

Министерство промышленности Республики Беларусь  
Министерство образования Республики Беларусь  
Национальная академия наук Беларуси  
Государственный комитет по науке и технологиям Республики Беларусь  
Открытое акционерное общество «СтанкоГомель»  
Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»

# **ИННОВАЦИОННОЕ СТАНКОСТРОЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИИ И ИНСТРУМЕНТ**

**МАТЕРИАЛЫ**  
**I Международной научно-практической**  
**конференции**

**Гомель, 30 ноября 2023 года**

**Гомель 2024**

УДК 621.9.06+621.7/9-52(042.3)

ББК 34.63.52+34.500.9

И66

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, проф. *А. В. Пуцято*

*А. Н. Савенок*

д-р техн. наук, проф. *А. А. Бойко*

канд. техн. наук, доц. *Г. В. Петришин*

канд. техн. наук, доц. *Ю. В. Крышнев*

*И. Ф. Черненко*

Под общей редакцией д-ра техн. наук, проф. *М. И. Михайлова*

Подготовка и проведение конференции осуществлены на базе  
Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого

**И66** **Иновационное** станкостроение, технологии и инструмент : материалы  
I Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 30 нояб. 2023 г. / М-во пром-сти  
Респ. Беларусь [и др.] ; под общ. ред. М. И. Михайлова. – Гомель : ГГТУ  
им. П. О. Сухого, 2024. – 106 с.

ISBN 978-985-535-551-0.

Содержатся материалы I Международной научно-практической конференции по следующим направлениям: автоматизация технологических процессов обработки материалов; мехатроника; технические и программные средства автоматизации; материаловедение; CAD-, CAM-технологии; энергоэффективные и аддитивные технологии.

Для специалистов в области машиностроения.

УДК 621.9.06+621.7/9-52(042.3)

ББК 34.63.52+34.500.9

ISBN 978-985-535-551-0

© Оформление. Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого», 2024

# СОДЕРЖАНИЕ

---

## ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

---

<i>Савенок А. Н.</i> Перспективы развития ОАО «СтанкоГомель» .....	6
<i>Путято А. В., Михайлов М. И.</i> Модульный принцип проектирования станков и инструментов .....	8
<i>Карчевская Е. Н., Соловьева Л. Л.</i> Управление диджитал-маркетингом на промышленных предприятиях .....	13
<i>Урбанович В. С., Леончик С. В., Нисс В. С., Григорьев С. В., Лавыш Е. О., Шлома Е. Н.</i> Новый сверхтвердый материал «Беланит» на основе кубического нитрида бора для металлообработки .....	19

---

### Секция 1

#### АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ. МЕХАТРОНИКА, ТЕХНИЧЕСКИЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ

---

<i>Чижи́к С. А., Хейфец М. Л., Грецкий Н. Л., Базров Б. М.</i> Перспективы создания мехатронных станочных комплексов гибридного производства .....	22
<i>Витязь П. А., Хейфец М. Л., Грецкий Н. Л., Хилько Д. Н.</i> Реверс-инжиниринг в производстве крупногабаритных изделий .....	24
<i>Пантелеев С. В., Менжинский А. Б., Малашин А. Н.</i> Обоснование применения многофазных синхронных электрических машин с дробными зубцовыми обмотками .....	27
<i>Первененок Р. Е., Сицко А. Л.</i> Адаптивная фильтрация в системе управления активного силового фильтра .....	29
<i>Довнар С. С., Лапука А. Д., Резник С. В., Федорец А. В.</i> Квадрупольная компоновка для крупного многоцелевого гибридного станка.....	31
<i>Данилов В. А.</i> Повышение универсальности металлорежущих станков на основе рациональных методов формообразования.....	33
<i>Данилов А. А.</i> Методы формообразования поверхностей с профилем в виде треугольника Рело на зубодолбежных станках .....	36
<i>Роговенко Д. А., Михайлов М. И., Теплова К. С.</i> Исследование влияния формы сечения направляющих на их напряженное состояние .....	38
<i>Кульбаков Ю. Н.</i> Опыт реализации импортозамещающего проекта «Создание многофункционального обрабатывающего оборудования» .....	40
<i>Сотский А. А.</i> Опыт использования современных инновационных технологий в рамках проводимого перевооружения.....	43
<i>Сулавко С. В.</i> Опыт организации инструментального обеспечения в условиях адаптации новых производителей инструмента на рынке Республики Беларусь.....	45
<i>Хазеев Е. В., Стасенко Д. Л.</i> Повышение энергоэффективности гидросистемы технологического оборудования.....	47
<i>Никитенко Д. В., Михайлов М. И.</i> Экспериментальное исследование динамики процесса при внутреннем фрезеровании резьб .....	50
<i>Михайлов М. И., Карпов А. А., Шабакеева З. Я.</i> Опыт конструирования универсально-сборных металлорежущих инструментов .....	52

<i>Лепший А. П.</i> Влияние конструктивных параметров магнитного индуктора на распределение магнитного поля в рабочем пространстве инструмента при магнитно-абразивной обработке плоских поверхностей .....	54
<i>Джемилов Э. Ш., Бекиров Э. Л., Джемалядинов Р. М.</i> Влияние метода подачи смазочно-охлаждающей жидкости на контактные процессы в давления сверления.....	56
<i>Сейдалиев Р. С., Курманов Р. Д., Фукала А. А., Джемилов Э. Ш.</i> Опыт формирования обработанной поверхности при торцевом фрезеровании .....	58

## Секция 2

## СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

<i>Подденежный Е. Н., Дробышевская Н. Е., Бойко А. А., Давыдова О. В., Лёвкина А. Д.</i> Влияние солегирующих ионов церия, лантана и гадолиния на спектрально-люминесцентные характеристики иттрий-алюминиевого граната....	61
<i>Подденежный Е. Н., Дробышевская Н. Е., Бойко А. А., Давыдова О. В.</i> Формирование биоразлагаемых композитов с использованием льнокостры .....	63
<i>Прусенко И. Н.</i> Реверсивное проектирование и 3D-печать как инструменты производства высокотехнологичных огнеупорных изделий .....	65
<i>Михайлов М. И., Лапко О. А.</i> Исследование свойств материалов на основе полимеров.....	67
<i>Бобрышева С. Н., Ухарцева И. Ю.</i> Современные полимерные композиционные материалы в машиностроении .....	69
<i>Степанкин И. Н., Поздняков Е. П., Рабков А. В., Куис Д. В., Найзабеков А. Б., Лежнев С. Н.</i> Структура, микротвердость и износостойкость диффузионно-упрочненных слоев коррозионностойких сталей 40X13 и BOHLER M303 Extra .....	71
<i>Поздняков Е. П., Степанкин И. Н.</i> Износостойкость цементованных слоев конструкционных сталей 35ХГСА, 40Х и 42СRMOS4 .....	73
<i>Шапалов В. М., Овчинников К. В., Мельников С. Ф., Напеев Р. С.</i> Древесно-полимерные композиты для изделий машиностроительного назначения .....	76
<i>М. Ф. С. Х. Аль-Камали, Будник В. С., Лушпа Н. В., Врублеский И. А., Тучковский А. К.</i> Повышение пористости капиллярно-пористых материалов на основе меди для фасонных электрод-инструментов .....	77
<i>Короткин Г. П., Дементьев В. А., Калентионюк А. И., Рубанова Т. М.</i> Специфика контроля послойной заливки износостойкого чугуна с помощью термопар при литье вкладыша отбойного .....	79
<i>Эльшербини С. М. Э., Аль-Камали М. Ф. С. Х., Бойко А. А.</i> Сбор отработанной смазочно-охлаждающей жидкости с использованием высокопористых керамических материалов .....	81
<i>Пищиков В. Е., Лежнев С. Н., Степанкин И. Н., Поздняков Е. П., Куис Д. В.</i> К вопросу динамического старения стали 5ХВ2С в результате термомеханической обработки .....	85

## Секция 3

## САД-, САМ-ТЕХНОЛОГИИ. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ И АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

<i>Калачев О. Н., Малашин К. Д., Поздняков И. В., Никитин П. В.</i> Опыт применения аддитивных технологий при реверс-инжиниринге деталей насоса низкого давления.....	88
---	----

---

<i>Леон К. С., Калачев О. Н.</i> Решение задач MRP на малых предприятиях с использованием MS SQL Server и Report Builder .....	90
<i>Латышев О. Ю., Латышева П. А., Луизетто М.</i> Энергоэффективные технологии в работе машиностроительного предприятия .....	93
<i>Бобарикин Ю. Л., Мартьянов Ю. В.</i> Влияние деформации проволоки в рихтовке на снижение остаточных напряжений .....	95
<i>Стасенко Т. Д., Стасенко Д. Л.</i> Модернизация средствами T-FLEX Технологии производства зубчатых колес НА ОАО «Гомсельмаш» .....	97
<i>Бердин А. Ю.</i> Анализ показателей удовлетворенности потребностей .....	99
<i>М. А. М. К. AL-Aimiri, М. F. S. H. AL-Kamali.</i> ERPNEXT: revolutionizing manufacturing management in factories .....	102
<i>М. А. М. К. AL-Aimiri, М. F. S. H. AL-Kamali.</i> Streamlining factory operations: designing an effective manufacturing management program .....	105

## ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 621.923

### ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОАО «СТАНКОГОМЕЛЬ»

А. Н. Савенок

*ОАО «СтанкоГомель», Республика Беларусь*

ОАО «СтанкоГомель» – предприятие с 138-летней историей – всегда было и остается одним из лидеров белорусского станкостроения. Пережив тяжелые ковидные времена, сложный период конца десятых годов завод восстанавливает свои позиции.

Высокий потенциал коллектива СКБ и сохранившиеся в нем инженерные компетенции позволяют нашему предприятию разрабатывать, проектировать и выпускать оборудование, не уступающее мировым аналогам.

Тяжелые постсоветские годы завод пережил благодаря проектированию и разработке специального, зачастую не свойственного нам оборудования.

С 2000-х гг., когда наше предприятие доказало свою жизнеспособность, завод вернулся к своей основной продукции – выпуску обрабатывающих центров.

В этот период разработаны и освоены основоположники сегодняшнего модельного ряда предприятия – горизонтальный обрабатывающий центр BYHOR630 и вертикальный обрабатывающий центр BYVER600.

Первые выпущенные станки данных моделей были доставлены нашему заказчику и доброму соседу – заводу ОАО «Гомсельмаш», на площадях которого обрабатывающие центры прошли испытания в полевых условиях, что позволило выявить и устранить основные слабые места оборудования.

Модели были доработаны и запущены в серийное производство. Это горизонтальные и вертикальные обрабатывающие центры SGH500 и SGV720-5x. Сегодня – это базовые модели нашего предприятия.

Благодаря реализации ГНТП «Инновационное машиностроение и машиностроительные технологии» подпрограмма «Машиностроительное оборудование» ОАО «СтанкоГомель» также был спроектирован и изготовлен 5-осевой обрабатывающий центр с ЧПУ с возможностью 5-осевой обработки. На сегодняшний день на стапелях предприятия находится следующее поколение данного станка, а именно 5-осевой обрабатывающий центр с функцией токарной обработки.

События февраля 2022 г. и введение санкций стали отправной точкой для отечественного станкостроения.

Введенные санкции и уход с рынка ряда поставщиков импортных комплектующих стал серьезным вызовом для ОАО «СтанкоГомель». За апрель–июль 2022 г. СКБ полностью перепроектировало имеющийся на предприятии модельный ряд под применение комплектующих из стран, не поддержавших несправедливо введенные санкции.

Сегодня все потенциальные поставщики комплектующих определены и с ними поддерживаются стабильные и долговременные отношения. В ЕАЭС началась работа по освоению вошедших в санкционный перечень комплектующих. Для недопущения повторения ситуации с эмбарго ОАО «СтанкоГомель» при проектировании станков максимально использует в конструкции отечественные комплектующие или комплектующие из Российской Федерации. Так, в наших станках уже применяются успешно освоенные в России ШВП, также ждем освоения Росатомом нашего типораз-

мера рельсовых направляющих. Слабым местом отечественного станкостроения остаются системы управления ЧПУ, но мы верим, что в ближайшее время и этот вопрос будет решен.

ОАО «СтанкоГомель» внесет посильную лепту в этот процесс. В утвержденной НИОКР разработки обрабатывающих центров с улучшенными характеристиками отдельным пунктом отмечается разработка независимого белорусского ЧПУ и обеспечение технологической безопасности. Этот проект внедряет компания «Техникон» (г. Минск).

