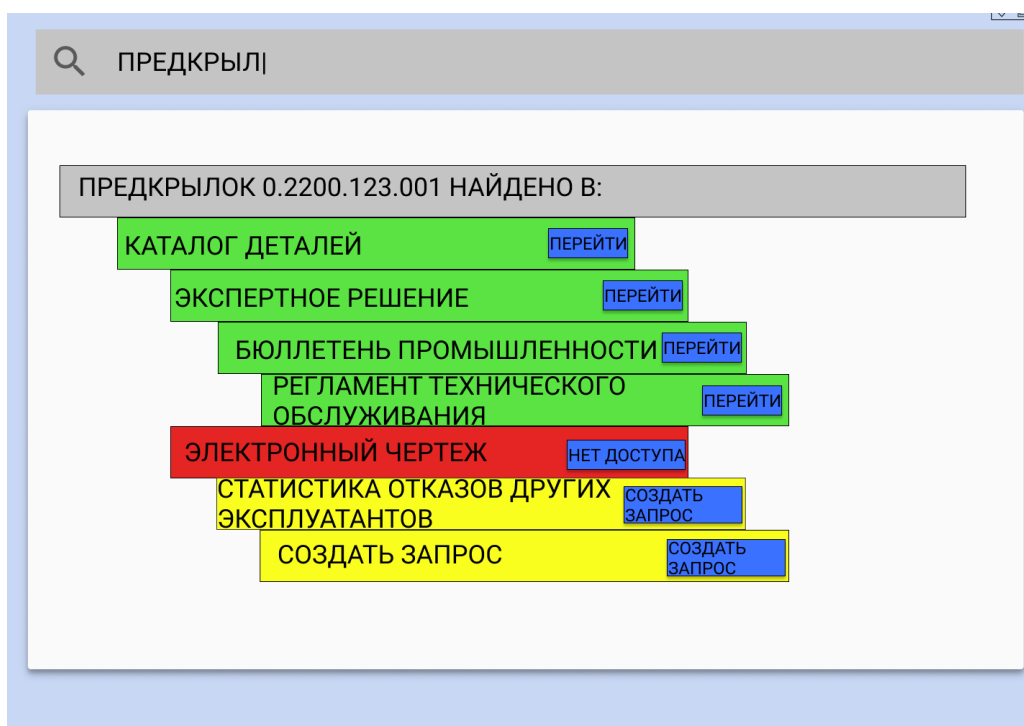


Рис. 7. Поиск СППР

Отказ ТАБЛО “Проверь закрылки”

НАЙДЕНО ОШИБКА №2421.		УСПЕХ %
Решение завода- изготовителя от 01.01.00 Выполнить следующие действия:	+ СФОРМИРОВАТЬ СПИСОК РАБОТ	НАДЕТ МЕЖДУ ОТКАЗАМИ 452ч
		ТРУДО ЕМКОСТЬ 15ч
Порядок работ согласно регламенту технического обслуживания	+ СФОРМИРОВАТЬ СПИСОК РАБОТ	201ч
		42ч
Решение ИАС от 02.12.12 В случае отказа заказать датчик АГВ-24	+ СФОРМИРОВАТЬ ЗАКАЗ	1200ч
		4ч
		25 дней

Рис. 8. Семантический поиск с примером поиска решений

ЛИТЕРАТУРА

1. Chen T. Ubiquitous manufacturing: Current practices, challenges, and opportunities / T. Chen, H.R. Tsai // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. - 2017. – №45. – P. 126-132.

2. Ploteau B. Technical data for maintenance / B. Ploteau // *FAST*. – 2018. – №61. – P. 18-25.

3. Chang S. Enabling technologies and platforms to aid digitalization of commercial aviation support, maintenance and health management / S. Chang, Z. Wang, Y. Wang, J. Tang, X. Jiang // *International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE)*. – 2019. – P. 926-932.

4. AVIATAR // Lufthansa Technic – URL: <https://www.lufthansa-technik.com/aviatar> (дата обращения: 10.02.2021).

5. Vieira D.R. Maintenance, repair and overhaul (MRO) fundamentals and strategies: An aeronautical industry overview / D.R. Vieira, P.L. Loures // *International Journal of Computer Applications*. – 2016. – №135. – P. 21-29.

6. Valdés R.M.A. Aviation 4.0: More safety through automation and digitization / R.M.A. Valdés, V.F.G. Comendador, A.R. Sanz, J.A.P. Castán. – *IntechOpen*, 2018. doi: 10.5772/intechopen.73688.

7. Big data; the race is on, but what is the end goal? // *The International Air Transport Association (IATA)* – URL: <https://www.iata.org/contentassets/f03b1a4b79534b99802f10cd23b19ec2/1100-1130-mro-forecast-market-trend-icf.pdf> (дата обращения: 10.02.2021).

8. Prescriptive insight // BOEING – URL: <https://www.boeing.com/features/innovation-quarterly/nov2018/btj-analytics.page> (дата обращения: 10.02.2021).

9. SKYWISE // Airbus – URL: <https://skywise.airbus.com/en/products/for-airlines.html> (дата обращения: 10.02.2021).

10. GE digital aviation software // General Electric – URL: <https://www.ge.com/digital/customers/aviation> (дата обращения: 10.02.2021).

11. HAECO Group selects Revima’s Flightwatching predictive maintenance tool // *Aviatrader* – URL: <https://www.avitrader.com/2019/09/30/haeco-group-selects-revimas-flightwatching-predictive-maintenance-tool> (дата обращения: 10.02.2021).

12. Keen P.G.W. Decision support systems: An organizational perspective / P.G.W. Keen, M.S. Morton. – Addison-Wesley Pub. Co., 1978.

13. Shafiee M. Maintenance models in warranty: A literature review / M. Shafiee, S. Chukova // *European Journal of Operational Research*. – 2013. – № 229. – P. 561-572.

14. Arnott D. A critical analysis of decision support systems re-research revisited: the rise of design science/ D. Arnott, G. Pervan // *Journal of Information Technology*. – 2014. – № 29. – P. 269-293.

15. Pick R. A review on evaluation and benefits of decision support systems / R. Pick, N. Weatherholt // *Review of Business Information Systems (RBIS)*. – 2012. – № 17.1. – P. 7-20.

16. Arnott D. A critical analysis of decision support systems research / D. Arnott, G. Pervan // *Journal of Information Technology*. – 2005. – № 20. – P. 67-87.

17. Gorry G.A. Framework for Management Information Systems / G.A. Gorry, M.A. Scott // *Sloan Management Review*. – 1971. – № 13. – P. 1-22.

18. Shim J.P. Past, present, and future of decision support technology / J.P. Shim, M. Warkentin, J.F. Courtney, D.J. Power, R. Sharda, C. Carlsson // *Decision Support Systems*. – 2002. – № 33. – P. 111-126.

19. Mrzyglód B. Durability analysis of forging tools after different variants of surface treatment using a decision-support system based on artificial neural networks / B. Mrzyglód, M. Hawryluk, Z. Gronostajski // Archives of Civil and Mechanical Engineering. – 2018. – № 18. – P. 1079-1091.

20. Yam R. Intelligent predictive decision support system for condition-based maintenance / R. Yam, P. Tse, L. Li, P. Tu // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2001. – P. 383-391.

Creating of a Decision Support System for After-Sales Support of Aircraft

Zryachev S., Larin S.

Ulyanovsk State University

Ulyanovsk, Russia

sergeyzryachev@outlook.com

Abstract. This work is aimed at increasing the availability of after-sales supports using a decision support system through the interoperability of after-sales support participants. The decision-support system is addressed through the interaction of the participants in the after-support support of the aircraft engineering industry and can be applied in other branches of engineering. The work aims to develop a participatory decision support system method and interfaces between participants

through the proposed system. The basis of the developed system is simultaneous interaction between all participants of after-sales support at all stages of the product life cycle. The work with the decision support system is presented in the form of interface solutions of aircraft manufacturers with aircraft operators.

Keywords: aircraft manufacturing, after-sales support, maintenance, repair, overhaul.

Совершенствование автоматизированных систем регулирования профиля проката на станах горячей прокатки

Радионон А.А., Гасиярова О.А., Воронин С.С.
Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)
Челябинск, Россия
radionov.mail@gmail.com, o.ll.ja1985@gmail.com, stsvoronin@gmail.com

Б.М. Логинов
ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»
г. Магнитогорск, Россия
loginov_bm@mmk.ru

Аннотация. Представлены система осевого смещения рабочих валков WRS, реализующая технологию CVCplus, и система автоматического регулирования изгиба рабочих валков WRB, обеспечивающие соблюдение размерной точности плоского проката по ширине. Рассмотрены принцип действия и функциональное назначение этих систем. Система WRS обеспечивает заданную форму поперечного сечения проката за счет регулирования его поперечной разнотолщинности. Система WRB корректирует отклонения профиля, которые не были устранены при CVC-перемещении, а также обеспечивает прижатие рабочих валков к опорным. Рассмотрена структура системы автоматического регулирования противоишгиба. Отмечено, что ее недостатком является высокое усилие балансировки при осевой сдвиге валков в промежутках между проходами. Это приводит к ухудшению условий эксплуатации оборудования и повышению опасности возникновения аварий. Предложена усовершенствованная система, обеспечивающая автоматическое уменьшение задания на противоишгиб нижнего рабочего валка при CVC-перемещении. Рассмотрены осциллограммы переходных процессов при реализации проектного и разработанного алгоритмов управления. Подтверждено снижение усилий в гидроцилиндрах системы CVC не менее чем на 30%. Отмечены недостатки, обнаруженные при экспериментальных исследованиях. Определены направления дальнейшего совершенствования алгоритмов управления.

Ключевые слова: автоматическое регулирование, прокатный стан, листовой прокат, профиль, системы, совершенствование, экспериментальные исследования, рекомендации.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшими показателями качества плоского проката (листа либо полосы) являются геометрические размеры и их отклонения по длине и ширине. Для обеспечения размерной точности по ширине служат системы автоматического управления профилем и планшетностью [1, 2]. На толстолистовых станах 5000, введенных в эксплуатацию в истекшие два десятилетия, функционирует система осевого смещения (сдвиги) рабочих валков WRS (Work Roll Shifting), реализующая технологию CVCplus (Continuously Variable Crown) [3]. В комплексе с системой противоишгиба рабочих валков WRB (Work Roll Bending) она обеспечивает размерную точность проката [4, 5]. Схема, поясняющая силовые воздействия на валки при работе этих систем, представлена на рис. 1 [2].