Наглядным примером данного подхода в конструировании станков служит разрабатываемый в рамках программы «Союзный станок» вертикальный фрезерный станок с ЧПУ. Наш станок будет состоять из комплектующих, производимых в Республике Беларусь и Российской Федерации. Данный станок будет демонстрироваться на Московской выставке «Металлообработка», которая пройдет в мае 2024 г.

Наличие собственного СКБ позволяет ОАО «СтанкоГомель» модернизировать и адаптировать имеющуюся линейку выпускаемого оборудования под конкретные нужды заказчика. Это может касаться оборотов шпинделя, количества инструмента в магазине, инструментального конуса и многого другого.

Кроме этого в рамках ГНТП «Инновационное машиностроение и машиностроительные технологии» уже разработан и изготавливается нашим предприятием горизонтальный обрабатывающий центр SGH630-HP. Данная модель будет иметь не только увеличенный размер паллеты, но и значительно увеличенную зону обработки и разворота заготовки. В станке применена концепция движения стойкой по оси X, что значительно увеличивает его жесткость, позволяя производить более силовую обработку. Не отставая от мировых тенденций, в данном станке, впервые для нашего предприятия, будет использовано основание станка из полимербетонных композитных материалов. Эта не самая новая в станкостроении концепция получила вторую жизнь после улучшения технологий изготовления данного материала и его удешевления. Проведенные для нас исследования показывают, что данные станины будут значительно более виброустойчивыми по сравнению с применяемыми чугунными основаниями.

В дальнейшем, расширяя модельный ряд выпускаемого оборудования, в программу разработок нашего предприятия войдут: вертикальный обрабатывающий центр с паллетой 1800 мм, разрабатываемый по заказу Минпромторга Российской Федерации уникальный для ЕАЭС горизонтальный 5-осевой обрабатывающий центр. В планах разработка 5-осевых и горизонтальных обрабатывающих центров с большим типоразмером паллет. ОАО «МТЗ» планирует выступать главным заказчиком. В состав холдинга «МТЗ-Холдинг» наше предприятие вошло в 2023 г.

Из-за проблем, вызванных пандемией, когда количество заказов на новые станки существенно уменьшалось, ОАО «МТЗ» обеспечило заказами наше предприятие.

С 2021 по 2023 г. ОАО «МТЗ» закупило 30 единиц обрабатывающего оборудования, в том числе 7 единиц горизонтальных обрабатывающих центров и 23 единицы вертикальных обрабатывающих центров. На ОАО «Оршанский инструментальный завод» было поставлено 10 единиц, в том числе 4 единицы горизонтальных обрабатывающих центров.

Включение ОАО «СтанкоГомель» в состав участников холдинга «МТЗ-Холдинг» несет уверенность в завтрашнем дне. Вхождение в холдинг позволит с течением времени расширить внутрихолдинговую кооперацию, в том числе получить необходимый высокопроизводительный инструмент от ОАО «Оршанский инструментальный завод» и предлагать специальные решения покупателям с полным комплексом услуг – центр, технология, инструмент, приспособления и обработка детали. Первых три проекта под ключ уже реализованы в 2023 г.

Для решения задач развития ОАО «СтанкоГомель» завод вошел в импортозамещающий проект для Российской Федерации «Создание производства многофункционального обрабатывающего оборудования». Общие инвестиции – 2,372 млн руб. Российской Федерации. Предполагается срок реализации в I квартале 2025 г. Выход на проектную мощность планируется в 2027 г.

В результате реализации инвестиционного проекта предстоит закупить, доставить и запустить 61 единицу оборудования, объединить в единую производственно-технологическую цепочку, а также обеспечить выпуск 144 обрабатывающих центров и создать 47 высокопроизводительных рабочих мест. Следует обратить особое внимание, что в процессе модернизации будут применены 11 обрабатывающих центров собственного производства ОАО «СтанкоГомель».

У ОАО «СтанкоГомель» для развития есть все: продуктовая линейка, инновационная продукция, программа наращивания мощностей. Вместе с тем закупается самое современное станочное оборудование, есть собственные сильные инженерные службы СКБ и ОГТ, ОГМет. Для получения максимального эффекта необходимо обеспечение трудовыми ресурсами.

Общество проводит целенаправленную работу с вузами, сузами по обеспечению молодыми специалистами. С 2021 по 2023 г. значительно выросла численность молодых специалистов, принятых на завод с 12 до 61 человека. Одновременно с приемом молодых специалистов важным показателем является возвращение молодежи, проходящей военную службу в Вооруженных силах, на завод. Численность вернувшихся со службы растет из года в год. Только за ноябрь 2023 г. вернулись три инженера-технолога (выпускники 2022 г.). Это свидетельствует о том, что молодежь поверила в будущее завода. На заводе благодаря тесному сотрудничеству с ГГТУ им П. О. Сухого открыты филиалы трех кафедр: 1) «Автоматизированный электропривод»; 2) «Технология машиностроения»; 3) «Роботизированные системы».

ОАО «СтанкоГомель» – стабильное современное предприятие и надежный партнер, обладающий всеми необходимыми компетенциями и возможностями для удовлетворения всех возникающих потребностей своих партнеров.

УДК 621.9.02-192

## **МОДУЛЬНЫЙ ПРИНЦИП ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТАНКОВ И ИНСТРУМЕНТОВ**

**А. В. Путято, М. И. Михайлов**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

Переориентация промышленности на выпуск широкого ассортимента продукции малыми сериями (партиями), в совокупности с постоянным снижением трудовых ресурсов европейских государств, привела к изменению использованных ранее форм организации производства и применяемому оборудованию, т. е. к переходу от автоматизированных систем на основе аналогового управления к системам с числовым программным управлением (ЧПУ) [1–11]. Достижения в области микроэлектроники способствовали быстрому развитию этого направления в станкостроении и расширении номенклатуры станков с ЧПУ. Из исследований, выполненных в ФРГ, США, Швейцарии и других странах, известно, что эффективное время обработки на традиционных металлорежущих станках и станках с ЧПУ в случае участия человека (оператора) составляет только 6–10 % годового фонда рабочего времени. Известно также, что

в структуре времени обработки деталей на основе традиционных технологий доля основного времени составляет только около 30 %, а оставшаяся часть приходится на вспомогательное и подготовительно-заключительное время [1, 4] и др.

Как известно, эффективность работы автоматизированного производства зависит от организации технологического процесса, т. е. от формирования и реализации потоков деталей и инструментов, а также от степени согласованности их взаимодействия. В свою очередь, потоки инструментов формируются в зависимости от степени интеграции оборудования и их можно разделить на инструментообеспечение (СИО) станков с ЧПУ, гибких производственных модулей (ГПМ) и гибких производственных систем (ГПС) [12–15].

Реализация таких структур требует применения модульного подхода при проектировании станков и инструментов. Для практического использования такого подхода необходимо выделение отдельных блоков оборудования (рис. 1).

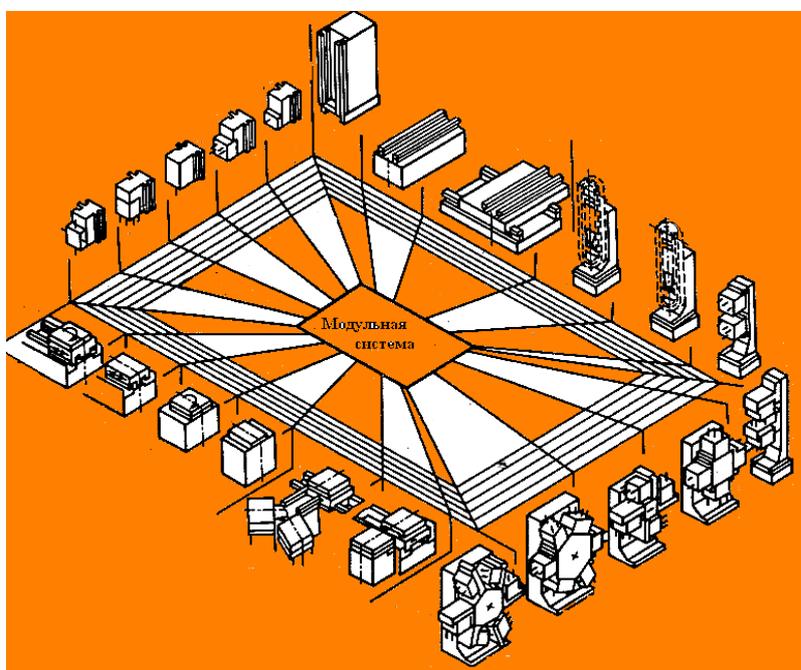


Рис. 1. Модульная система

Как видно на рис. 1, одним из наиболее сложных блоков являются системы инструментообеспечения (СИО). Анализ применяемых СИО станков с ЧПУ позволяет выделить их составляющие, которые включают в себя: накопители инструментов, устройства транспортировки его из накопителя в рабочую зону и обратно, устройства ориентации, закрепления и контроля инструмента. Обобщив накопленный опыт по разработке и эксплуатации СИО станков с ЧПУ [2, 9] и др., их можно представить в системном виде.

Для обеспечения эффективности работы таких систем используются различные виды структур СИО:

а) на основе накопителей инструментов на каждом многоцелевом станке, обеспечивая при этом автономность их работы и повышая надежность ГПС, однако растет емкость каждого накопителя и снижается эффективность использования режущего инструмента;

б) на основе накопителей средней емкости (30–60 инструментов) на каждом станке и общего инструментального склада небольшой емкости, обеспечивая повышение эффективности использования режущего инструмента, но снижая надежность работы ГПС;

в) на основе накопителей малой емкости (12–30 инструментов) на каждом станке и общего инструментального склада большой емкости, обеспечивая максимальную эффективность использования режущего инструмента и мобильность ГПС, позволяя использовать ее при производстве большой номенклатуры изделий.

Анализ надежности работы таких систем производился поэтапно [16–18].

На первом этапе составлялась структурная схема, при этом допускалось, что система не ремонтируема и не резервируема. Затем рассчитывался риск отказа системы и сравнивался с допускаемым значением. Анализ производился для наиболее часто встречающихся случаев отказа: в виде микроразрушений и износа режущей кромки. При этом было принято, что наработка на отказ в результате износа согласуется с усеченным нормальным законом распределения, а микроразрушение – с экспоненциальным [16]. По предварительным экспериментам определялась наработка на отказ каждого элемента  $T_i$  и интенсивность отказов  $\lambda_i$ , а также риск при отказе каждого элемента  $r_i$ .

Затем рассчитывались наработка на отказ  $T_c$  и риск всей системы  $R(t)$ .

Если расчетное значение наработки на отказ и риска меньше допускаемого, то производилось резервирование. При этом рассматривалось общее резервирование элементов системы инструментообеспечения, которое может быть реализовано только замещением, либо поэлементное, которое для накопителя и режущего инструмента так же реализовывалось замещением, а для режущей части и режущих кромок можно реализовать как с постоянным, так и с резервированием замещением. Тогда вероятность безотказной работы, плотность распределения времени безотказной работы и интенсивность отказов элементов системы с кратностью резервирования  $m$  при постоянном резервировании определялось по соотношениям:

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=0}^m (1 - P_i(t)), \quad f_c(t) = \sum_{i=0}^m (1 - P_0(t)) \dots f_i(t) \dots (1 - P_m(t)), \quad \lambda_c(t) = \frac{\sum_{j=0}^m f_j(t) \prod_{i=j}^m Q_i(t)}{1 - \prod_{i=0}^m Q_i(t)},$$

где  $P_c(t)$ ,  $P_i(t)$ ,  $P_0(t)$  – соответственно вероятность безотказности системы  $i$ -го и основного элементов;  $f_c$  и  $f_i$  – функции распределения системы и элемента;  $Q_i$  – функция вероятности отказа.

Для принятых законов распределения были рассчитаны численные значения показателей, которые представлены на рис. 2 при:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi \left( 0,5 + \Phi_0 \left( \frac{m_0}{\sigma_0} \right) \right)}} e^{-\frac{t-m_0}{2\sigma_0^2}}, \quad P(t) = \frac{0,5 - \Phi_0 \left( \frac{t-m_0}{\sigma_0} \right)}{0,5 + \Phi_0 \left( \frac{m_0}{\sigma_0} \right)},$$

где  $\Phi_0(t)$  – функция Лапласа.

Как видно на рис. 2, *a*, с увеличением кратности резервирования увеличивается среднее время безотказной работы и уменьшается дисперсия.

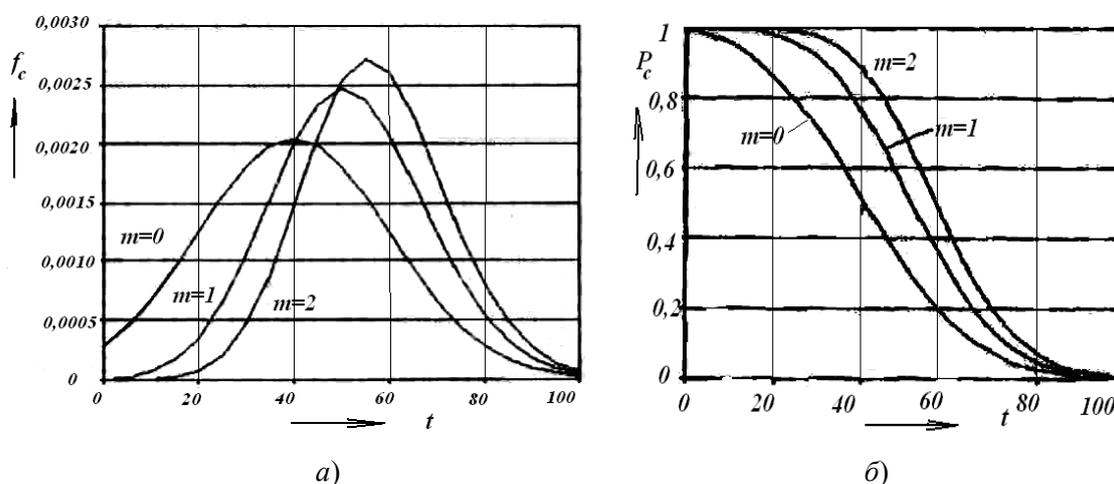


Рис. 2. Графики плотности распределения времени до отказа (*a*) и вероятности безотказности работы системы (*б*) при различной кратности резервирования с усеченным нормальным законом распределения

Анализ рис. 2, *б* позволяет заключить, что на вероятность безотказности значительное влияние оказывает кратность резервирования, причем этот эффект тем существеннее, чем меньше  $m$ . Анализ рис. 3, *a* позволяет заключить, что большей кратности резервирования соответствует меньшая интенсивность отказов.

Как видно на рис. 3, *б*, при постоянной интенсивности отказов основной системы, интенсивность отказа резервированной системы увеличивается с течением времени, стремясь к постоянной величине, равной интенсивности отказов нерезервированной системы.

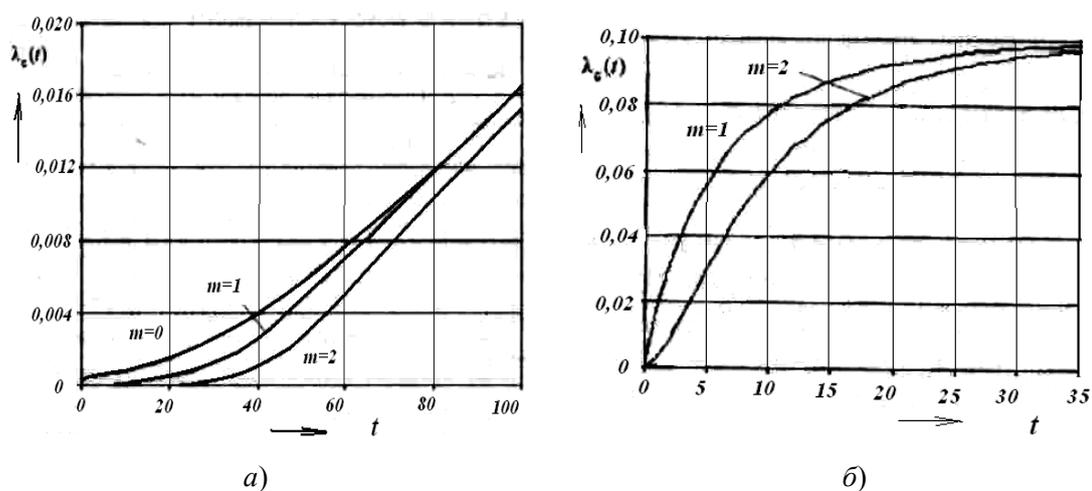


Рис. 3. Графики интенсивности отказа системы при различной кратности резервирования: *a* – с усеченным нормальным законом распределения; *б* – с экспоненциальным нормальным законом распределения

Постоянный резерв сложно технически реализовать в системах инструментального обеспечения, поэтому часто используются конструкции с резервированием замещения. В этом случае вероятность безотказной работы, плотность распределения времени до отказа и среднее время безотказной работы системы определяются выражениями:

$$P_c(t) = P_0(t) + \sum_{i=1}^m f_0 \cdot f_i \cdot \dots \cdot f_{i-1} \cdot P_i(t); \quad f_c(t) = f_0 \cdot f_i \cdot \dots \cdot f_m(t); \quad T_1 = \int_0^{\infty} P_c(t) dt = \sum_{i=0}^m T_{1i},$$

где  $f_0 \cdot f_i \cdot \dots \cdot f_m(t)$  – свертки функций.

#### Литература

1. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / А. М. Русецкий [и др.] ; под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск : Беларус. навука, 2012. – 239 с.
2. Лищинский, Л. Ю. Структурный и параметрический синтез гибких производственных систем / Л. Ю. Лищинский. – М. : Машиностроение, 1990. – 312 с.
3. Ящерицын, П. И. Основы проектирования технологических комплексов в машиностроении: монография / П. И. Ящерицын, Л. М. Акулович, М. Л. Хейфиц. – Минск : Технопринт, 2006. – 248 с.
4. Технологические аспекты конверсии машиностроительного производства / А. С. Васильев [и др.]. – Тула : ТулГУ, 2003. – 271 с.
5. Инструмент для станков с ЧПУ, многоцелевых станков и ГПС / И. Л. Фадюшин [и др.]. – М. : Машиностроение, 1990. – 272 с.
6. Каштальян, И. А. Повышение эффективности использования станков с ЧПУ в условиях нестационарного резания / И. А. Каштальян. – Минск : БНТУ, 2008. – 311 с.
7. Monitorowanie ostrza skrawajacego. Metody konwencjonalne i sieci neuronowe / Z. Adamczyk [and other] ; unter a rel. J. Kosmola. – Warszawa : WNT, 1996. – 244 s.
8. Byrne, G. Tool Condition Monitoring (NCM) – The status of research and Industrial Application // CIRP Annals. – 1995. – Vol. 44, № 2. – P. 541–568.
9. Хартли, Дж. ГПС в действии : пер. с англ. / Дж. Хартли. – М. : Машиностроение, 1987. – 328 с.
10. Kosmol, J. Automatyizacja obrabiarek i obrobki skrawaniem. Wyd. 2. – Warszawa : WNT, 2000. – 444 s.
11. Козловский, В. А. Эффективность переналаживаемых роботизированных производств / В. А. Козловский. – Л. : Машиностроение, 1985. – 224 с.
12. Митрофанов, В. Г. Живучесть гибких производственных систем / В. Г. Митрофанов, А. С. Старостин // Станки и инструмент. – 1990. – № 12. – С. 9–11.
13. Шведенко, В. Н. Теоретический расчет закона распределения стойкости резцов при точении / В. Н. Шведенко // Вестн. машиностроения. – 1989. – № 10. – С. 49–51.
14. Нодельман, М. О. Идентификация периодичности смены режущего инструмента / М. О. Нодельман // Вестн. машиностроения. – 1989. – № 7. – С. 46–48.
15. Михайлов, М. И. Сборный металлорежущий механизированный инструмент: Ресурсосберегающие модели и конструкции / М. И. Михайлов ; под ред. Ю. М. Плескачевского. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 339 с.
16. Схиртладзе, А. Г. Надежность и диагностика технологических систем/ А. Г. Схиртладзе, М. С. Уколов, А. В. Скворцов. – М. : Новое знание, 2008. – 518 с.
17. Шимарев, В. Ю. Надежность технических систем/ В. Ю. Шимарев. – М. : Академия, 2010. – 304 с.
18. Дианов, В. Н. Диагностика и надежность автоматических систем/ В. Н. Дианов. – М. : Изд-во МГИУ, 2005. – 378 с.

УДК 621.923

## УПРАВЛЕНИЕ ДИДЖИТАЛ-МАРКЕТИНГОМ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Е. Н. Карчевская, Л. Л. Соловьева

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

Современное состояние рынка требует внедрение инноваций в деятельность любого предприятия. Однако эти инновации должны касаться не только товаров и технологий, но и управления, в том числе маркетингом. Современный товар, произведенный по современной технологии, требует современной подачи его потребителю. Поскольку интернет-технологии постепенно приходят на смену традиционным формам отношений с потребителями, особо значимым становится поиск инновационных решений в области маркетинговой деятельности. И сегодня использование новаций в маркетинге способствует повышению известности бренда предприятия, установлению контактов с потребителями и поставщиками и, соответственно, увеличению объема продаж и прибыли.

Научные исследования в области новаций в маркетинге еще только начинают развиваться. Как правило, в них представлены авторские определения и авторские подходы к классификации новаций. К основным авторам, изучавшим данное направление, можно отнести Ж.-Ж. Ламбена, Д. Дэй, Б. Кисилева, И. В. Дегтярева и др.

Под маркетинговыми инновациями в «Руководстве Осло» понимается «реализация новых или значительно улучшенных изменений в дизайне или упаковке товаров, работ, услуг; использование новых методов продаж и презентации товаров, работ, услуг, их представления и продвижения на рынки сбыта...» [1].

Актуальность данного исследования обусловлена требованиями рынка соответствовать динамичной маркетинговой среде. Цель исследования состоит в выявлении, анализе современных диджитал-инструментов, используемых белорусскими предприятиями и предложении направлений их совершенствования.

На сегодняшний день digital-маркетинг стал одним из самых приоритетных и эффективных направлений маркетинга, используемый практически во всех сферах бизнеса большинства развитых и развивающихся стран мира. К инструментам данной сферы, способствующим продвижению бренда и привлечению клиентов, относятся email-маркетинг, СМС, таргетированная реклама в различных социальных сетях, контент-маркетинг, SEO-продвижение, контекстная реклама, сайт компании, мобильные приложения, медийная, аудио- и видео-реклама и др.

Ведущими каналами digital-маркетинга в 2022 г. выделены: поисковая оптимизация; контент-маркетинг; контекстная реклама; маркетинг в социальных сетях; таргетированная реклама; ведение канала YouTube; баннерная реклама; инфлюенс-маркетинг; Email-рассылка; партнерские программы; QR-код; вирусная реклама.

Проведенные исследования использования инструментов digital-маркетинга белорусскими предприятиями были направлены: 1) на изучение контактов потребителей с инструментами digital-маркетинга; 2) изучение самих инструментов, используемых белорусскими предприятиями.

Основные инструменты маркетинга, с которыми сталкиваются потребители в интернете, приведены на рис. 1.

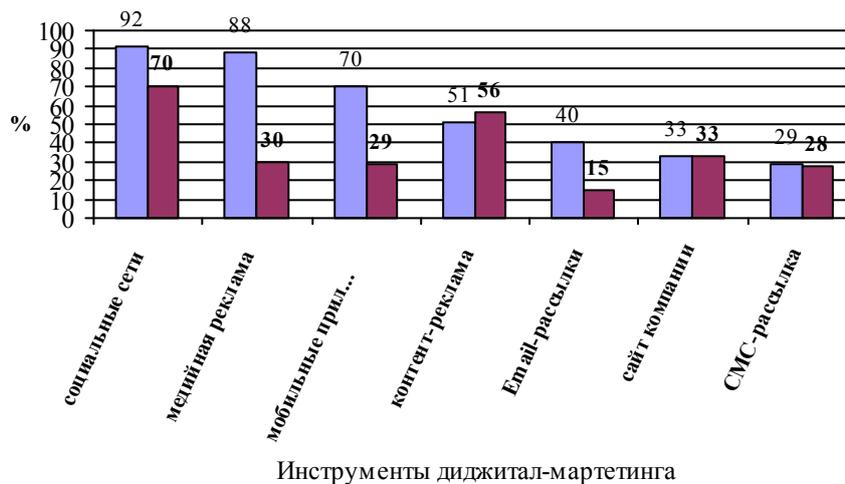


Рис. 1. Контакты с инструментами digital-маркетинга:  
 ■ – частота встреч; ■ – эффективность

Наиболее часто встречаемыми инструментами опрошенные считают: социальные сети, медийную рекламу и мобильные приложения, а наиболее используемыми инструментами при покупке товара или поиска информации – социальные сети, контент-маркетинг и сайт компании.