Принцип CVC^{plus} (далее CVC) основан на применении рабочих и опорных валков с несимметричной выпуклостью (S-образных валков) [6–8]. Формы верхнего и нижнего валков идентичны, но взаимно развернуты на 180°. Благодаря осевому смещению таких валков, показанному на рис. 1 горизонтальными стрелками, можно изменять требуемую выпуклость бочки и величину межвалкового зазора по ширине проката. В отличие от станов, производящих тонкую полосу, на толстолистовых станах осевая сдвигка обеспечивается в промежутках между пропусками, а противоишгиб – непосредственно во время прокатки. В результате обеспечивается заданная форма поперечного сечения проката, показанная на рис. 1 в виде контуров. Тем самым поддерживается более точный профиль за счет регулирования поперечной разнотолщинности. Кроме того, данный вид регулирования обеспечивает «рассеивание» износа по длине бочки валков. Также в функции системы входит устранение явления утонения кромок.

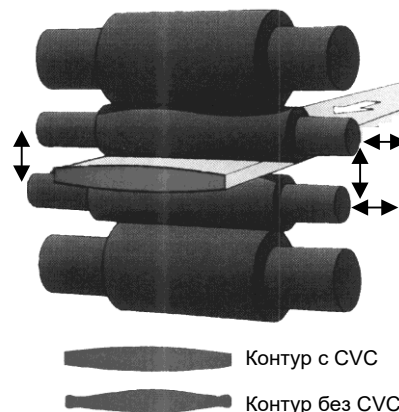


Рис. 1. Силовые воздействия при регулировании профиля

Принцип CVC^{plus} (далее CVC) основан на применении рабочих и опорных валков с несимметричной выпуклостью (S-образных валков) [6–8]. Формы верхнего и нижнего валков идентичны, но взаимно развернуты на 180°. Благодаря осевому смещению таких валков, показанному на рис. 1 горизонтальными стрелками, можно изменять требуемую выпуклость бочки и величину межвалкового зазора по ширине проката. В отличие от станов, производящих тонкую полосу, на толстолистовых станах осевая сдвигка обеспечивается в промежутках между пропусками

ми, а противоизгиб – непосредственно во время прокатки. В результате обеспечивается заданная форма поперечного сечения проката, показанная на рис. 1 в виде контуров. Тем самым поддерживается более точный профиль за счет регулирования поперечной разнотолщинности. Кроме того, данный вид регулирования обеспечивает «рассеивание» износа по длине бочки валков. Также в функции системы входит устранение явления утонения кромок.

Система WRB является подчиненной для системы автоматического регулирования профиля Automatic profile control (APC) [9–11]. Противоизгиб рабочих валков служит для компенсации их прогиба, возникающего из-за давления металла, а также для прижима рабочих валков к опорным. При отклонении параметров зазора от заданных вводят компенсацию путем дополнительного изгиба верхнего и нижнего валков в противоположных направлениях, показанных на рис. 1 вертикальными стрелками. Принудительный изгиб валков является оперативным способом регулирования, основанным на упругой податливости тел действию изгибающего момента и поперечных сил. Он используется для быстрой компенсации профиля, если усилие прокатки отклоняется от ожидаемого. Таким образом, система WRB корректирует отклонения профиля, которые не были устранены при SVC-перемещении. Это объясняется тем, что профиль SVC выставляется в паузах между проходами и рассчитывается исходя из ожидаемого усилия прокатки.

При осевом перемещении валков без металла усилие противоизгиба поддерживается на заданном уровне балансировки, составляющем 2118 кН. Максимальное усилие во время прокатки составляет 3800–4000 кН. Усилие балансировки необходимо для обеспечения прижатия рабочих валков к опорным. Это исключает пробуксовку между рабочими и опорными валками при SVC-перемещении.

Работу системы противоизгиба валков обеспечивают гидравлические цилиндры (ГЦ), которые устанавливаются под подушки рабочих валков (рис. 2). Здесь же показано крепление гидроцилиндров, выполняющих осевую сдвигку валков в положительном направлении – в сторо-

ну привода (Drive side) либо отрицательном направлении – в сторону оператора (Operator side).

Работа системы осевого смещения валков рассмотрена в публикациях [12, 13] и других. Описание принципов регулирования, реализованных в системах противоизгиба, изложено в [14, 15]. Отдельные результаты исследований системы SVC стана 5000 рассмотрены в работах авторов представленного доклада [16–18]. В публикациях [19–20] исследована совместная работа системы WRS (в структуре SVC) и системы горизонтальной балансировки шпинделя горизонтальной клетки толстолистового стана.

Авторами выполняются разработки, направленные на улучшение геометрических размеров и профиля проката, выпускаемого широкополосными и толстолистовыми станами. Также значительное внимание уделяется ограничению силовой взаимосвязи и взаимного влияния электрических (либо электрических и гидравлических) приводов. Отдельные результаты опубликованы в работах [21–25]. В то же время, совместная работа систем осевого смещения и противоизгиба валков исследованы недостаточно. Ниже представлены результаты экспериментальных исследований взаимного влияния систем автоматического регулирования (САР) SVC и противоизгиба валков стана 5000. При этом наибольшее внимание уделяется анализу и совершенствованию алгоритмов системы WRB.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Характеристика системы WRB стана 5000

Как отмечено выше, система WRB обеспечивает устранение неплоскостности и поперечной разнотолщинности проката путем механического воздействия на рабочие валки с помощью исполнительных гидроцилиндров, установленных между подшипниками шейки верхнего и нижнего рабочих валков. Для каждого рабочего валка используются четыре гидроцилиндра, расположение которых для одной стороны показано на схеме клетки на рис. 3, а. Здесь же представлена функциональная схема САР этой системы.

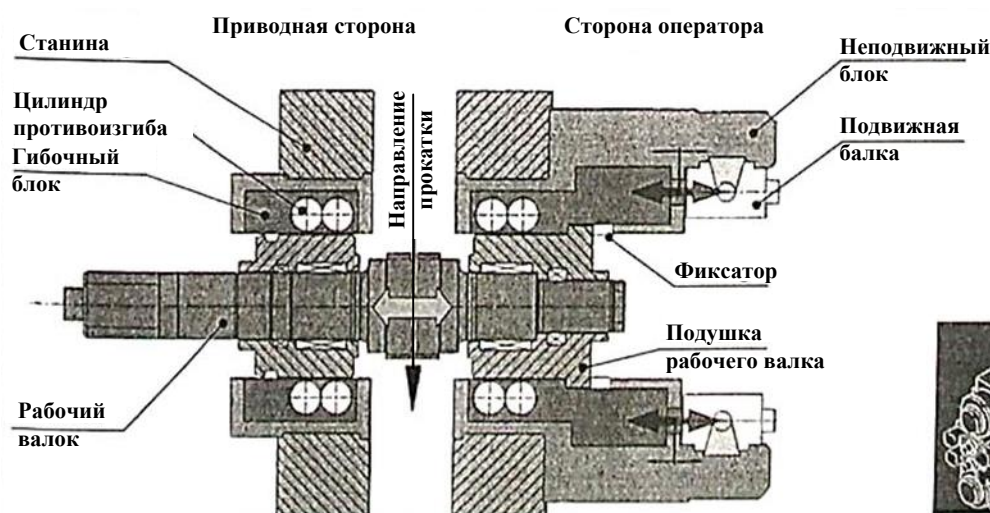


Рис. 2. Размещение гидравлического оборудования систем SVC и противоизгиба

При отсутствии металла в клетке регулятор усилия получает задание, обеспечивающее усилие балансировки, благодаря которому рабочие валки прижимаются к опор-

ным. После входа металла в клетку осуществляется изменение задания на усилие изгиба валков. Расчетное усилие изгиба формируется моделью прокатки, далее к этому

сигналу добавляется ручная коррекция оператора. Автоматическое регулирование профиля во время прокатки осуществляется системой APC, в структуру которой входит система WRB. Система APC (регулирование профиля через изгиб) воздействует на задание усилия противоизгиба при отклонении усилия прокатки от ожидаемого [26, 27]. Для этого из расчетного усилия прокатки, поступающего от регулятора профиля, вычитается его текущее (актуальное) значение. Полученный сигнал с учетом коррекции от оператора используется в качестве дополнительного задания на регулятор усилия противоизгиба. Коэффициент усиления пропорционального регулятора определяется моделью прокатки второго уровня АСУ ТП. За счет

этого осуществляется регулирование сигнала на выходе системы при отклонениях фактической величины усилия от заданной.

На рис. 3, б представлена функциональная схема задания усилия на противоизгиб, поясняющая алгоритм проектного варианта системы WRB, реализованный на стане. При отсутствии металла в валках выходной сигнал регулятора профиля соответствует заданному усилию балансировки. В режиме прокатки регуляторы противоизгиба всех цилиндров получают с выхода регулятора профиля дополнительное задание.