Потребители имеют опыт контакта не только с зарубежными предприятиями, но и с отечественными. Анализируя информацию относительно предполагаемых лидеров в использовании интернет-инструментов маркетинга среди белорусских компаний, можно заметить, что лидером, по мнению респондентов, является 21vek.by.

Все вышеуказанные исследования относятся к рынку B2C, в исследовании предприятия сферы B2B потребителями не были названы.

Рынок B2B имеет свои отличительные свойства, поэтому есть особенности в использовании инструментов диджитал-маркетинга. Потребитель на рынке B2B – предприятие, покупающее товары и услуги для организации производства своих собственных товаров и услуг с целью получения прибыли. И этот потребитель меньше времени уделяет социальным сетям и мобильным приложениям при поиске информации о товаре. На первое место по значимости для потребителя поднимается сайт и реклама в среде интернет.

В настоящий момент сайт предприятия – это своеобразная визитка, которая при первом визуальном контакте с потенциальным потребителем не должна его оттолкнуть и запутать.

Основными требованиями к визуальному представлению сайта можно отнести:

- соответствие художественного оформления сфере деятельности предприятия;
- привлекательный контент сайта;
- простая и интуитивно понятная навигация сайта;
- удобная структура сайта и понятная визуальная иерархия элементов сайта по степени их важности;
- своевременная обновляемость и актуальность подаваемой информации;
- адаптация сайта под мобильные устройства;
- адаптация сайта под требования отдельных категорий пользователей (версия для слабовидящих);
- и, наконец, не менее важное, степень продвижения сайта в среде интернет.

Существует много методик анализа сайта для поиска направлений его совершенствования. Рассмотрим некоторые из них.

Используем для оценки сайтов белорусских предприятий строительной отрасли (ОАО «Керамин», РУПП «Гранит», ОАО «Доломит», ОАО «Гомельский комбинат строительных конструкций») следующие критерии:

- качество информации о компании (полнота, достоверность);
- частота обновления информации;
- качество текстовой информации;
- качество визуализации;
- наличие активного веб-поиска и удобство его использования (строка поиска, навигация);
- наличие обратной связи (количество контактов);
- наличие и качество каталога товаров;
- наличие и качество прайс-листов;
- дизайн сайта.

Оценка произведена по 10-балльной шкале и результаты представлены на рис. 2.



Рис. 2. Анализ сайтов строительных организаций:

- — — — — ОАО «Керамин»; - - - - - РУПП «Гранит»;
- — — — — ОАО «Доломит»; — — — — — ОАО «Гомельский комбинат строительных конструкций»

Таким образом, после оценки всех критериев для анализа web-сайтов белорусских предприятий отрасли «Строительство» определим лидеров в использовании данного инструмента digital-маркетинга, обозначим сильные и слабые стороны рассматриваемых сайтов в целом и дадим некоторые рекомендации по их улучшению.

По итогам анализа высший показатель в 9 баллов получил сайт предприятия РУПП «Гранит». Также хорошие показатели у сайта предприятий «Керамин», который получил средний балл 8,67. Средний балл 6,33 получил сайт ОАО «Доломит». И самый низкий показатель в 3,22 балла у сайта предприятия ОАО «Гомельский комбинат строительных конструкций».

Если рассматривать средние оценки по каждому критерию, то можно увидеть, что все они на достаточно высоком уровне, хоть и не идеальны. Так, лучший показатель в 7,9 балла принадлежит критерию наличия обратной связи. Это значит, что среди сайтов белорусских предприятий отрасли «Строительство» сильной стороной является именно наличие обратной связи. По этому же принципу отметим критерий наличия активного веб-поиска как слабую сторону рассматриваемых сайтов, имеющую средний балл 5,3.

В целом все сайты по всем критериям можно оценить на 7 баллов из 10. Это является хорошим показателем и свидетельствует о развитости данного инструмента digital-маркетинга среди белорусских предприятий. Однако, учитывая слабые стороны рассмотренных web-сайтов, можно предложить внедрять и развивать активный веб-поиск по сайту и преобразовать имеющиеся прайс-листы в более удобную для использования форму.

Для анализа эффективности использования инструментов Интернет-маркетинга предприятиями легкой промышленности использовалась авторская методика – матрица «Привлекательность – полезность» (ПП). Привлекательность – маркетинговый показатель, обозначает любые аспекты или раздражители, привлекающие внимание [2]. Это – хорошая визуализация сайта или страницы, броское название, удобный интерфейс, качественная аудио-, видеоинформация, эргономичный текст, удобная система просмотра. Полезность – технический показатель, обозначает актуальность данного ресурса, важность, необходимость его наличия на данном сайте или странице.

Выбор именно этих направлений продиктован тем, что внешне красивый сайт не всегда пользуется спросом, а его посещаемость бывает очень низкой. При этом интересующую их информацию посетители сайта зачастую находят в других источниках.

Матрица строится с использованием двух шкал – шкалы абсцисс и шкалы ординат. По шкале абсцисс в баллах откладываются значения привлекательности аспекта. По шкале ординат в баллах откладываются значения полезности ресурса. Оценка в баллах производится экспертным методом. Медиана, прямая линия, условно делящая угол между двух осей – линия, показывающая направление развития идеального маркетинга.

Всего в матрице выделяются четыре квадранта: идеальный маркетинг, провальный маркетинг, необоснованный маркетинг, недостаточный маркетинг.

Анализ ведется по отдельным структурным элементам сайта: главная страница, «о предприятии», контакты, достижения, новости, бренды, акции, сотрудничество, магазины и др.

Квадрант «Идеальный маркетинг» обозначает полное соответствие необходимости использования данного компонента и маркетинговых усилий. Квадрант «Провальный маркетинг» говорит о том, что присутствие данного элемента не обязательно, спрос на него очень слабый. Кроме того, визуализация этого элемента весьма посредственна. «Необоснованный маркетинг» – необходимость использования этого элемента сомнительна, а его представление очень впечатляет. «Недостаточный маркетинг» – сам по себе элемент очень важен, пользуется спросом, а его визуализация и общее представление находится на очень слабом уровне.

В итоге был проведен анализ сайтов предприятий легкой промышленности (ОАО «Коминтерн», ПАО швейная фирма «Айвенго», ОАО «Брико»). Пример оценки структурных элементов сайта представлен в таблице.

## Анализ полезности и привлекательности сайта ОАО «Коминтерн»

Структурные элементы	Полезность	Привлекательность
Главная страница	9	9
О предприятии	8	5
Контакты	9	7
Достижения	9	7
Новости	7	8
Бренды	7	8
Акции	8	8
Сотрудничество	7	6
Магазины	8	6
Обратная связь	6	3
Ссылки на профили в социальных сетях	8	7
<i>Итого</i>	86	74
<i>Средний балл</i>	7,8	6,7

Исходя из данных этой таблицы, полезность структурных элементов превышает их привлекательность, что может отталкивать пользователей сайта, так как в первую очередь посетители обращают внимание на внешний вид и красочность информации, а уже потом – на ее полезность.

Анализ полезности и привлекательности сайтов ОАО «Брико» и ПАО швейная фирма «Айвенго» также показывает, что полезность структурных элементов превышает их привлекательность. А оценка показателя «Привлекательность» ниже пяти баллов, что свидетельствует о недостаточной проработке данного направления.

На основе результатов анализа построена матрица «Привлекательность – полезность» (рис. 3).

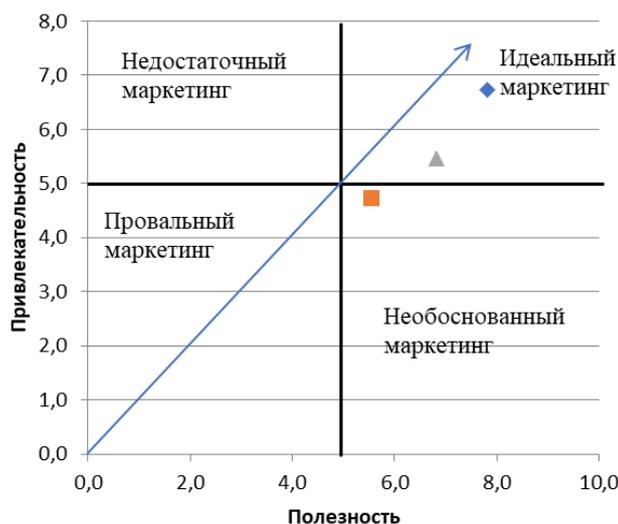


Рис. 3. Матрица «Привлекательность – Полезность»:

- ◆ – ОАО «Коминтерн»;
- – ОАО «Брико»;
- ▲ – ПАО швейная фабрика «Айвенго»

Точки на матрице показывают совокупную оценку учреждения образования по всем параметрам. По совокупности признаков ОАО «Коминтерн» и ПАО швейная фабрика «Айвенго» попали в квадрант «Идеальный маркетинг». Однако расположение ниже медианы говорит о необходимости переключения внимания разработчиков сайта на привлекательность структурных элементов. Точка ОАО «Брико» попала в квадрант «Необоснованный маркетинг». Это дает понять, что разработчикам необходимо сделать упор на привлекательность структурных элементов, тогда есть шанс перехода в квадрант «Идеальный маркетинг».

Таким образом, разработанная авторская методика матричного типа «Привлекательность – полезность» (ПП) может быть использована для анализа эффективности применения инструментов диджитал-маркетинга. Полученные результаты могут быть рекомендованы для выработки стратегии развития диджитал-маркетинга на данных предприятиях.

Итак, подводя итог, предприятиям можно рекомендовать в сфере диджитал-маркетинга:

1) рационализацию структуры сайта. Например, в статье автора [3] предложена идея создания идеального сайта исходя из его целей. Методика разработана и апробирована на предприятиях тяжелой промышленности. На рынке B2B важной задачей сайта является поиск новых посредников и закрепление с ними отношений. Для это создается на сайте вкладка «Дилерам» или «Партнерам», а в ней «Окно продаж», которая облегчает связь с предприятием потенциальных партнеров;

2) повышение визуализации сайта. Современные технологии позволяют представить на сайте 3D-модели выпускаемой продукции, а также можно разместить видео испытаний продукции и другие видеоматериалы по выпускаемой продукции и оказываемым услугам;

3) оптимизацию продвижения сайта в сети интернет. Анализ показывает, что наиболее конкурентоспособными на современном рынке являются предприятия, использующие все многообразие каналов диджитал-маркетинга: поисковую оптимизацию, маркетинг в социальных сетях, инфлюенс-маркетинг, вирусную рекламу, контент-маркетинг и многое другое.

Таким образом, можно отметить, что инструменты digital-маркетинга составляют основу продвижения в условиях повсеместного применения современных цифровых технологий и являются базисом формирования новой эры маркетинга. Именно поэтому современному маркетологу необходимо не просто иметь общее представление о новейших инструментах online продвижения, но и уметь грамотно владеть каждым из них при использовании в маркетинговой стратегии.

#### Л и т е р а т у р а

1. Руководство Осло – Рекомендации по сбору и анализу данных по инновациям. Совместная публикация ОЭСР и Евростата. – 3-е изд. – М., 2010. – 107 с.
2. Карчевская, Е. Н. Методические аспекты повышения эффективности инструментов интернет-маркетинга на предприятии / Е. Н. Карчевская, М. В. Яцухно // Потреб. кооп. – 2021. – № 4. – С. 31–34.
3. Соловьева, Л. Л. Методика совершенствования сайта предприятий машиностроения / Л. Л. Соловьёва, А. М. Гудеева // Современные проблемы машиноведения : сб. науч. тр. В 2 ч. Ч. 2 / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2023. – С. 313–316.

УДК 661.571.1:544.344.015.4-17

**НОВЫЙ СВЕРХТВЕРДЫЙ МАТЕРИАЛ «БЕЛАНИТ» НА ОСНОВЕ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА ДЛЯ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ****В. С. Урбанович<sup>1</sup>, С. В. Леончик<sup>1</sup>, В. С. Нисс<sup>2</sup>, С. В. Григорьев<sup>2</sup>,  
Е. О. Лавыш<sup>1</sup>, Е. Н. Шлома<sup>1</sup>**<sup>1</sup>ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», г. Минск<sup>2</sup>Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»,  
г. Минск, Республика Беларусь

Сверхтвердые композиционные материалы (СТМ) на основе кубического нитрида бора (сBN) играют важную роль в современном машиностроении. Они используются в режущем инструменте, применяемом для обработки закаленных сталей, жаропрочных сплавов и наплавов группы железа. Современное производство предъявляет к такому инструменту все возрастающие требования по обеспечению высокой производительности в условиях высоких скоростей резания и динамических нагрузок, интенсивного теплового и химического взаимодействия с обрабатываемыми материалами при соблюдении точности геометрии и размеров деталей, качества обрабатываемых поверхностей. Разработки ведутся в направлении повышения твердости и трещиностойкости сверхтвердых композитов, которые в значительной степени определяются их зерновой структурой и содержанием сверхтвердой фазы. Совокупность указанных характеристик во многом определяет их эксплуатационные свойства. Сверхтвердые композиционные материалы для финишной обработки должны обладать высокой твердостью, а для прерывистого точения – высоким уровнем трещиностойкости.