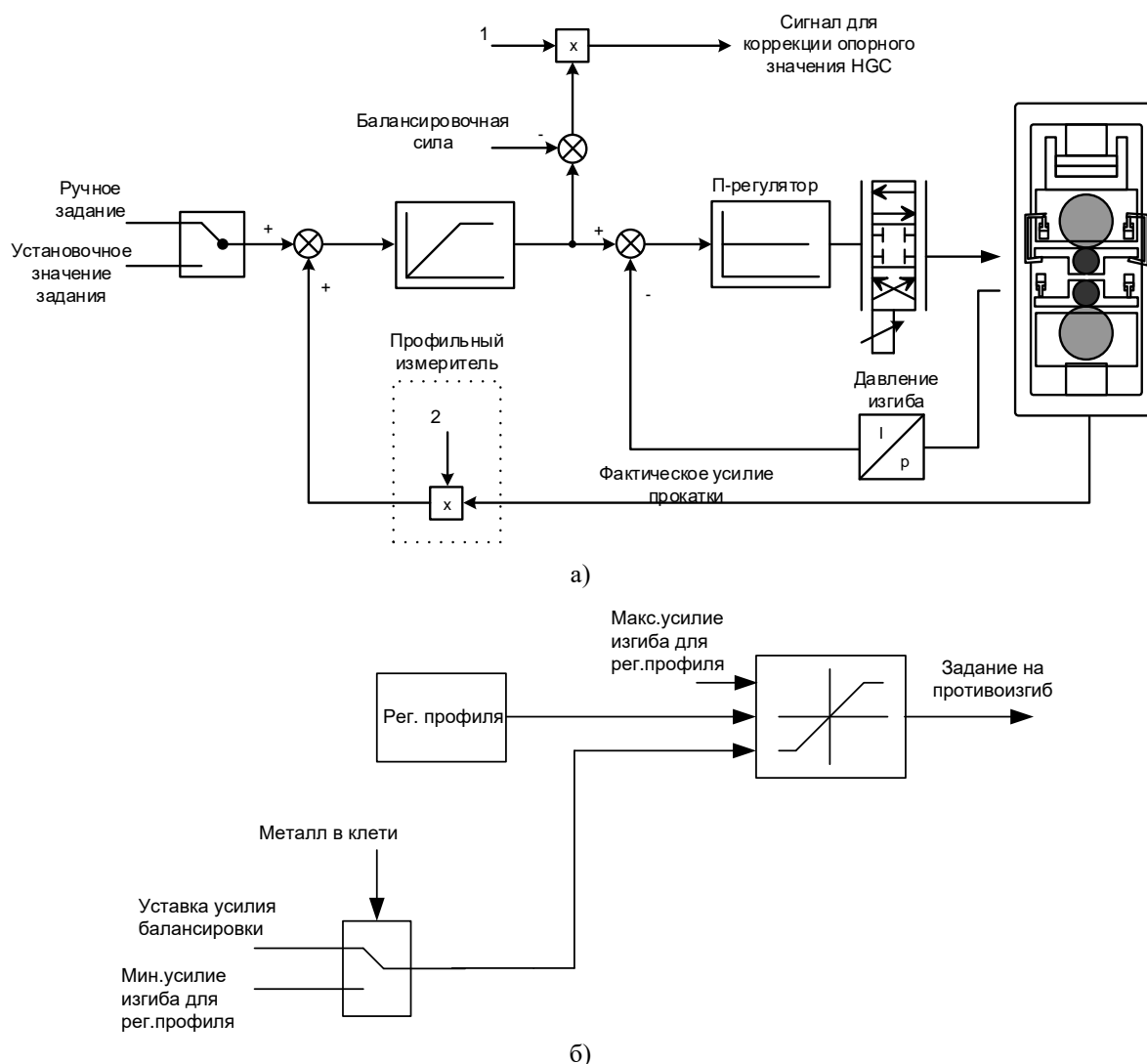


Рис. 3. Функциональная схема САУ усилия противоизгиба (а) и проектная схема задания усилия противоизгиба на один гидроцилиндр (б)

Как отмечалось, при осевой сдвигке валков в промежуточных между проходами система WRB прижимает рабочие валки к опорным с номинальным усилием балансировки 2118 кН. Это исключает проскальзывание между опорными и рабочими валками. Однако прижатие рабочих валков к опорным с таким усилием во время SVC-перемещения приводит к повышенным усилиям в цилиндрах осевой сдвигки. Это приводит к повреждению S-образного шлифа валков, отрицательно сказывается на их

стойкости и повышает опасность возникновения аварий, связанных со срывом гидроцилиндра. Наибольшая опасность развития негативных процессов возникает для нижнего рабочего валка. Это связано с тем, что он дополнительно воздействует на гидроцилиндры своим весом. В результате изгибающее усилие и вес валка суммируются. Повышенное усилие сдвигки может привести к повреждению крепления цилиндров SVC (рис. 2). Это снижает

надежность работы стана и усложняет работу обслуживающего персонала.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Совершенствование системы

С целью устранения указанного недостатка предложен алгоритм управления, согласно которому предлагается автоматически уменьшать задание на противоизгиб нижнего рабочего вала при CVC-перемещении. Усовершенствованная схема задания усилия представлена на рис. 4. В алгоритм системы, рис. 3, б, добавлена функция снижения усилия в гидроцилиндрах противоизгиба нижнего вала (Bot) со стороны привода (ds) и со стороны оператора (os). Это обеспечивается переключением контакта двухпозиционного переключателя в нижнее положение. В результате при перестройке на следующий проход на вход блока ограничения подается сигнал «Уставка усилия для режима перемещения CVC». Коммутация переключателя осуществляется при одновременном выполнении следующих условий:

- отсутствие металла в клетке, для этого сигнал о наличии металла подается на инверсный вход логического элемента;
- несоответствие фактического положения CVC заданному положению (независимо от знака рассогласования);

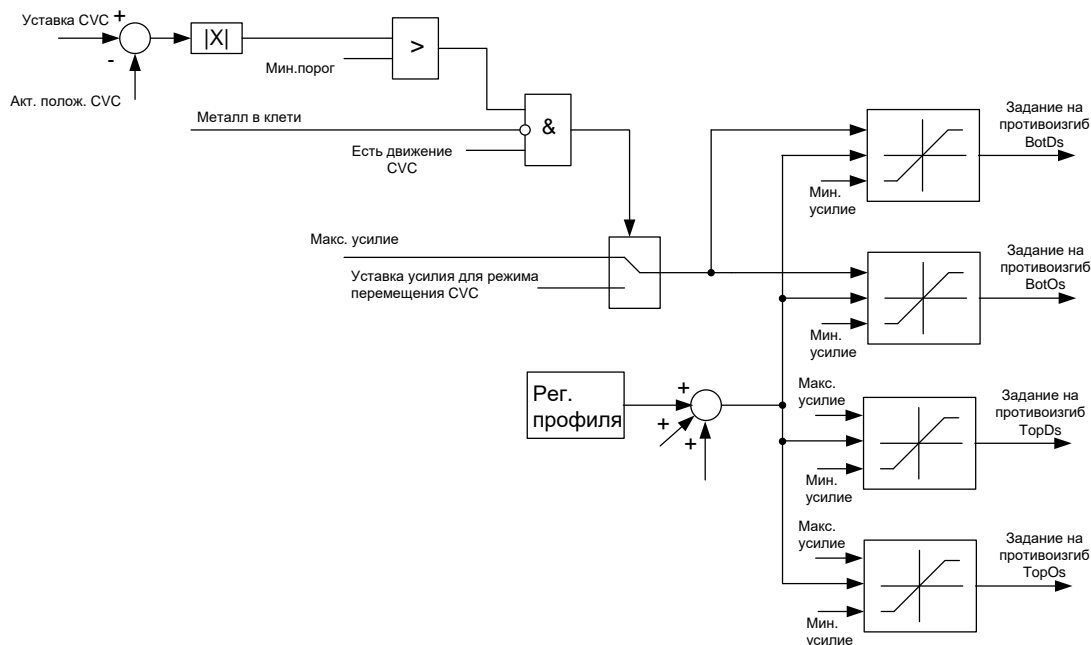


Рис. 4. Усовершенствованная схема системы задания усилия противоизгиба при осевой сдвигке вала

Таблица 1

Установившиеся усилия в гидроцилиндрах CVC нижнего вала в проектном и предложенном вариантах

Параметр	На входной стороне клетки			На выходной стороне клетки		
	в системе, рис. 5, а, кН	в системе, рис. 5, б, кН	разница, %	в системе, рис. 5, а, кН	в системе, рис. 5, б, кН	разница, %
Временной интервал	t_1-t_2	t_5-t_6	-	t_1-t_2	t_5-t_6	-
Усилие, кН	700	350	50	900	650	28
Временной интервал	t_3-t_4	t_7-t_8	-	t_3-t_4	t_7-t_8	-
Усилие, кН	-850	-550	35	-850	-550	35

- превышение величиной рассогласования заданного минимального порогового значения;
- должно осуществляться CVC-перемещение вала.

Результаты экспериментов

На рис. 5 представлены характерные осциллограммы, полученные при CVC-перемещении нижнего рабочего вала в паузе между пропусками заготовки. Расположение окон (сверху вниз): 1 – усилия ГЦ системы WRB со стороны привода и со стороны оператора, кН; 2 – актуальные позиции штоков ГЦ системы CVC на входе и выходе клетки (со стороны печей и со стороны отводящего рольганга) и заданная позиция вала, мм; 3 – усилия в ГЦ системы CVC нижнего вала, кН; 4 – линейные скорости верхнего и нижнего рабочих валков, м/с.

При настройке на каждый проход валики перемещаются в противоположных осевых направлениях. На осциллограммах зафиксировано перемещение нижнего вала в сторону оператора в интервале времени t_1-t_3 из положения сдвига на 130 мм до нулевого положения. В связи с таким направлением перемещения отклонения усилий, представленные в окне 3, происходят в сторону отрицательных значений. Для дальнейших рассуждений это не имеет принципиального значения. Потому ниже рассматриваются абсолютные величины, и знак «минус» при числовых значениях не ставится. Результаты сопоставления усилий представлены в табл. 1.

В проектом варианте (рис. 5, а) перемещение сопровождается увеличением усилий в ГЦ системы SVC от нуля до 1000 кН (окно 3, момент времени t_2). При дальнейшем линейном перемещении установившиеся усилия в ГЦ, расположенных на входе и выходе клетки, находятся в пределах 850–900 кН. Усилия верхних и нижних ГЦ со стороны привода и со стороны оператора (окно 1) практически не изменяются и находятся в пределах заданного значения 2118 кН. Как отмечалось выше, при таких усилиях возникает опасность повреждения рабочих валков в местах соприкосновения с опорными валками.

Согласно алгоритму предложенной системы, для обеспечения безопасной осевой сдвижки перед ее началом снижается задание на усилие в ГЦ системы противоизгиба нижнего валка (рис. 5, б, окно 1). Благодаря этому в период t_1 – t_3 перемещения валка абсолютные усилия в ГЦ системы SVC находятся в пределах 500–700 кН (исключение составляет интервал t_2 – t_4 , о котором будет сказано ниже). Необходимым условием перемещения является вращение валков. Для подтверждения этого в окне 4 на обоих рисунках показаны трапециевидные тахограммы заданных и фактических линейных скоростей валков.

Как следует из табл. 1, при работе предложенной системы усилия на входной и выходной сторонах снижаются соответственно на 50% и 28%. Такое различие может быть связано с отличием усилий, создаваемых силами трения между рабочим и опорным валками S-образной формы при их разном взаимном расположении. Для более достоверной оценки результатов целесообразны сбор и обработка статистических данных.

Сравнение усилий в ГЦ системы SVC на рис. 5, а и 5, б, и данные табл. 1 показывают, что при реализации предложенного алгоритма они снижаются более чем на 30%. Это обеспечивает устранение указанных выше недостатков, связанных с осевой сдвижкой валков при проектом алгоритме управления.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В подтверждение сделанного вывода на рис. 6 приведены осциллограммы, аналогичные представленным рис. 5. Отличием является присутствие в окне 1 осциллограммы усилия прокатки. Анализируются процессы при двух осевых перемещениях нижнего валка из нулевого положения на 130 мм в положительном направлении (в сторону привода) в интервалах времени t_1 – t_2 и t_5 – t_6 , а также при его возвращении в исходное нулевое положение (интервалы времени t_3 – t_4 и t_7 – t_8). Перемещение и возврат в интервалах t_1 – t_2 и t_3 – t_4 зафиксированы при проектом алгоритме задания усилия противоизгиба, аналогичные процессы в интервалах t_5 – t_6 и t_7 – t_8 – при предложенном алгоритме задания.

Анализ усилий в ГЦ системы SVC (окно 4) на входной и выходной сторонах клетки подтверждает преимущества предложенного варианта. Видно, что установившиеся усилия при реализации предложенного алгоритма

(интервалы t_5 – t_6 и t_7 – t_8) значительно ниже, чем при работе проектной системы (интервалы t_1 – t_2 и t_3 – t_4).

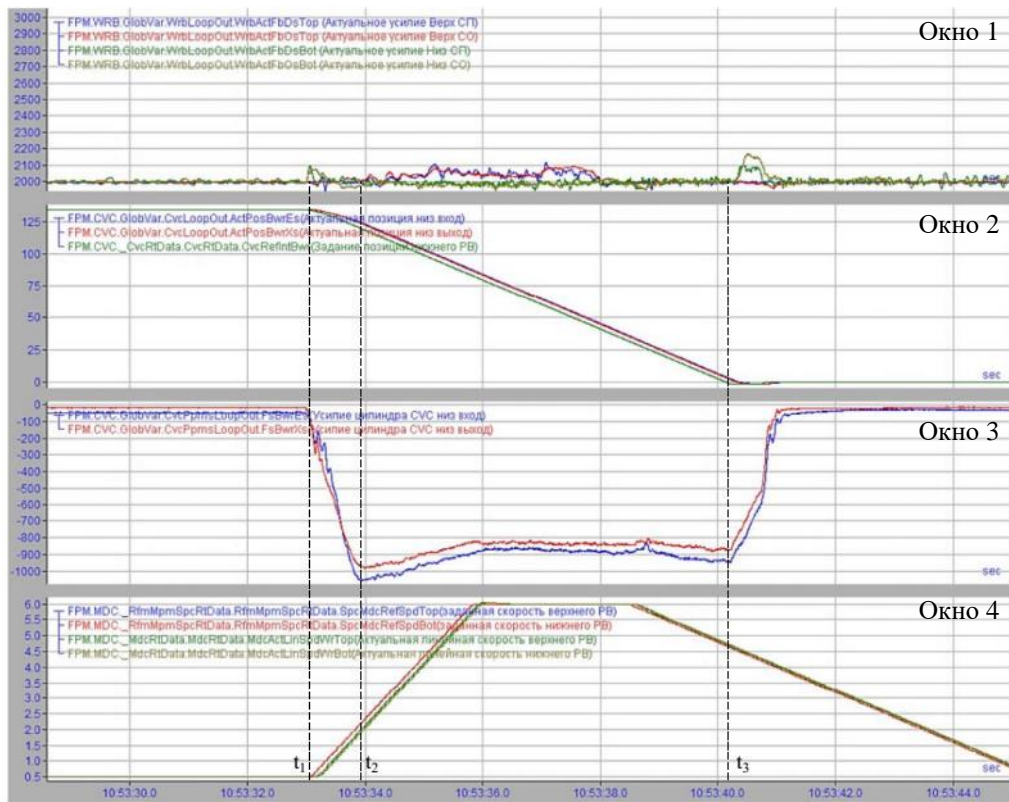
Вместе с тем, при проведении экспериментов обнаружен существенный недостаток внедренного алгоритма. Установлено, что уменьшение усилий в ГЦ противоизгиба до уровня балансировки при незавершенном осевом перемещении валков приводит к увеличению усилий в гидроцилиндрах SVC. Это следует из осциллограмм, представленных выше на рис. 5, б. После увеличения усилий ГЦ противоизгиба нижнего валка в момент времени t_3 (окно 2) возникает рост абсолютных значений усилий в ГЦ системы SVC (окно 3). В интервале t_2 – t_3 они изменяются от 650 до 850 кН, т.е. на 24% с последующим снижением до нулевого уровня в момент t_4 . Усилие противоизгиба в конце SVC-перемещения достигает 850 кН. В то же время подобные отклонения усилий на рис. 5, а отсутствуют.

Сделанный вывод подтверждают осциллограммы на рис. 6. Завершение SVC-перемещений (окно 3) в проектной системе не сопровождается ростом усилий в ГЦ системы SVC (окно 4, моменты t_2 и t_4). Аналогичные переходные процессы, снятые при работе предложенной системы (моменты t_6 , t_8), обрабатывается со значительными динамическими усилиями. Численные значения приращений приведены в табл. 2.

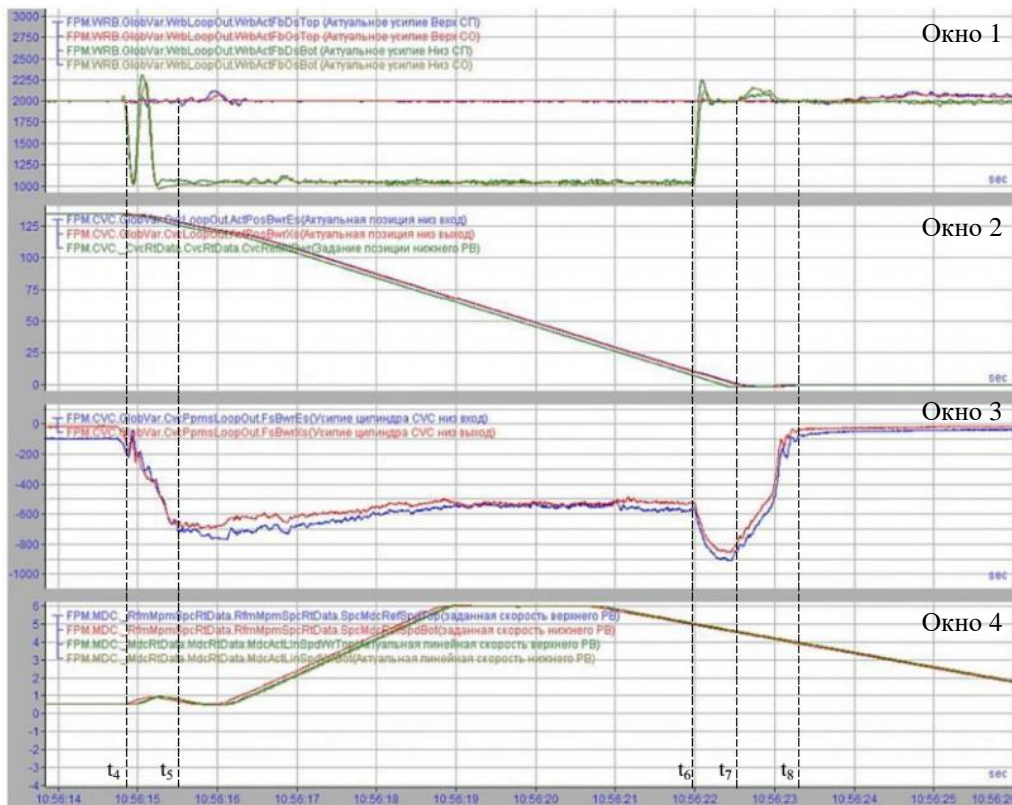
Анализ представленных результатов показывает, что приращения усилий в ГЦ системы SVC в предложенном варианте составляют 86% и 55%. Аналогичные отклонения в проектом варианте составляют 6–7%. При этом максимально абсолютное усилие в момент t_8 равно установившемуся значению момента (-850 кН), зафиксированному при работе проектного варианта системы (табл. 1, интервал t_1 – t_2). Аналогичные изменения прослеживаются на осциллограммах, представленных на рис. 5, б. Здесь усилие противоизгиба в конце SVC-перемещения также достигает (-850 кН).

Очевидно, что обнаруженный недостаток снижает эффективность предложенного варианта системы управления противоизгибом. Это предопределяет необходимость разработки дополнительных технических решений, направленных на его устранение.

В качестве наиболее простого решения предложено алгоритмически организовать запрет на изменение заданий на изгиб валков до завершения их SVC-перемещения. Промышленные испытания такого алгоритма проведены на стане 5000. В результате экспериментально подтверждено, что увеличения усилий в ГЦ системы SVC не происходит. В качестве более сложного решения возможен вариант, согласно которому осуществляется автоматическое регулирование усилия противоизгиба в функции текущего усилия в гидроцилиндрах системы SVC. Таким образом, будет обеспечена взаимосвязанная работа систем WRB и SVC при осевом перемещении валков.



а



б

Рис. 5. Отработка усилия в системе противоизгиба рабочих валков: а – при реализации проектного алгоритма задания усилий (рис. 4); б – при реализации предложенного алгоритма; act – фактическое значение; Fb (force balance) – усилие; P – давление; ds – приводная сторона; os – сторона оператора; top – верхний; bot – нижний; Wwr – нижний рабочий валок; Es – входная сторона клетки; Xs – выходная сторона клетки; ref – задание; Int (internal) – внутренний сигнал; Spd – скорость; lin – линейный