В настоящее время в Республике Беларусь не производятся сверхтвердые материалы для режущего инструмента в силу потери многих компетенций в постсоветский период. Поэтому отечественная промышленность в основном использует СТМ западных фирм.

Нами разработан новый сверхтвердый керамический материал «Беланит-2» на основе кубического нитрида бора с повышенной трещиностойкостью, перспективный для использования в режущем инструменте. Характеристики материала в сравнении с ближайшим аналогом представлены в таблице.

**Характеристики поликристаллических СТМ на основе сBN**

Характеристика	Беланит-2 (ВН)	Борсинит [1] (ВН)
Количество сBN, %	94	97
Температура спекания, °С	1650	2100–2300
Давление спекания, ГПа	7,7	7,7
Размер зерен, мкм	0,3–4	2–3
Состав связующего	$\beta$ -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , сBN	$\beta$ -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
Плотность, г/см <sup>3</sup>	3,43	3,47
Твердость НК1, ГПа	36,6 ± 1,5	–
Твердость HV10, ГПа	41,7 ± 0,1	36,2 ± 2,6
Трещиностойкость $K_{Ic}$ , МПа · м <sup>1/2</sup>	13,1 ± 0,3	11,7 ± 1,5
Модуль упругости, ГПа	832 ± 37	860

Характеристика	Беланит-2 (ВН)	Борсинит [1] (ВН)
Модуль сдвига, ГПа	368,1	366
Модуль объемного сжатия, ГПа	374,8	440
Коэффициент Пуассона	0,13	0,175

На рис. 1 показаны значения твердости  $H$  и трещиностойкости  $K_{IC}$  разработанного СТМ в сравнении с известными материалами для металлообрабатывающего инструмента.

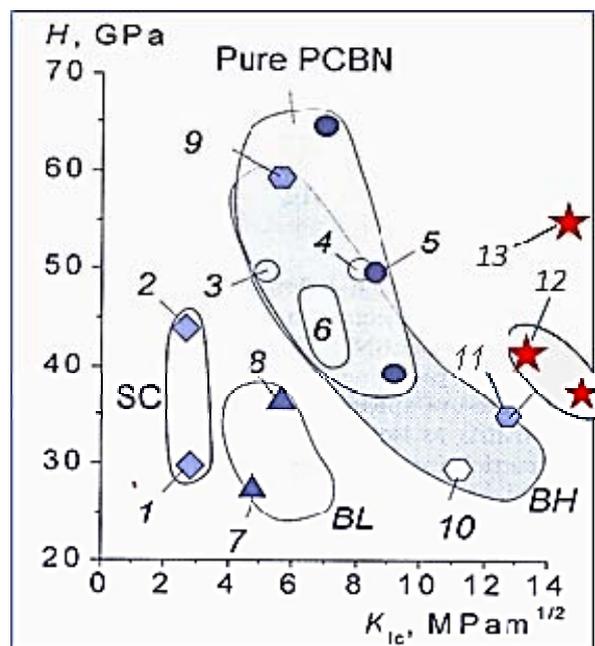


Рис. 1. Карта  $H$ - $K_{IC}$  материалов на основе cBN [2]:

SC – Single crystal: 1 – (001) $\langle 110 \rangle$ ; 2 – (111) $\langle 112 \rangle$ .

Чистый PCBN: 3 – hBN конверсионно спеченный; 4 – SPhT (PBN<sub>0</sub> → cBN, ориентированный); 5 – SPhT (PBN<sub>r</sub> → cBN, изотропный);

6 – cBN спеченный без добавок. BL композиты (содержание cBN 45–65 %): 7 – WBN 565 Ceram Тес коммерч. материал;

8 – Pullum O. J. (cBN-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, спеченный). ВН композиты (содержание cBN 70–95 %): 9 – Yoshihara H. (hBN-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, конверс. спеч.); 10 – KBN900 Kyocera (cBN-Al); 11 – Petruscha I. A. BSN (cBN-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>); 12, 13 – Беланит-2

На основе проведенных исследований нами разработана технология изготовления сменных неперетачиваемых режущих пластин с напайными элементами из сверхтвердых композиционных материалов «Беланит». Стадии их изготовления показаны на рис. 2.

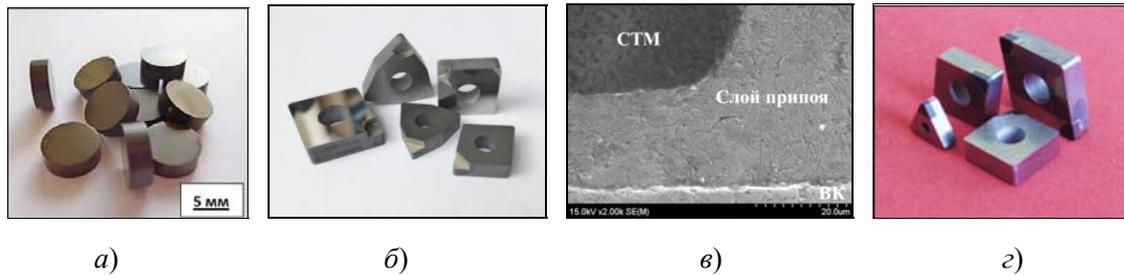


Рис. 2. Вид режущих элементов из СТМ «Беланит» (а); твердосплавные пластины разной конфигурации после электроэрозионной обработки (б); соединение пластины и керамического режущего элемента из СТМ, х2000 (в); режущие пластины после механической обработки (г)

Совокупность представленных характеристик позволяет рекомендовать материал «Беланит-2» для использования в режущем инструменте при металлообработке.

#### Литература

1. Создание и применение инструментальной керамики на основе сверхтвердых структурированных композитов / С. А. Клименко [и др.] // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. – 2012. – Вып. 12. – С. 127–137.
2. Petrusa, I. A. High-E/Low-E cBN/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composite for heavy interrupted cutting / I. A. Petrusa, O. S. Osipov, V. M. Tkach // Int. conf. «High Pressure Effects on Materials», Kiev, ISM NASU. 28 июня–1 июля 2011. Abstr's & Prst's / Ed. M. V. Novikov, V. Z. Turkevych, O. O. Leyeshchuk ; NAS of Ukraine. Bakul Inst. Superhard Mater. – Kyiv : EPC ALCON, 2012. – P. 277–286.

**СЕКЦИЯ 1**  
**АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ**  
**ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ.**  
**МЕХАТРОНИКА, ТЕХНИЧЕСКИЕ**  
**И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА**  
**АВТОМАТИЗАЦИИ**

УДК 621.9.014

**ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ МЕХАТРОННЫХ СТАНОЧНЫХ**  
**КОМПЛЕКСОВ ГИБРИДНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**С. А. Чижик<sup>1</sup>, М. Л. Хейфец<sup>2</sup>, Н. Л. Грецкий<sup>2</sup>, Б. М. Базров<sup>3</sup>**

*<sup>1</sup>Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова  
НАН Беларуси, г. Минск*

*<sup>2</sup>Институт прикладной физики НАН Беларуси, г. Минск*

*<sup>3</sup>Институт машиноведения имени А. А. Благонравова РАН,  
г. Москва, Российская Федерация*

Совокупность средств производства или производящих машин, включающих технологические, транспортные, энергетические и информационные машины, получила название технологических комплексов. Такие комплексы автономно функционируют и с использованием программного управления, в установленных пределах значений, обеспечивают требуемые характеристики качества изделий. Мехатронная система представляет собой единый комплекс электромеханических и электронных элементов и средств вычислительной техники, между которыми осуществляется непрерывный обмен энергией и информацией.

Функционально простую мехатронную систему технологического комплекса можно подразделить на следующие составные части: исполнительные устройства (объект управления и приводы), информационные устройства (датчики внутреннего состояния системы и датчики состояния внешней среды) и систему управления (компьютер и микропроцессоры). Взаимодействие между этими частями, реализующее прямые и обратные связи в системе, осуществляется через устройство сопряжения (интерфейс). Система управления включает аппаратные средства и программное обеспечение, которое управляет согласованной работой аппаратных средств и обеспечивает синхронизацию процессов сбора и обработки данных, поступающих от информационных устройств, с процессами, управляющими исполнительными устройствами.

При проектировании механической части технологического оборудования, используемого в традиционном и в перспективном производстве, применяются как известные, так и новые схемы формообразования и послойного синтеза изделий, а также интенсивные процессы модифицирования материалов концентрированными и распределенными потоками энергии.

Традиционно исходные данные для проектирования технологического оборудования содержат техническое задание конкретного заказчика, включающее только: 1) данные о материалах и готовых изделиях; 2) производительность оборудования; 3) характер и тип производства; 4) уровень автоматизации и встраиваемость в современное высокотехнологичное производство.

Последовательность проектирования технологического оборудования для производства традиционного типа включает укрупненные стадии, опирающиеся на расчетные схемы: 1) компоновка и выбор кинематической схемы; 2) модульное построение по ограниченному набору агрегатов и узлов; 3) выбор схемы и проведение прочностных расчетов; 4) выбор схемы и проведение динамических расчетов; 5) выбор термодинамической схемы и расчет температур; 6) точностные расчеты геометрических и кинематических связей; 7) расчеты надежности и долговечности с экономическим обоснованием ресурса; 8) анализ человеко-машинной системы, включающий охрану труда.

Расчет основных систем технологического оборудования производится по детализированным стадиям: 1) для несущих систем; 2) направляющих движений; 3) приводов движений и др. Проектирование основных систем технологического оборудования проводится по техническим требованиям, предъявляемым: механическим агрегатам, технологической оснастке и средствам автоматизации; системам смазки и охлаждения; электрооборудованию и программируемым системам; системам диагностики, с учетом техники безопасности и эргономики станка. В первую очередь при проектировании строятся схемы систем, с учетом ограничительных наборов агрегатов и узлов. Затем после структурного синтеза проводится параметрическая оптимизация, определяющая основные параметры систем технологического оборудования.

При формировании комплексов технологического оборудования для автоматизированного производства, использующего управление многочисленными приводами, концентрированными и распределенными потоками энергии, перечисленных стадий проектирования недостаточно. Связано это с тем, что требуется дополнительно рассматривать схемы модулей и определять параметры оборудования, описывающие подвод инструмента и распределение потоков энергии и материала.

Создание формы изделия в аддитивных технологиях происходит путем добавления материала с использованием источников энергии, в отличие от традиционных технологий механической обработки, основанных на удалении инструментом «лишнего» материала.

Широко применяемые в мировом производстве технологии позволяют заключить, что наиболее перспективно применение оборудования по наращиванию слоев и формообразованию поверхностей изделий, использующего различные сочетания материалов и источников энергии. Это, в свою очередь, ставит задачи распределения компонентов материалов и потоков энергии не только по заданному контуру или поверхности, но и по глубине от поверхности изделия, а также по характеру подачи материала и энергии.

Использование последовательностей критериев переноса для анализа процессов образования структуры материала многократно сокращает объем экспериментальных исследований технологии по формированию поверхностного слоя при термомеханической и электрофизической обработке. Критерии тепломассопереноса устанавливают последовательность структурообразования в обрабатываемом материале при увеличении мощности воздействий. Критерии, характеризующие потоки энергии, при электрофизической обработке оказывают влияние на последовательность поверхностных явлений и определяют процесс формирования свойств материала.

Организация обратных связей при управлении технологическим оборудованием через степени свободы инструментов, частиц наносимого материала и удаляемого слоя, посредством дополнительных воздействий потоками энергии, позволяет управлять устойчивостью процессов формирования поверхностного слоя. Поэтому, с учетом контуров прямых и обратных связей в технологической системе, следует

выбирать системы числового программного управления и проектировать комплекс технологического оборудования как мехатронную систему. Рассматривая комплекс технологического оборудования с позиций компьютеризации производственной деятельности, его модули, узлы и детали следует проектировать как устройства компьютерной периферии, построенные по той же архитектуре, что и ЭВМ.