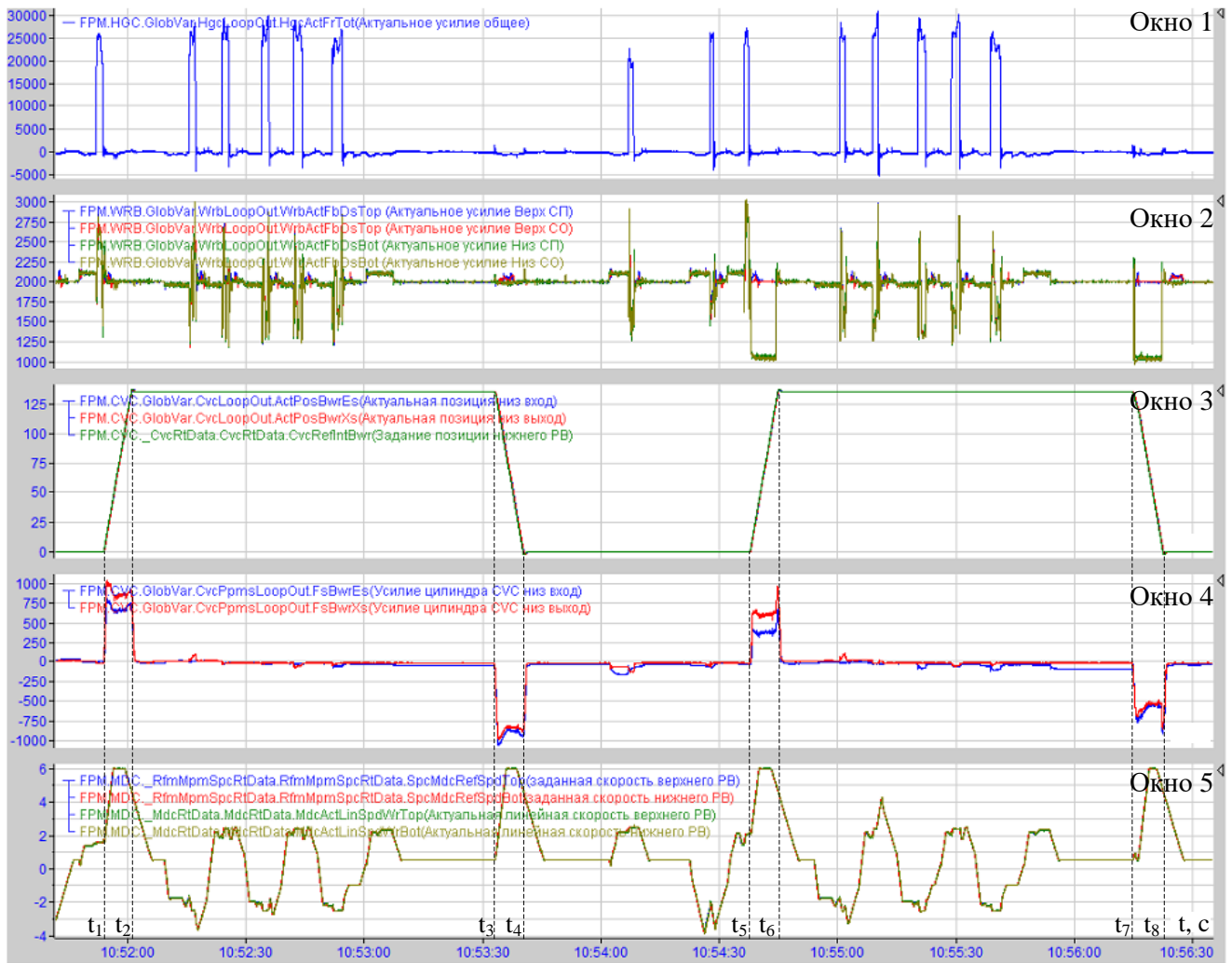


Рис. 6. Работа систем CVC и WRB при проектном и предложенном алгоритмах задания усилия

Таблица 2

Динамические усилия в ГЦ нижнего валка в моменты окончания CVC-перемещения

Характер процесса	Момент времени	Система	Установившееся значение до момента, кН	Максимальное абсолютное значение, кН	Приращение, %
Перемещение на 130 мм	t ₂	проект.	700	750	7
	t ₆	предлож.	350	650	86
Возврат	t ₄	проект.	-850	-900	6
	t ₈	предлож.	-550	-850	55

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования системы CVC стана 5000 подтвердили возникновение значительных усилий в гидроцилиндрах при осевых перемещениях валков. Причиной является то, что перемещение происходит при заданном усилии балансировки около 2000 кН. Представленные осциллограммы подтверждают, что усилия в ГЦ системы CVC нижнего валка при реализации проектного алгоритма задания усилия системы WRB находятся в пределах 850–900 кН.

Для устранения указанного недостатка предложен усовершенствованный алгоритм системы формирования задания усилия на противоизгиб нижнего рабочего валка. Достижение результата обеспечивается путем снижения

задания усилия в ГЦ системы WRB до минимального усилия балансировки 1000 кН перед началом работы системы CVC. Эффективность данного предложения подтверждена экспериментально. Усилия в ГЦ системе CVC при перемещении валков снижаются на 27–30% и находятся в пределах 600–650 кН.

Вместе с тем, в ходе экспериментальных исследований установлено, что возвращение усилий противоизгиба на уровень балансировки во время перемещения валков приводит к увеличению усилий в ГЦ системы CVC (зафиксированы увеличения до 850 кН). Для исключения данной ситуации предложено в алгоритм управления системы WRB ввести запрет на изменение задания усилий противоизгиба во время работы системы CVC. При проведении

экспериментов подтверждена эффективность данного алгоритма.

Основной технико-экономический эффект от внедрения предложенных разработок заключается в повышении стойкости рабочих валков и снижении показателя расхода валков. Длительная эксплуатация систем WRB и CVC клетки стана 5000 с использованием предложенных алгоритмов подтверждает сделанные выводы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Селиванов И.А. Совершенствование автоматизированных электроприводов и диагностика силового электрооборудования / И.А. Селиванов, А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, В.Р. Храмшин и др. // Изв. вузов. Электромеханика. – 2009. – № 1. – С. 5-11.

2. Салганик В.М. Тонкослябовые литейно-прокатные агрегаты для производства стальных полос / В.М. Салганик, И.Г. Гун, А.С. Карандаев, А.А. Радионов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 506 с.

3. Shubin A.G. System of automated control of hydraulic screw-down mechanisms of plate mill stand / A.G. Shubin, B.M. Loginov, V.R. Khrumshin, S.A. Evdokimov, A.S. Karandaev // Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). – 2015. – 6 p. doi:10.1109/MEACS.2015.7414858.

4. Шиляев П.В. Автоматизация процесса прокатки толстого листа на стане 5000 / П.В. Шиляев, Д.Ю. Усатый, А.А. Радионов // Известия вузов. Электромеханика. – 2011. – № 4. – С. 15-18.

5. Гасияров В.Р. Построение регулятора толщины полосы на толстолистовом стане горячей прокатки / В.Р. Гасияров // Электротехнические системы и комплексы. – 2011. – № 19. – С. 149-153.

6. Guo Z.-F. Simulation of shape control for CVC hot strip rolling / Z.-F. Guo, X.-Y. Sun, Q. Wang, Y. Zhang, H.A. Guo // Procedia Engineering. – 2011. – Vol. 15. – P. 1166-1170. doi:10.1016/j.proeng.2011.08.215.

7. Wang Y.R. Shape control simulation on 4-high CVC mill [J] / Y.R. Wang, J.G. Yuan, H.M. Liu // Journal of Iron and Steel Research. – 2005. – Vol. 12 (2). – P. 25-32.

8. Bald W. Continuous variable crown (CVC) rolling / W. Bald, G. Beiseman, H. Feldmann, T. Schultes. – AISE Year Book, 1987. – P. 127-136.

9. Masayoshi S. Profile and flatness set up system for rolling mill / S. Masayoshi, K. Masahiro // IHI Engineering Review. – 2009. – Vol. 42, No. 1. – P. 26-31.

10. Sato M. Strip crown and flatness control for hot strip mill / M. Sato, M. Kuchi, H. Honjo, Y. Abe // Ishikawajima-Harima Engineering Review. – 2004. – Vol. 44, No. 5. – P. 352-357.

11. Gasyarov V.R. Improvement of work roll bending control system installed at plate mill stand / V.R. Gasyarov, A.A. Radionov, B.M. Loginov, S.S. Voronin, V.R. Khrumshin // Proceedings of the 9-th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE 2017). – Sydney, 2017. – P. 269-273. doi:10.1145/3057039.3057105.

12. Gasyarov V.R. Mathematical modeling of an automatic control system for profiled rolling of slabs in reversing plate-mill stands / V.R. Gasyarov, S.N. Baskov, S.S. Voronin, B.M. Loginov, V.R. Khrumshin // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical

and Electronic Engineering, EIConRus. – 2019. – P. 505-510. doi: 10.1109/EIConRus.2019.8656797.

13. Восканьянц А.А. Автоматизированное управление процессами прокатки: учеб. пособие / А.А. Восканьянц. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 85 с.

14. Максимов Е.А. Производство планшетных полос при прокатке: справ. пособие / Е.А. Максимов, Р.Л. Шаталов, Н.Ш. Босхамджиев. – М.: Теплотехник, 2008. – 336 с.

15. Воронин С.С. Прогиб валков как параметр, влияющий на поперечную разнотолщинность листа и система управления противоишгибом толстолистовых станов горячей прокатки / С.С. Воронин, Д.Ю. Усатый // Russian Internet Journal of Electrical Engineering. – 2013. – Vol. 13, № 1. – С. 51-55.

16. Воронин С.С. Использование системы осевой сдвижки валков для корректировки межвалкового зазора на толстолистовых станах горячей прокатки / С.С. Воронин, Д.Ю. Усатый, В.Р. Гасияров, А.А. Радионов // Russian Internet Journal of Industrial Engineering. – 2015. – Vol. 3, № 1. – С. 45-48.

17. Гасияров В.Р. Автоматическое управление геометрией проката на толстолистовом стане 5000 горячей прокатки / В.Р. Гасияров, А.А. Радионов, Л.В. Радионова, Д.Ю. Усатый // Тр. IV Всероссийской мультиконференции по проблемам управления. – Таганрог, 2011. – С. 307-309.

18. Гасияров В.Р. Системы регулирования толщины, профиля и планшетности полосы на толстолистовом стане 5000 ОАО “ММК” / В.Р. Гасияров, О.А. Залогин, А.А. Радионов // Сб. трудов межрегион. науч. конф. “Наука и производство Урала”. – Новотроицк: НФ МИСиС, 2010. – С. 107-112.

19. Karandaev A.S. Setting automated roll axial shifting control system of plate mill / A.S. Karandaev, B.M. Loginov, A.A. Radionov, V.R. Gasyarov // Procedia Engineering, 2017. – Vol. 206. – P. 1753-1750. doi:10.1016/j.proeng.2017.10.709.

20. Gasyarov V.R. Coordinating the modes of the axial roll shifting and roll bending systems of a roll mill stand / V.R. Gasyarov, A.A. Radionov, A.S. Karandaev, B.M. Loginov, V.R. Khrumshin, A.S. Maklakov // IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – 2019. – Vol. 1. – P. 330-335. doi:10.1109/IECON.2019.8927789.

21. Карандаев А.С. Согласование скоростей взаимосвязанных электроприводов клетей черновой группы прокатного стана / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, А.А. Радионов, И.Ю. Андрушин, В.В. Галкин, А.Н. Гостев // Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу: ФГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет». – Иваново, 2012. – С. 652-657.

22. Андрушин И.Ю. Автоматическая коррекция скоростей электроприводов клетей стана 2000 при прокатке трубной заготовки / И.Ю. Андрушин, В.В. Галкин, В.В. Головин, А.С. Карандаев, А.А. Радионов, В.Р. Храмшин // Изв. вузов. Электромеханика. – 2011. – № 4. – С. 31-35.

23. Храмшин В.Р. Математическая модель взаимосвязанных электротехнических систем непрерывной группы широкополосного стана / В.Р. Храмшин, И.Ю. Андрушин, А.Н. Гостев, А.С. Карандаев // Машиностроение:

сетевой электронный научный журнал. – 2013. – №1. – С. 12-21.

24. Карандаев А.С. Совершенствование автоматизированных электроприводов агрегатов прокатного производства / А.С. Карандаев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – № 1. – С. 3-15.

25. Галкин В.В. Алгоритм расчета скоростных и нагрузочных режимов электроприводов клетей прокатного стана при прокатке толстых полос / В.В. Галкин, А.С. Карандаев, В.В. Головин, А.А. Радионов, В.Р. Храмшин, В.Р. Гасияров, О.А. Залогин // Известия ТулГУ. Технические

науки. Вып. 3: в 5 ч. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – Ч. 2. – С. 12-17.

26. Maklakova E.A. The work roll bending control system of the hot plate rolling mill / E.A. Maklakova, A.S. Maklakov, V.R. Gasiyarov, S.S. Voronin // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129. – P. 37-41.

27. Karandaev A.S. Force limiting at roll axial shifting of plate mill / A.S. Karandaev, B.M. Loginov, V.R. Gasiyarov, V.R. Khrumshin // Procedia Engineering. – 2017 – Vol. 206. – P. 1780-1786. doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.713.

Improvement of Automated Systems for Regulating the Profile of Rolled Products in Hot Rolling Mills

Radionov A.A., Gasiyarova O.A., Voronin S.S.

South Ural State University
Chelyabinsk, Russia

radionov.mail@gmail.com, o.ll.ja1985@gmail.com, stsvo-
ronin@gmail.com

Loginov B.M.

Magnitogorsk Iron and Steel Works
Magnitogorsk, Russia
loginov_bm@mmk.ru

Abstract. The system of axial displacement of the work rolls WRS, which implements the CVCplus technology, and the system of automatic control of the bend of the work rolls WRB, which ensure compliance with the dimensional accuracy of flat products in width, are presented. The principle of operation and functional purpose of these systems are considered. The WRS system provides a predetermined cross-sectional shape for rolled products by adjusting its cross-section thickness variation. The WRB system corrects profile deviations that were not eliminated during the CVC movement, and also ensures that the work rolls are pressed against the support rolls. The structure of the automatic control system of the anti-bending is considered. It is noted that its disadvantage is the high balancing force during axial displacement of the rolls in the intervals between the passes. This leads to a deterioration in the operating conditions of the equip-

ment and an increase in the risk of accidents. An improved system is proposed, which provides automatic reduction of the task for counter-bending of the lower work roll during CVC-movement. Oscillograms of transient processes during the implementation of the design and developed control algorithms are considered. Reduction of efforts in the hydraulic cylinders of the CVC system by at least 30% has been confirmed. The disadvantages found in experimental studies are noted. The directions of further improvement of control algorithms are determined.

Keywords: automatic control, rolling mill, sheet metal, profile, systems, improvement, experimental research, recommendations.

Анализ погрешности гибридной модели краткосрочного прогнозирования электропотребления г. Москвы

Вялкова С.А., Надтока И.И.
ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова
Новочеркасск, Россия
ii_nadtoka@mail.ru, mazaeva_sveta@mail.ru

Аннотация. Для краткосрочного прогнозирования суточных графиков активной мощности г. Москвы предложена гибридная модель, сформированная на основе алгоритмов метода многомерного сингулярного спектрального анализа и нечеткой нейронной сети с учетом фактических и прогнозных данных по температуре воздуха и естественной освещенности. В гибридной модели в модуле многомерного сингулярного спектрального анализа временные ряды электропотребления и метеофакторов разлагаются на независимые компоненты, с помощью которых формируются аддитивные трендовые, гармонические и случайные составляющие, используемые в модуле нечеткой нейронной сети.

Исходными данными являлись архивы временных рядов электропотребления, температуры воздуха, облачности и естественной освещенности для территории г. Москвы за период с 2012 по 2016 годы. В качестве инструмента моделирования применялось программное обеспечение, реализованное на языке C#.

Выполнены краткосрочные прогнозы суточных графиков активной мощности в течение года (с сентября 2015 г. по август 2016 г.). В результатах краткосрочного прогнозирования суточных графиков активной мощности за месяц показано, что в большинстве тестовых примеров получены результаты в пределах допустимых погрешностей.

Предложенный вариант краткосрочного прогнозирования суточных графиков активной мощности позволяет получить погрешность в течение года в диапазоне от 1%-2,3%. Кроме этого разработанный алгоритм позволяет использовать сезонные закономерности между суточными графиками активной мощности и метеофакторами за несколько лет.

Ключевые слова: краткосрочное прогнозирование активной мощности, температура воздуха, естественная освещенность, многомерный сингулярный спектральный анализ, нейронная нечеткая сеть, средняя относительная ошибка прогноза.

ВВЕДЕНИЕ

В данной статье приведены результаты прогнозирования суточных графиков активной мощности для г. Москвы, электропотребление которой составляет около 95 % от всей Московской энергосистемы. Суточные графики активной мощности мегаполиса значительно отличаются по форме от других суточных графиков энергосистем, представленных в ряде работ [1-16] и др. Основным отличием электропотребления мегаполиса является влияние большего количества факторов в меньших энергосистемах, что значительно усложняет задачу краткосрочного прогнозирования.

При прогнозировании суточных графиков активной мощности используется большое количество различных методов [1-16]. Все эти методы используют данные суточных графиков активной мощности, в некоторых из них прогнозирование выполняется с учетом различных факторов, влияющих на электропотребление. Основными метеофакторами, влияющими на электропотребление и учитываемыми в прогнозных моделях являются температура воздуха, облачность и естественная освещенность [1-16].

Временной ряд, описывающий наблюдаемую величину электропотребления в виде графиков нагрузки, представляет собой последовательность значений электропотребления, регистрируемых через промежуток времени 1 час.

Перспективным направлением при краткосрочном прогнозировании суточных графиков активной мощности энергообъединений и энергосистем является использование гибридных моделей, основанных на совместном применении двух методов, например, эволюционных алгоритмов и нейронных сетей или детерминированных (алгебраических) моделей и нейронных сетей [4, 6-16].

Широко применяется в гибридных моделях прогнозирования сингулярный спектральный анализ, который в зарубежной терминологии имеет название Singular Spectrum Analysis (SSA) [17-22]. В работах [12,16, 21-22] метод сингулярного спектрального анализа используется для моделирования временного ряда активной мощности энергосистем.

В данной статье рассмотрена гибридная прогнозная модель краткосрочного прогнозирования суточных графиков активной мощности г. Москвы на основе метода многомерного сингулярного спектрального анализа (Multi-Channel Singular Spectrum Analysis (MSSA)) и нейронных нечетких сетей (ННС) с учетом метеофакторов [12]. Нелинейная природа метода позволяет воспроизводить сложные зависимости и учитывать влияющие на исследуемый ряд факторы.

Исходными данными для моделирования и прогнозирования в настоящей статье являлись архивные данные активной мощности и метеофакторов территории г. Москвы, предоставленные филиалом ОАО «СО ЕЭС» «Региональное диспетчерское управление энергосистемы Москвы и Московской области» (Московское РДУ) [23].

Прогнозные данные температуры воздуха и облачности за 4 часа (3, 9, 15 и 21) предоставлялись ПАК «Метео».

ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СУТОЧНОГО ГРАФИКА АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Структура алгоритма для автоматизированной системы краткосрочного прогнозирования суточных графиков активной мощности, представляет собой гибридную модель (ГМ) на основе MSSA и двух адаптивных нечетких нейронных сетей для трендовой и гармонической составляющих (Рис. 1).

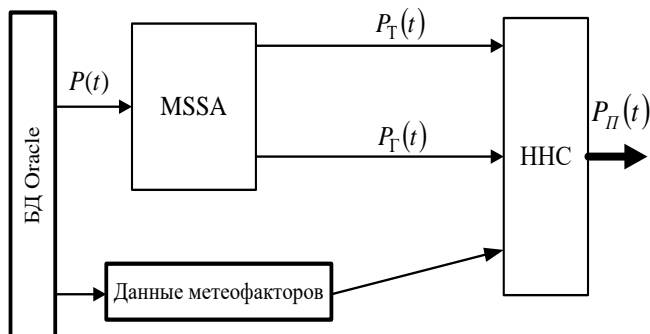


Рис. 1. Обобщенная схема гибридной модели для краткосрочного прогнозирования суточных графиков активной мощности

На вход ННС подаются «Данные факторов»: тип дня, температуры воздуха и естественной освещенности, а также прогнозные метеофакторы вместе с полученными значениями выделенных составляющих ряда суточных графиков активной мощности $P_T(t)$ и $P_G(t)$ (Рис. 1).

Выходом ННС является $k + 24$ часовой вектор мощности $P_{П}(k + t)$. Например, прогноз строится на завтра сегодня в 9.02 часов дня, таким образом, выходом будет вектор мощности равный 39 часам (24-9=15) часов сегодняшнего дня плюс 24 часа завтрашнего дня. Итоговым прогнозом $P_{П}(t)$ являются прогнозные данные с 1.00 час по 00.00 час.

При исследованиях внутренних закономерностей методом MSSA временной ряд активной мощности $P_N = (p_0, \dots, p_{N-1})$ представляется, как сумма трендовых P_T , гармонических P_G и случайных $P_{СЛ}$ аддитивных составляющих:

$$P = P_T + P_G + P_{СЛ}. \quad (1)$$

Траекторная матрица X многомерного ряда (\tilde{P}_N, P_N) имеет вид:

$$\mathbf{X} = [\tilde{P}_1 : \dots : \tilde{P}_K, P_1 : \dots : P_K] = [\mathbf{X}^{(1)}, \mathbf{X}^{(2)}],$$

где P_N - ряд активной мощности текущего года; \tilde{P}_N - ряд активной мощности предыдущего года; N - длина исходного ряда [18].

Процедура вложения образует $K = N - L + 1$ векторов вложения:

$$\mathbf{X}_i = (p_{i-1}, \dots, p_{i+L-2})^T,$$

где $1 \leq i \leq K$. При выполнении разложений MSSA принята длина окна L равная 24 часам.