Анализ процессов производства деталей без использования формообразующей оснастки (3D-печати), в зависимости от агрегатного состояния исходного материала, размерности потоков формообразующей среды и последовательности технологических операций, позволяет в виде структурной диаграммы связей описывать совокупность методов «выращивания» изделий.

Структурная диаграмма связей представляет собой направленный замкнутый граф и описывает автомат с конечным числом состояний. Вершины графа изображают процессы создания деталей без формообразующей оснастки и представляют логические операции: трансляцию информации; движение потоков вещества и энергии; запуск и остановку автоматического цикла.

Описание алгоритмами в соответствии с терминами логических операций процессов 3D-печати по структурной диаграмме связей дает возможность анализировать существующие и разрабатывать новые методы прямого «выращивания» изделий.

Анализ стадий и этапов проектирования технологического оборудования и мировых тенденций развития технологических комплексов показывает, что в Республике Беларусь станкостроение за последние 30 лет не развивалось должными темпами (утраченными после 80-х гг. прошлого века), а ставка делалась на приобретение зарубежных образцов оборудования ведущих фирм или станков и средств оснащения дешевого массового производства. В этой связи научное сопровождение отечественного станкостроения и оснащения оборудования ЧПУ становится крайне необходимым и носит как фундаментальный, так и поисковый характер. Такие вопросы под силу решать только совместными усилиями академической, отраслевой и вузовской науки.

#### Л и т е р а т у р а

1. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / А. М. Русецкий [и др.] ; под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск : Беларус. навука, 2012. – 239 с.
2. Ящерицын, П. И. Основы проектирования технологических комплексов в машиностроении : монография / П. И. Ящерицын, Л. М. Акулович, М. Л. Хейфиц. – Минск : Технопринт, 2006. – 248 с.

УДК 621:681.51

### РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГ В ПРОИЗВОДСТВЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ

П. А. Витязь<sup>1</sup>, М. Л. Хейфец<sup>2</sup>, Н. Л. Грецкий<sup>2,3</sup>, Д. Н. Хилько<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

<sup>2</sup>Институт прикладной физики НАН Беларуси, г. Минск

<sup>3</sup>ООО «ШТРАБАГ Инжиниринг Центр», г. Минск, Республика Беларусь

В настоящее время под термином «реверс инжиниринг» или «обратное проектирование» в машиностроении по большей части понимают процесс получения цифровой 3D-модели изделия, конструкторской документации или физического объекта с использованием 3D-сканеров, автоматизированных систем проектирования (CAD/CAM/CAE) и 3D-принтеров. Реверс-инжиниринг изделий с простой геометрией можно выполнять,

используя и традиционные методы измерения, применяя ручные измерительные инструменты (штангенциркуль и т. д.), и на основании полученных измерений строить 3D-модели и разрабатывать конструкторскую документацию, но при работе с крупногабаритными изделиями, процесс измерения занимает много времени. Поэтому при работе с такими изделиями применяют автоматизированные инструменты, такие как оптические и лазерные сканеры, координатно-измерительные машины и т. д.

Рассмотрим его применение на примере восстановления крупногабаритного шнекового вала фильтр-пресса сброженного субстрата немецкого производителя Bellmer Kufferath, витки шнека в зоне давления подвержены интенсивному абразивному износу из-за содержания в исходном материале большого количества песка, камней, стекла и т. д.

Для шнекового вала разработан порядок восстановления, использующий принципы реверс-инжиниринга:

1. *Изучение объекта, условий и принципов работы, исследования процесса изнашивания шнекового вала.* При исследовании рабочих процессов шнекового пресса установлено, что при достижении кривизны центральной цилиндрической поверхности и (или) износа витков шнекового вала свыше 5 мм на сторону требуется выполнение капитального ремонта изделия, так как дальнейшая эксплуатация пресса нецелесообразна в связи со значительным снижением его пропускной способности. Установлено, что на пропускную способность пресса также влияет состояние упрочняющего покрытия и целостность последних наиболее нагруженных витков шнекового вала.

2. *Демонтаж и транспортировка шнекового вала на ремонтный участок.* Очистка и подготовка поверхности детали (включая дробеструйную обработку) для диагностических измерений и контроля пространственной геометрии. С помощью проведенных металлографических исследований и химического анализа устанавливаются материалы основы и химический состав нанесенного упрочняющего покрытия.

3. *Разработка и изготовление вспомогательной оснастки* для измерений, позволяющих осуществлять свободный доступ оператора и сканера, а также выполнять жесткую фиксацию сканируемого объекта по отношению к базе координатно-измерительной руки. Сканирование пространственной геометрии шнекового вала с помощью лазерного сканера ModelMaker MMDx100, установленного на координатно-измерительной руке Nikon Metrology MCAx40+. Обработка полученных данных в программе Focus 10 Handheld: удаление лишних элементов, оптимизация размера, проверка точности сшивки отсканированных поверхностей и получение STL-модели шнекового вала.

4. *Исследования степени износа и дефектов.* Обработка полученных данных (STL-модели сканера) и определение кривизны цилиндрической части шнекового вала. Для определения кривизны центральной цилиндрической поверхности шнекового вала в программе Focus 10 Handheld строятся цветовые карты отклонений центрального диаметра цилиндрической (без учета витков) поверхности от номинального. При отклонении цилиндрической поверхности более чем 5 мм на сторону требуется правка проблемных участков на специально разработанном приспособлении с помощью гидравлических домкратов.

5. *Разработка технологии послойного восстановления ферропорошками и проволоками с применением электрофизических источников энергии и необходимой для этой цели оснастки.* Срезание оставшегося упрочняющего покрытия ручной плазменной резкой на специально разработанном приспособлении. Правка посадочных (базовых) поверхностей и обработка витков шнека после плазменной резки для после-

дующей наплавки проволоки. Наплавка проволокой Нп-30 и последующая токарная обработка на универсальном токарно-винторезном станке ДИП-500. Электромагнитная наплавка порошка ферротитана с последующим шлифованием на токарно-винторезном станке ДИП-500 с помощью специально разработанной оснастки.

6. *Очистка поверхности шнекового вала после процесса упрочнения.*

7. *Визуальный контроль качества выполненных работ.* Контроль твердости с шагом 100 мм упрочненной поверхности витков (твердость покрытия должна находиться в пределах 60–62 HRC). Измерение восстановленной геометрии витков шнекового вала с помощью лазерного сканера ModelMaker MMDx100, установленного на координатно-измерительной руке Nikon Metrology MСAх40+. При построении в программе Focus 10 Handheld цветовой карты отклонений от номинального размера сначала сравнивается отклонение витков диаметром 627 мм, а затем – витков диаметром 601 мм (рис. 1).

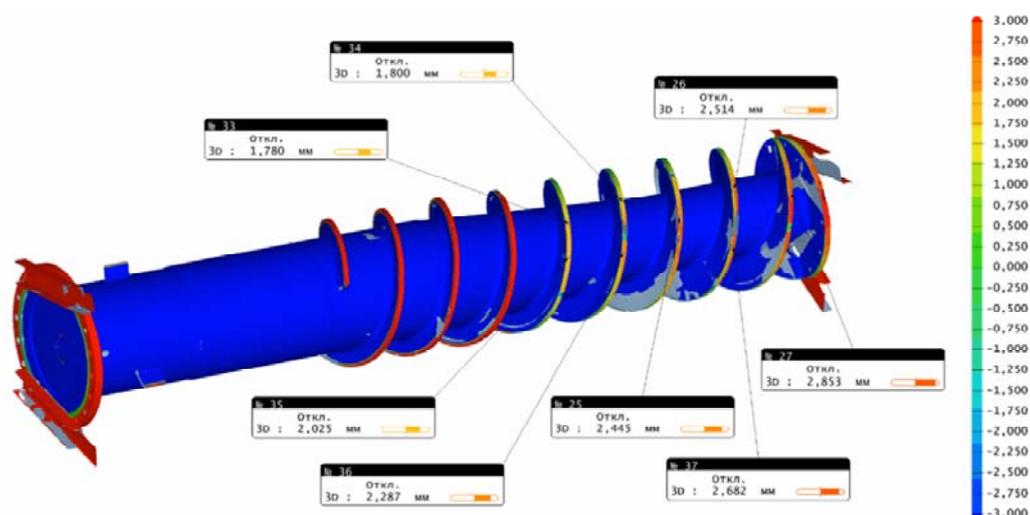


Рис. 1. Цветовые карты отклонений поверхностей витков STL-модели относительно поверхности базового цилиндра диаметром 601 мм

8. *Обезжиривание поверхности и покрытие коррозионно-стойким грунтом. Отгрузка потребителю.*

Таким образом, применение принципов реверс-инжиниринга к производству и восстановлению уникальных крупногабаритных изделий сложной геометрии с применением электрофизических источников энергии при наплавке порошков и проволок дает возможность не только обеспечить нужные геометрические характеристики поверхности при восстановлении, но и повысить физико-механические свойства материала поверхностного слоя при упрочнении. Стоимость восстановления шнекового вала прессы в два раза ниже, чем изготовление нового при одинаковой длительности условий эксплуатации.

#### Литература

1. Технологические аспекты конверсии машиностроительного производства / А. С. Васильев [и др.]. – Тула : ТулГУ, 2003. – 271 с.

УДК 621.22-226

## ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОФАЗНЫХ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ДРОБНЫМИ ЗУБЦОВЫМИ ОБМОТКАМИ

С. В. Пантелеев, А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин

*Военная академия Республики Беларусь, г. Минск*

В Республике Беларусь и зарубежных странах в качестве перспективной рассматривается синхронная электрическая машина с дробными зубцовыми обмотками, которая имеет ряд достоинств, таких как высокая удельная мощность и крутящий момент, малая длина лобовых частей обмотки, уменьшенная высота ярма магнитопровода статора и ротора. Однако электрические машины такого класса имеют ряд нерешенных проблем, которые ограничивают возможные области их применения в генераторном режиме работы.

Из общей теории электромеханического преобразования энергии известно, что для обеспечения непрерывного преобразования энергии в электрической машине необходимо, чтобы действие электромагнитных сил (электромагнитного момента) не зависело от положения ротора [1]. Выполнение такого условия обеспечивает наибольшую электромагнитную мощность электрического генератора (двигателя) и преобразование механической энергии в электрическую (и обратно) с наилучшими энергетическими показателями [2].

В генераторном режиме работы электрической машины ток в обмотке статора взаимодействует с магнитным полем возбуждения (постоянных магнитов), обуславливая действие электромагнитной силы. То есть на каждый активный проводник обмотки статора, находящийся под полюсами электрического генератора, воздействует электромагнитная сила, закон изменения которой определяется распределением индукции магнитного поля возбуждения в воздушном зазоре и функцией изменения тока в проводнике [1]. Рассмотрим закон изменения электромагнитных сил, действующих в трехфазном синхронном электрическом генераторе с дробными зубцовыми обмотками (СЭГ с ДЗО), при его работе на активный выпрямитель напряжения (АВН). Схема электрической силовой цепи такой системы представлена на рис. 1.

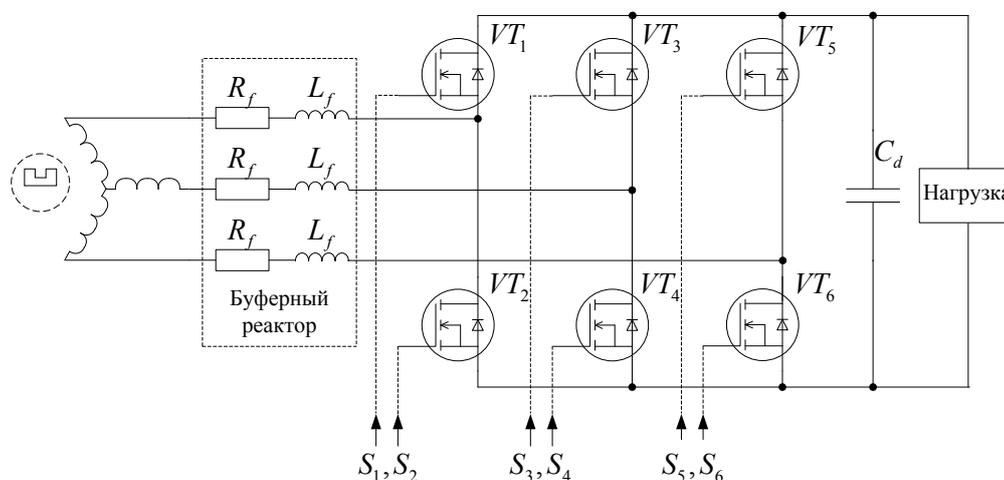


Рис. 1. Схема электрической силовой цепи системы  
«трехфазный СЭГ с ДЗО – АВН»

На рис. 1 в каждый момент времени к нагрузке прикладываются линейные напряжения и в обмотке генератора протекают линейные токи, закон изменения которых аналогичен закону изменения напряжения (ЭДС). Подобие законов изменения напряжения (ЭДС) и токов применимо для данной схемы, поскольку одной из функций АВН является поддержание коэффициента мощности, близким к единице. Анализ гармонического состава ЭДС, индуцированной в трехфазном СЭГ с ДЗО несинусоидальным распределением вращающегося магнитного поля, показывает следующее. Функция фазной ЭДС является полигармонической, кроме первой гармоники она содержит высшие гармоники третьего, пятого и седьмого порядка. При этом третья гармоника является преобладающей из высших гармоник. Ее амплитуда составляет 12 % от первой. Однако функция линейной ЭДС является синусоидальной, как показано на рис. 2. За счет пространственного сдвига двух фаз на 120 электрических градусов амплитуда третьей гармоники ЭДС стремится к нулю.

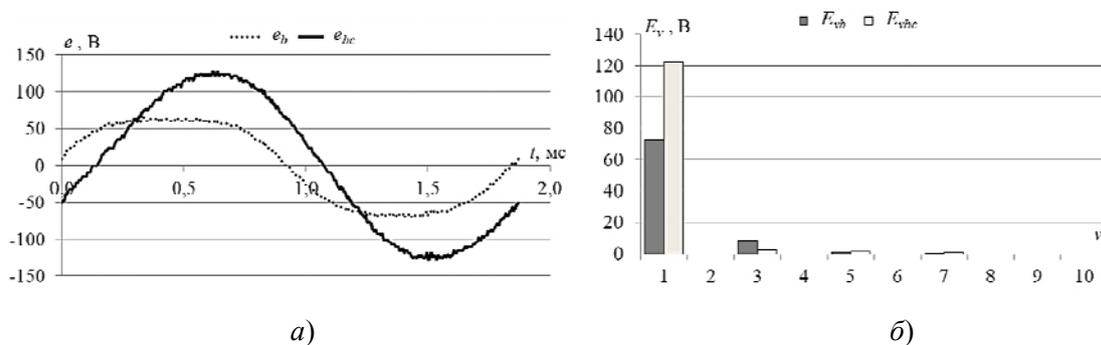


Рис. 2. Диаграммы ЭДС холостого хода трехфазного СЭГ с ДЗО:  
а – временная; б – спектр временных гармоник

Считая, что активный проводник с током имеет протяженность вдоль оси машины, равную единице длины, и располагается в магнитном поле с радиальной составляющей индукции, определим электромагнитную силу, которая действует на этот проводник. Функции изменения индукции магнитного поля возбуждения  $B_r$ , линейного тока  $i_{ab}$  в обмотках и электромагнитной силы  $F_{em.ab}$  имеют вид, представленный на рис. 3.

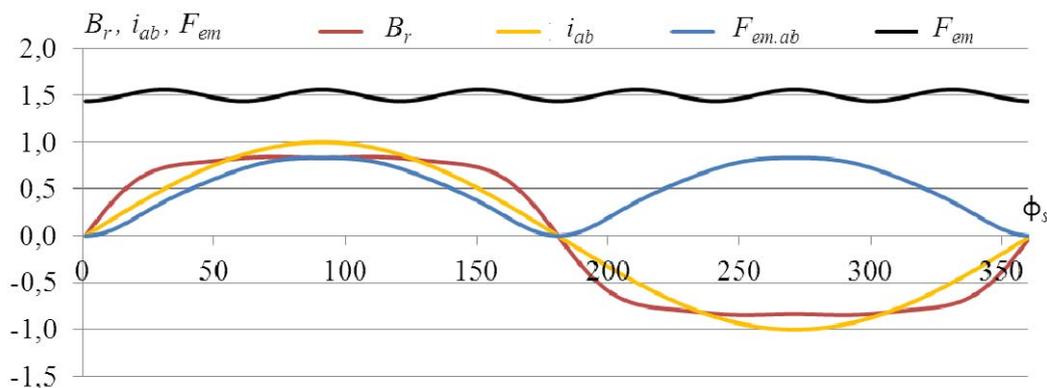


Рис. 3. Функции изменения индукции магнитного поля ПМ, линейного тока в обмотках и электромагнитной силы трехфазного СЭГ с ДЗО

Из рис. 3 видно, что в трехфазном СЭГ с ДЗО результирующая электромагнитная сила  $F_{em}$  существенно зависит от положения ротора, что обуславливает динамический электромагнитный момент. Таким образом, не в полной мере выполняется условие обеспечения непрерывного преобразования энергии в электрической машине.

Достижение постоянства электромагнитных сил и момента при изменении угла поворота ротора в СЭГ с ДЗО, работающего на АВН, представляется возможным, если обеспечить индуктирование в обмотках генератора трапецеидальных линейных ЭДС, близких к распределению в воздушном зазоре индукции магнитного поля возбуждения. Обеспечение полигармонического закона изменения линейных ЭДС электрических генераторов представляется возможным путем использования многофазных обмоток, число фаз которых является нечетным числом и больше трех.

#### Литература

1. Фираго, Б. И. Теория электропривода : учеб. пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Изд. 2-е. – Минск : Техноперспектива, 2007. – 585 с.
2. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин : учебник / И. П. Копылов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 2001. – 327 с.

УДК 621.311.24:621.311.25:621.311.26

## **АДАПТИВНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНОГО СИЛОВОГО ФИЛЬТРА**

**Р. Е. Первененок, А. Л. Сицко**

*Военная академия Республики Беларусь, г. Минск*

Ухудшение качества электрической энергии, вызванное увеличением уровня высших гармоник тока и напряжения, становится серьезной проблемой для систем электроснабжения. Источником высших гармоник тока и напряжения является электрическая нагрузка с нелинейной вольт-амперной характеристикой, к числу которых относятся многие современные энергосберегающие устройства.

Качество электрической энергии оказывает отрицательное влияние на систему электроснабжения, так как при несоответствии показателей требованиям приводит к износу электрооборудования и нарушению работы специальной вычислительной техники.

Анализ литературы [1], посвященной вопросу повышения качества электрической энергии, показал, что широкое распространение получили такие устройства повышения качества электрической энергии, как пассивные, активные и гибридные (активно-пассивные) фильтры. Пассивные фильтры являются наиболее экономически выгодными устройствами, так как требуют небольших затрат для их производства, но имеют ряд недостатков, связанных с возможностью возникновения резонанса в параллельном колебательном контуре, образуемого пассивным фильтром и системой электроснабжения на частотах, близких частотам высших гармоник. Гибридные фильтры имеют существенный недостаток, заключающийся в том, что выходной ток (или напряжение), выдаваемый в противофазе с высшей гармонической составляющей сетевого тока (напряжения), не совпадает с ней по форме (в силу специфики работы инвертора), в результате чего в спектре сетевого тока (напряжения) появляются дополнительные гармонические составляющие. Кроме того, активная часть гибридного фильтра отличается повышенной сложностью алгоритмов управления и большими аппаратными затратами, необходимыми для ее реализации. В связи с этим

становится актуальной разработка средства улучшения КЭ на основе активных фильтров с улучшенной системой управления.

Способы управления характеристиками силовых активных фильтров (АФ), основанные на применении алгоритмов цифровой обработки сигналов и нейронных сетей, начали интенсивно развиваться в последние годы, поэтому многие вопросы применения этих методов остаются нерешенными.

Формируемый системой управления АФ спектральный состав сигнала должен совпадать в противофазе с гармоническим составом генерируемого нелинейной нагрузкой несинусоидального тока, не содержащим гармонику на основной частоте.

Характеристики АФ в основном зависят от системы формирования управляющих сигналов. Основные исследования АФ направлены на получение качественных и быстрых алгоритмов выделения опорных токов и напряжений в системе формирования управляющих сигналов.

Одним из распространенных способов формирования управляющих сигналов АФ является использование аналогового режекторного фильтра, настроенного на частоту основной гармоники [2]. Однако использование аналогового режекторного фильтра имеет недостатки, связанные с тем, что такой фильтр является статическим устройством, и его характеристики не изменяются при изменении частоты и амплитуды основной гармоники. Для формирования управляющего сигнала АФ необходимо адаптивное устройство, характеристики которого изменяются при изменении спектрального состава несинусоидальных токов или напряжений.

Исследования алгоритмов, адаптивной фильтрации в системе формирования управляющих сигналов АФ, представленных в таблице, было проведено в программном комплексе Matlab. Наиболее эффективным стал нормализованный алгоритм средних квадратов (NLMS). В качестве примера рассмотрены результаты компенсации высших гармоник в спектре тока трехфазного мостового выпрямителя [3].

### Характеристики адаптивных алгоритмов

Алгоритм	Вычислительная процедура ( $k$ – число итераций)	Вычислительная сложность
Наименьших средних квадратов (LMS)	$\hat{W}_{k+1} = \hat{W}_k + \eta e_k X_k$	2N сложений, 2N умножений
Нормализованный алгоритм средних квадратов (NLMS)	$\hat{W}_{k+1} = \hat{W}_k + \frac{\eta}{\delta + X_k^+ X_k} X_k e_k$	3N сложений, 3N умножений, деление
Рекурсивный алгоритм наименьших квадратов (RLS)	$\hat{W}_{k+1} = \hat{W}_k + g_k e_k$ $g_k = \frac{R_k^{-1} X_k}{\lambda + R_k^{-1} X_k^+ X_k}$ $R_{k+1}^{-1} = \lambda^{-1} [R_k^{-1} - g_k X_k^+ R_k^{-1}]$	$2N^2 + 3N$ сложений, $3N^2 + 3N$ умножений, деление

*Примечание.*  $W_k$  – весовые коэффициенты;  $X_k$  – входной вектор;  $e_k$  – ошибка обучения;  $\lambda$  – коэффициент забывания;  $\eta$  – шаг сходимости;  $R_k^{-1}$  – матрица, вычисляемая рекурсивно на каждой итерации;  $g_k$  – вектор коэффициентов Калмана, являющийся по существу набором переменных шагов сходимости для каждого весового коэффициента;  $\delta^2$  – малое действительное число;  $\delta^2 \geq 0,01\sigma_x^2$ ;  $\sigma_x^2$  – дисперсия входного сигнала адаптивного фильтра.

Спектр сигнала, поступающего на основной вход фильтра, показан на рис. 1. Коэффициент гармоник сигнала, поступающего на основной вход  $\text{THD}_I = 24,36\%$ . Спектр восстановленного сигнала показан на рис. 2. Коэффициент гармоник восстановленного сигнала  $\text{THD}_I = 5,18\%$ .

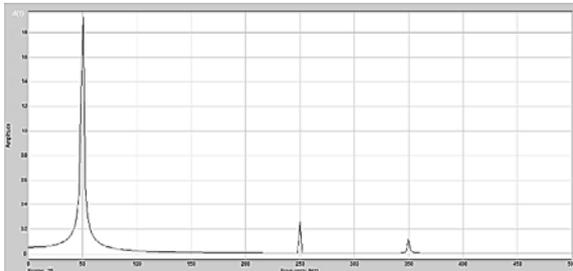


Рис. 1. Спектр сигнала на основном входе адаптивного фильтра



Рис. 2. Спектр восстановленного сигнала адаптивного фильтра

Результаты имитационного моделирования показали, что система управления активного фильтра на основе адаптивной фильтрации с нормализованным алгоритмом средних квадратов в качестве настройки весовых коэффициентов эффективно подавляет высшие гармоники несинусоидального тока. Это позволяет уменьшать  $\text{THD}_I$  с 24,36 до 5,18 %.

#### Л и т е р а т у р а

1. Синтез фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения : монография / Н. П. Боярская [и др.] ; под ред. В. П. Довгуна. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2014. – 192 с.
2. Боярская, Н. П. Адаптивная система формирования управляющих сигналов для активных фильтров гармоник / Н. П. Боярская, А. М. Дербенев, В. П. Довгун // Ползун. вестн. – 2011. – № 2/1. – С. 25–29.
3. Первененок, Р. Е. Фазовая синхронизация в системе коррекции параметров питающего напряжения методом адаптивной фильтрации / Р. Е. Первененок, А. Л. Сицко // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2021. – Т. 66, № 2. – С. 212–219.