На рис. 2 представлены основные этапы метода MSSA. Базовый алгоритм состоит из нескольких дополняющих друг друга этапов: вложения, разложения, группировки и восстановления [18].

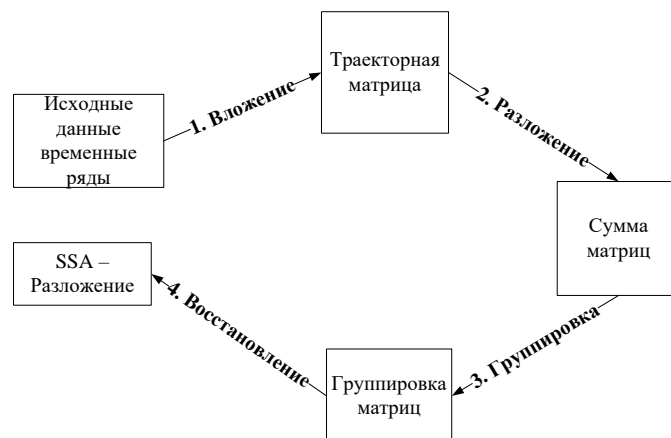


Рис. 2. Основные этапы метода MSSA

Для автоматической группировки компонент векторов был использован алгоритм, предложенный в [20], суть которого заключается в выделении из ряда нужной составляющей путем идентификации собственных векторов при помощи метода низких частот.

После получения аддитивных составляющих в модуле MSSA гибридной модели по формуле (1), выполняется отдельно прогнозирование $P_T(t)$, $P_G(t)$ с помощью ННС [12, 24-30].

Для прогнозирования суточных графиков активной мощности использовалась нечеткая нейронная сеть Такаги-Сугено-Канга (ТСК). Теория данного метода ТСК подробно описана в [24].

Структура ННС ТСК используемой в ГМ, состоящей из шести слоев представлена на Рис. 3.

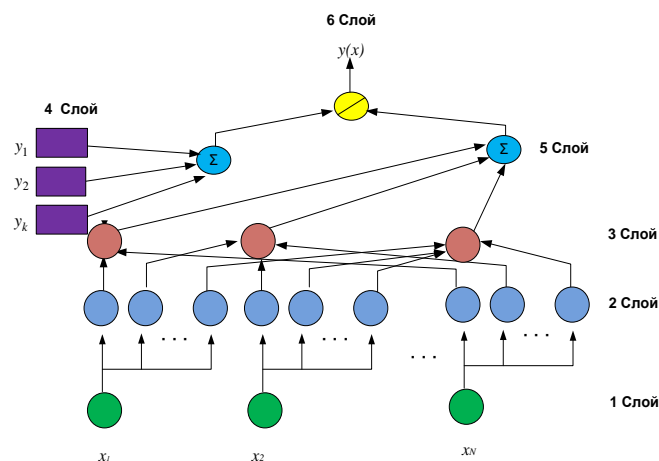


Рис. 3. Обобщенная структура нечеткой нейронной сети

Слой 1 – входных данных выполняет задачу передачи входных переменных второму слою [24].

Слой 2 – определяет степень принадлежности $\mu_A^{(k)}(x_i)$ каждой переменной слоя 1 $x_i (i = 1, 2, \dots, N)$ к

нечеткому множеству. Значения параметров $c_i^{(k)}, \sigma_i^{(k)}, b_i^{(k)}$ подлежат адаптации в процессе обучения [24].

Слой 3 – выполняет объединение входных переменных x_i , рассчитывает значения коэффициента принадлежности $w_k = \prod_{j=1}^N \mu_A^{(k)}(x_j)$ для вектора x [24].

Слой 4 – вычисляет функций ТСК: $y_k = p_{k0} + \sum_{j=1}^N p_{kj} x_j$, где p_{kj} линейные веса ($k = 1, 2, \dots, M$), ($j = 1, 2, \dots, N$) [24].

Слой 5 – выполняет расчет взвешенной суммы сигналов $y_k(x)$ и суммы весов $\sum_{k=1}^M w_k$ [24].

Слой 6 – вычисляет выходной нейрон по формуле:

$$y(x) = \frac{1}{\sum_{k=1}^M w_k} \sum_{k=1}^M w_k y_k.$$

Вначале алгоритма нейронной нечеткой сети определяется количество входных переменных N и M правил. Каждое правило формирует $N+1$ переменных $p_j^{(k)}$ линейной зависимости ТСК. В результате находятся $M(N+1)$ линейных параметров сети. [24].

Процесс обучения разделяется на два этапа.

Этап 1. Расчет линейных параметров p_{kj} полинома ТСК путем решения системы линейных уравнений методом Гревилля для нахождения псевдообратной матрицы [24].

Этап 2. Расчет выходных сигналов $y(i)$, для $i = 1, \dots, p$ и вектора ошибок. Сигналы ошибок направляются через подключенную сеть по направлению к входу сети (обратное распространение) вплоть до первого слоя, где рассчитываются параметры $c_i^{(k)}, \sigma_i^{(k)}, b_i^{(k)}$ [24].

После уточнения нелинейных параметров вновь запускается процесс адаптации параметров функции ТСК (первый этап) и нелинейных параметров (второй этап). Этот цикл повторялся до выполнения критерия минимизации ошибки прогноза [24].

Для прогнозирования использовалась нечеткая нейронная сеть с коэффициентами скорости обучения $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,2$, $\alpha_3 = 0,05$. Данные параметры были найдены опытным путем в результате проведения 50 экспериментов.

Исходные данные для прогнозирования

Исходными данными для построения прогноза являются архивы данных активной мощности $P(t)$, температуры воздуха $\theta(t)$ и освещенности $E(t)$. Временной интервал исходных данных $N \in [X - q - 2; X]$ в 2015 и 2016 годах, а также $N \in [X - q, X + q]$ в 2015, где X – дата прогноза, q – количество дней в интервале.

Длина входного интервала алгоритма прогнозирования $P(t)$ для разных типов суток составила:

- для рабочих $q = 15$;

- для выходных, послепраздничных, предпраздничных, нерегулярных (в днях при переносе праздничных дней) $q = 60$;

- для праздничных q равно количеству праздников в прогнозируемом месяце за три предыдущих года.

Количество исходных данных активной мощности $P(t)$ равно $\tilde{N} = 24 \times d$ часов, где d количество выбранных дней с учетом типа дня суток из ранее приведенного интервала исходных данных. Например, прогноз для 14.12.2020 г. в интервале исходных данных будут рабочие с 5.11.2020 г. по 12.12.2020 г., и с 30.11.2019 г. по 28.12.2019 г. т.е. $d = 30$ дням.

Учитываются также данные за текущие сутки, т.е. сутки $N+X$, где N – недостающие часы текущих суток.

Учет температуры воздуха и естественной освещенности в описываемой ННС осуществлён путем добавления данных $\bar{\theta}(t), \bar{E}(t), \bar{\theta}_{II}(t), \bar{E}_{II}(t)$ во входной слой [12].

Прогнозные $\bar{\theta}_{II}(t), \bar{E}_{II}(t)$ и фактические $\bar{\theta}(t), \bar{E}(t), E_{II}(t)$ при прогнозе активной мощности учитываются, как средние значения за 4 часа ($t = 3, 9, 15, 21$ час).

Для получения прогнозных данных $\bar{E}_{II}(t)$ было выполнено прогнозирование естественной освещенности с учетом облачности и осадков. Прогнозная модель для естественной освещенности основана на многослойной нейронной сети.

РЕЗУЛЬТАТЫ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Прогнозирование осуществлялось в течение года (с сентября 2015 г. по август 2016 г.) для г. Москвы.

Для оценки качества полученных прогнозов были рассчитаны значения ошибки за сутки в процентах по формуле (2) [23].

$$\varepsilon_{ij} = \frac{|p_{\Phi_i} - p_{\Pi_i}|}{p_{\Phi_i}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $i = 1, 2, \dots, 24$ – номер часа; p_{Φ_i} – фактическое значение активной мощности для i -го часа; p_{Π_i} – значение активной мощности для i -го часа, полученное с помощью прогнозной модели, $j = 1, 2, \dots, n$ – номер дня.

Расчет $E_{\Pi kj}$ абсолютной процентной ошибки за сутки выполнялся для всего тестового множества [23]:

$$E_{\Pi kj} = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} \varepsilon_{ij} \quad (3)$$

где номер месяца $k = 1, 2, \dots, 12$.

Итоговая среднемесячная ошибка прогноза для активной мощности рассчитывалась по формуле:

$$E_{\Pi k}^{Mec} = \frac{1}{N_{\Pi}} \sum_{j=1}^{N_{\Pi}} E_{\Pi kj}, \quad (4)$$

где N_{Π} – количество суток в месяце.

На рис. 2, изображены диаграммы относительных ошибок прогнозов за месяц $E_{II}^{Мес}$ с 1 сентября 2015 г. по 31 августа 2016 г. для гибридной модели.

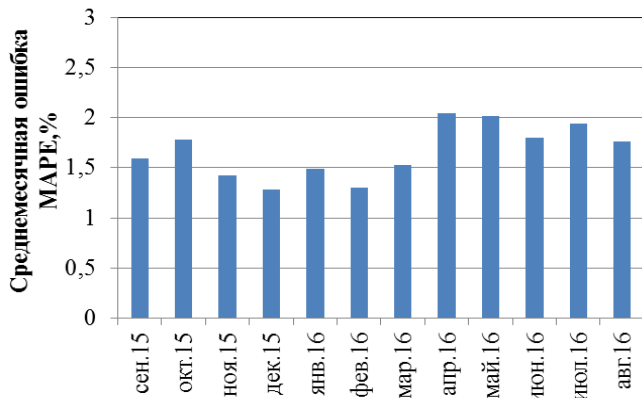


Рис. 4. Диаграмма среднемесячных ошибок прогноза активной мощности с учетом температуры воздуха и освещенности за год (сен. 2015 г.-авг. 2016 г.)

Полученные результаты прогнозных значений среднемесячных ошибок активной мощности $E_{II}^{Мес}$, найденных по формуле (4), показали ошибку меньше допустимой 2% для всех месяцев в течение года, кроме апреля в котором величина ошибки прогноза активной мощности составила - 2,05 %, а также в мае - 2,02 % (Рис. 4).

Средняя ошибка среднемесячных ошибок прогнозирования суточных графиков активной мощности за 12 месяцев составила 1,66%.

Минимальная среднемесячная ошибка прогноза в течение исследуемого года, достигала 1,28 % найденная в декабре 2015 г. Она объясняется стабильными погодными условиями в течение месяца.

Максимальная среднемесячная ошибка прогноза в течение исследуемого года, найденная в мае 2016 г, достигала 2,05 % (Рис. 2). В связи с большим количеством праздничных дней в этом месяце, которые имеют переносы календарных праздничных дней от года к году.

На рис.2 значения среднемесячных ошибок прогнозов более допустимой погрешности 2%, получились в тех месяцах, в которых ошибки прогноза естественной освещенности выше допустимого, что подчёркивает необходимость уточнения прогнозной модели для освещенности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

Предложенная гибридная модель краткосрочного прогнозирования суточных графиков активной мощности г. Москвы при тестировании в течение года с 1.09.2015 г. по 31.08.2016 г. дает результаты средней абсолютной процентной ошибки за месяц менее 2% в сутки, что соответствует требованиям методики ОАО «СО ЕЭС» [23]. В апреле и мае среднемесячная погрешность возрастает до 2,05 %.

Необходимо провести дополнительные исследования по совершенствованию структуры и подбору экспериментально настраиваемых параметров рассмотренной нейронной нечеткой сети с целью уменьшения ошибки прогноза в праздничные и послепраздничные дни в мае.

Для апреля, следует увеличить качество прогноза естественной освещенности.

Гибридная модель в целом дала более точные результаты прогнозирования в зимний период года. Исходя из полученных результатов, необходимо продолжать исследование гибридной модели в течение года с целью выявления сочетания типа дня, месяца и состояния погоды, при которых получают наилучшие результаты прогнозирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бэнн Д.В. Сравнительные модели прогнозирования электрической нагрузки / Д.В. Бэнн, Е.Д. Фармер. – Москва: Энергоатомиздат, 1987. – 200 с.
2. Седов А.В. Системы контроля, распознавания и прогнозирования электропотребления: модели, методы, алгоритмы и средства / А.В. Седов, И.И. Надтока. – Ростов н/Д.: Изд-во Рост. ун-та, 2002. – 320 с.
3. Куренный Э.Г. Прогнозирование электрических нагрузок / Э.Г. Куренный, Е.Н. Дмитриева и др. // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1988. – № 2. – С. 89-100.
4. Грицай А.С. Гибридный метод краткосрочного прогнозирования потребления электрической энергии для энергосбытового предприятия с учетом метеофакторов: дис. канд. техн. наук. – Омск, 2017. – 150 с.
5. Надтока И.И. Анализ зависимости электропотребления в энергосистеме от температуры воздуха / И.И. Надтока, О.А. Сухомлинова, А.А. Мальцева // Методы и алгоритмы прикладной математики в технике, медицине и экономике: материалы III науч.-практ. конф. (Новочеркасск, 17 января 2003 г.). – Новочеркасск: ООО НПО «Темп», 2003. – Ч.1. – С. 9-13.
6. Аль Зихери Б.М. Повышение точности краткосрочного прогнозирования электрической нагрузки потребителей региона с учетом метеофакторов на основе метода опорных векторов: дис. ... канд. техн. наук. – Новочеркасск, 2015. – 181 с.
7. Бугаец В.А. Краткосрочное прогнозирование электропотребления энергорайонов и региона с учетом метеофакторов: дис. ... канд. техн. наук. – Новочеркасск, 2015. – 241 с.
8. Анушина Е.С. Система краткосрочного прогнозирования электрической нагрузки: дис. ... канд. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2009. – 137 с.
9. Nadtoka I.I. Mathematical modelling and short-term forecasting of electricity consumption of the power system, with due account of air temperature and natural illumination, based on support vector machine and particle swarm / I.I. Nadtoka, B.M. Hussein // Procedia Engineering. – Vol. 129. – P. 657-663. doi:10.1016/j.proeng.2015.12.087.
10. Vyalkova S. Short-term forecasting using fuzzy neural network accountability air temperature and natural lighting / S. Vyalkova, I. Nadtoka // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (Chelyabinsk, 19-20 May 2016). – Chelyabinsk, 2016. doi:10.1109/ICIEAM.2016.7910991.
11. Nadtoka I. Maximal electrical load modeling and forecasting for the Tajikistan power system based on principal component analysis / I. Nadtoka, S. Vyalkova, F. Makhmadzonzonov // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (St. Pe-

tersburg, 16-19 May 2017). – St. Petersburg, 2017. doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076259.

12. Nadtoka I. Hybrid speculation model of energy consumption based on multivariate singular spectrum analysis and neural fuzzy network / I. Nadtoka, S. Vyalkova // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (Sochi, 25-29 March 2019). – Sochi, 2019. doi:10.1109/ICIEAM.2019.8742971.

13. Shepelev I.E. Comparing ambient temperature account methods in neural network based city short-term load forecasting / I.E. Shepelev, I.I. Nadtoka, S.A. Vyalkova, S.O. Gubsky // Opt. Mem. Neural Networks. – 2015. Vol. 24. – P. 220-229. doi:10.3103/S1060992X15030108.

14. Bashir Z. Short term load forecasting by using wavelet neural networks / Z. Bashir, M.E. El-Hawary // 2000 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Conference Proceedings. Navigating to a New Era (Cat. No.00TH8492). – 2000. – Vol. 1. – P. 163-166.

15. Вялкова С.А. Краткосрочное прогнозирование электропотребления г. Москвы при помощи нейронной сети / С.А. Вялкова, И.И. Надтока // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. V междунар. молодеж. науч. техн. конф. (Томск, 10-14 ноября 2014 г.). – Томск, 2014. – Т. 1. – С. 386-389.

16. Вялкова С.А. Учет свойств шумовой составляющей ряда электропотребления при краткосрочном прогнозировании / С.А. Вялкова, И.И. Надтока // Электроэнергетика глазами молодежи: тр. VI междунар. науч.-техн. конф. (Иваново, 9-13 нояб. 2015 г.). – Иваново, 2015. – Т. 1. – С. 83-86.

17. Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница» – SSA: анализ временных рядов: учеб. пособие / Н.Э. Голяндина. – СПб., 2004. – 76 с.

18. Голяндина Н.Э. Варианты метода «Гусеница» – SSA для анализа многомерных временных рядов: учеб. пособие / Н.Э. Голяндина. – СПб., 2004. – 30 с.

19. Golyandina N. Singular Spectrum Analysis for Time Series / N. Golyandina, A. Zhigljavsky – URL: <http://www.gistatgroup.com/gus/book3/index.html> (дата обращения 12.12.2020).

20. Александров Ф.И. Разработка программного комплекса автоматического выделения и прогноза аддитивных компонент временных рядов в рамках подхода «Гусе-

ница»-SSA: дис. ... канд. физ.-матем. наук. – Санкт-Петербург, 2006. – 152 с.

21. Щелкалин В.Н. Гибридные модели и методы прогнозирования временных рядов на основе методов "Гусеница"-SSA и Бокса-Дженкинса / В.Н. Щелкалин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 5(4). – С. 43-62.

22. Щелкалин В.Н., Тверяшев А.Д. Трендовый и декомпозиционный подходы прогнозирования процессов потребления электроэнергии – URL: journals.uran.ua/eejet/article/download/1207/1111 (дата обращения 12.12.2020).

23. Методика контроля точности прогноза потребления: Распоряжение руководителя оперативного штаба по совершенствованию конкурентного балансирующего рынка ОАО «Системный оператор единой энергетической системы» от 14 апреля 2011 № 132.

24. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 344 с.

25. Hayati M. Artificial neural network approach for short term load forecasting for Illam Region / M. Hayati, Y. Shirvani // International Journal of Electrical, Computer, and Systems Engineering. – 2007. – Vol. 1, № 4. – P. 659-663.

26. C. Potter, M. Negnevitsky. Short term power system forecasting using an adaptive neural-fuzzy inference system / C. Potter, M. Negnevitsky // University of Tasmania. – 2003. – P. 465-470.

27. Ying L. Using adaptive network based fuzzy inference system to forecast regional electricity loads / L. Ying, M. Pan // Energy Conversion and Management. – 2008. – Vol. 49, is. 2. – P. 205-211.

28. Ripley B.D. Pattern recognition and neural networks / B.D. Ripley // Cambridge University Press, 1996.

29. Kim K.H. Short-term load forecasting for special days in anomalous load conditions using neural networks and fuzzy inference method / K.H. Kim, H.A. Youn, Y.C. Kang // IEEE Transactions on Power Systems. – 2000. – Vol. 15. – P. 559-565.

30. Ярушкина Н.Г. Нечеткие нейронные сети с генетической настройкой / Н.Г. Ярушкина // Лекция научной школы конференции «Нейроинформатика-2004». – М.: Финансы и статистика, 2004. – 320 с.

Analysis of Hybrid Model Error of Short-Term Forecast of Energy Consumption in Moscow

Vyalkova S.A., Nadtoka I.I.

YuRGPU (NPI) named after M.I. Platov

Novocherkassk, Russia

ii_nadtoka@mail.ru, mazaeva_sveta@mail.ru

Abstract. For short-term forecast of daily active energy consumption graphs in Moscow, there is proposed a hybrid model based on the Multichannel Singular Spectrum Analysis algorithm and a Neural Fuzzy Network taking into account for factual and forecast data of air temperature and daylight illumination. In the hybrid model in the multichannel singular spectrum analysis module, the time series of energy consumption and meteorological factors are decomposed into independent components – forming its additive, trend, harmonic and random components used in the neural fuzzy network module. The source data were archives of time series of energy consumption, air temperature, cloud amount and daylight illumination for the Moscow territory from 2012 to 2016. The software implemented in the C# language was used as a modeling tool. Short-term forecasts of daily active

energy consumption graphs were carried out during the year (from September 2015 to August 2016). In most test examples, the results of the forecast for a month are obtained within the limits of permissible errors. The proposed version of short-term forecast of daily active energy consumption graphs allows obtaining an error in the range from 1 – 2.3 % during the year. In addition, the developed algorithm makes it possible to use seasonal patterns between daily active energy consumption graphs and meteorological factors for several years.

Keywords: short-term forecast of active energy consumption, air temperature, daylight illumination, multichannel singular spectrum analysis, neural fuzzy network, mean relative forecast error.

Пром-Инжиниринг
труды VII Всероссийской научно-технической конференции

17-21 мая 2021 года

Москва-Челябинск-Новочеркасск-Волгоград-Сочи

Текстовое электронное издание

17 Мб

Ответственный редактор: профессор, доктор техн. наук А.А. Радионов