УДК 621.9.014

### КВАДРУПОЛЬНАЯ КОМПОНОВКА ДЛЯ КРУПНОГО МНОГОЦЕЛЕВОГО ГИБРИДНОГО СТАНКА

С. С. Довнар<sup>1</sup>, А. Д. Лапука<sup>1</sup>, С. В. Резник<sup>2</sup>, А. В. Федорец<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, г. Минск

<sup>2</sup>ОАО «СтанкоГомель», Республика Беларусь

<sup>3</sup>ОАО «МЗОР», г. Минск, Республика Беларусь

Работа направлена на развитие аддитивно-субтрактивных (гибридных) станков. Станки должны нести как субтрактивные (снимающие стружку) модули, так и аддитивные модули (например, лазерные головки). Обсуждаются крупногабаритные станки, компоновки которых обычно включают стойки, колонны, башни. Работа опирается на концепцию бионической бетонной башни (БББ) [1, 2]. Концепция рекомендована прежде всего для станкостроения. Материалом для башен может быть фибробетон UHPFRC.

Новизна данной работы заключается в концепции *квадруполя* – системы из четырех БББ (рис. 1; фигуры людей даны для демонстрации размеров станка). Каждая башня 1–4 на рис. 1, *а* несет на себе минимум два обрабатывающих модуля М. При обработке токарной детали Т (рис. 1, *б*) квадруполь создает двойной портал П1, П2.

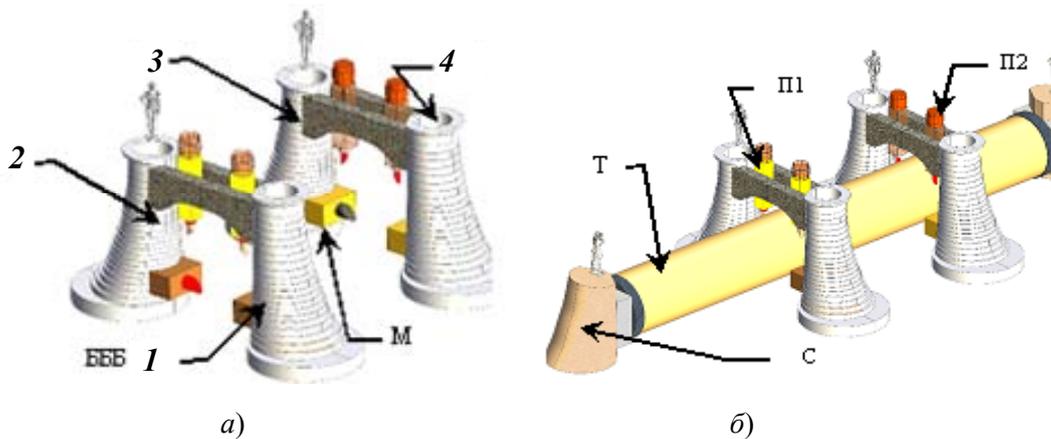


Рис. 1. Квадруполь из четырех бионических бетонных башен (БББ – 1–4) с аддитивными и субтрактивными модулями М (*а*) и схема токарной обработки детали-трубы Т в квадруполе (*б*): С – подвижная стойка для трубы; П1, П2 – пара динамических порталов

Портал П1 образован башнями 1 и 2, а портал П2 – башнями 3 и 4. Модули каждого портала могут не только обрабатывать трубу, но и поддерживать ее (выполнять функции люнетов).

По торцам трубу Т удерживают стойки С (аналоги передней и задней бабок токарного станка). Предполагается, что труба Т доставляется внутрь квадруполя в осевом направлении именно подвижными стойками С. Монтаж-демонтаж трубы в стойках происходит вне квадруполя. Это позволяет использовать многочисленные дорогостоящие обрабатывающие модули М в постоянном режиме. Станок можно укомплектовать двумя парами стоек для поочередной подачи труб в квадруполь.

В предлагаемой концепции каждая башня квадруполя имеет вертикальную ось поворота. Это дает возможность реконфигурировать систему порталов. На рис. 2, *а* все башни показаны в промежуточном состоянии, повернутыми на 45°. Они находятся в процессе переключения с обработки токарной детали Т на фрезерную деталь Ф. Деталь Ф подается в квадруполь с перпендикулярного направления по отношению к Т.

После поворота башен на 90° квадруполь реконфигурируется в порталы П3 и П4 (рис. 2, *б*). Портал П3 образуется башнями 2 и 3 (рис. 1, *а*), а портал П4 – башнями 1 и 4. Подчеркнем, что происходит именно динамическая реконфигурация башен [3]. После нее деталь Ф (рис. 2, *б*) может интенсивно обрабатываться всем комплектом аддитивных и субтрактивных модулей станка.

Таким образом, концепция станка предполагает новую, перекрестную схему продвижения токарных и фрезерных деталей сквозь станок. Подготовительно-заключительные действия с деталями выносятся на периферию и не блокируют работу станка. В результате квадруполь БББ становится центром интенсивной аддитивно-субтрактивной обработки для широкого круга деталей.

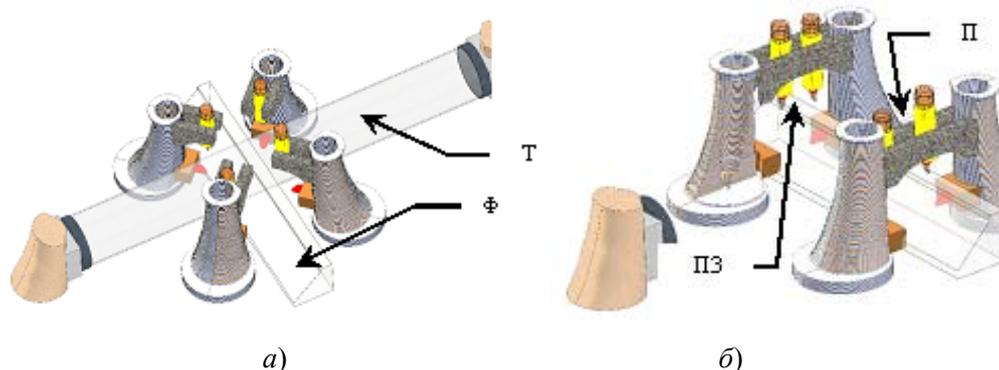


Рис. 2. Схема реконфигурации башен квадруполя (а) и обработки детали фрезерного типа Ф (б): ПЗ, П4 – оппозитная (по отношению к П1, П2) пара динамических порталов

Предлагаемая квадрупольная компоновка станка требует решения по меньшей мере двух механических задач. Во-первых, нужно разработать систему быстрого и точного сцепления башен в портал. Между башнями должна возникать динамическая траверса.

Во-вторых, требуется подсистема развязки взаимно перпендикулярных направляющих в перекрестии в центре квадруполя. Возможным, хотя и энергетически затратным вариантом, является сочетание гидростатических горизонтальных направляющих.

#### Литература

1. Довнар, С. С. МКЭ-анализ бетонно-бионического бандажа подвижной колонны станка – Теоретическая и прикладная механика : междунар. науч.-техн. сб. / С. С. Довнар, А. М. Якимович, А. Д. Лапука / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол. Ю. В. Василевич (пред. редкол., гл. ред.). – Минск : БНТУ, 2022. – Вып. 37. – С. 132–137. <https://rep.bntu.by/handle/data/125456>.
2. МКЭ-анализ эффективности бионической исторической консоли в качестве колонны крупногабаритного станка / С. С. Довнар [и др.] // Систем. анализ и приклад. информатика. 2023. – № 2. – С. 13–23. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2023-2-13-23>
3. Dounar, S., Iakimovitch, A. & Jakubowski, A. (2021) Finite element analysis of the dynamically created portal in the huge machine tool of “travelling column” type. Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie 65 (137). <https://repository.am.szczecin.pl/handle/123456789/2658>. <https://doi.org/10.17402/458>

УДК 621:681.51

## ПОВЫШЕНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОСТИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ НА ОСНОВЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

В. А. Данилов

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Повышение универсальности станков по форме обрабатываемых поверхностей эффективно при освоении производства изделий, для обработки которых требуются специальные станки. Альтернативой их созданию является расширение технологических возможностей существующих станков путем реализации прогрессивных технологий формообразования. В большей мере это важно для станочного оснащения

ремонтного, опытного и мелкосерийного производства, когда приобретение станка для решения определенной технологической задачи связано со значительными экономическими затратами. Примерами такого подхода является решение задач станочного обеспечения производства: деталей моментопередающих соединений с синусоидальным профилем и роторов одновинтовых насосов на токарно-затыловочном станке; деталей с торцовым зубчатым контуром на универсальном зубофрезерном станке и др. [1]. Станочное оборудование для обработки таких изделий было создано при сохранении возможности использования модернизированных станков и по прямому назначению, т. е. путем расширения их технологических возможностей.

Многообразие решаемых задач обуславливает необходимость выявления и использования типовых путей повышения универсальности станочного оборудования как при модернизации существующего, так и создании нового. Техническое решение по расширению технологических возможностей станка не является зачастую очевидным, а требует: обоснования метода и кинематики формообразования поверхности с учетом технических возможностей базового станка; анализа его кинематической структуры и функциональных связей между исполнительными движениями, возможности настройки их параметров для реализации принятого метода формообразования поверхности; разработки общей и кинематической схем ее обработки, оценки возможности и условий их реализации, исходя из геометрии формируемой поверхности, кинематики и компоновки модернизируемого станка.

Технически просто расширение технологических возможностей станка достигается путем задания рациональной структуры и настройки параметров исполнительных движений или за счет применения другого типа режущего инструмента без изменения кинематических связей в станке. Примером такого решения в первом случае является обеспечение возможности обработки на токарно-затыловочных станках синусоидальных цилиндрических поверхностей и круговых винтовых поверхностей, что существенно расширяет технологические возможности таких станков. Например, при сообщении производящей окружности винтового движения вдоль оси изделия формируется круговая винтовая поверхность. Заметим, что такими же движениями на токарно-затыловочном станке обеспечивается обработка задних поверхностей зубьев затылуемых инструментов (метчиков, червячных фрез), что и позволяет обрабатывать на нем круговые винтовые поверхности.

В поперечном сечении указанные поверхности формируются сложным движением профилирования, образованным вращением заготовки и согласованным с ним возвратно-поступательным движением резца в радиальном направлении. Согласование движений, необходимое для получения заданной формы поперечного сечения обработанной поверхности (соответственно, синусоидальная или окружность), осуществляется в станках для обработки сложных поверхностей механизмом-построителем, копировальной или числовой системой управления, обеспечивающих требуемую взаимосвязь этих движений.

От процесса затылования зубьев режущих инструментов профилирование круговой винтовой поверхности или синусоидальной цилиндрической поверхности отличается иным соотношением параметров указанных движений, что технически просто достигается без изменения кинематики станка заменой кулачка затылования кулачком, обеспечивающим кинематическое формирование соответственно окружности, эксцентрично расположенной относительно оси винтовой поверхности, или синусоидального профиля. Такое решение позволило, например, отказаться от приобретения специального станка и освоить при минимальных затратах обработку на

универсальном токарно-затыловочном станке роторов винтовых насосов для ремонта импортного технологического оборудования. Аналогично решена задача обработки на этом же станке наружных и внутренних синусоидальных цилиндрических поверхностей профильных моментопередающих соединений [1].

Расширение технологических возможностей шлицефрезерного станка без изменения кинематики обеспечено за счет другого типа режущего инструмента в соответствии с реализуемой схемой обработки. Применение, например, вместо червячной фрезы эксцентрично установленного цилиндрического инструмента (фрезы, шевера), некруглого или эксцентрично установленного круглого резца позволяет на этом станке обрабатывать по прогрессивным схемам формообразования некруглые валы профильных моментопередающих соединений.

В общем случае при обработке сложной поверхности предпочтительно ее кинематическое (бескопирное) профилирование, при котором отсутствуют погрешности, зависящие, в частности, от точности изготовления копиров в копируемых станках или метода интерполяции формируемой поверхности на станках с ЧПУ.

Для оценки возможности использования станка по иному назначению необходимо на основе результатов анализа рассмотреть возможность модификации его кинематической структуры на базе существующей кинематики, исходя из конкретной задачи расширения его технологических возможностей. При этом важно установить возможность реализации общих принципов синтеза рациональных схем формообразования поверхностей на станках, основные из которых следующие [2]:

- оптимизация структуры исполнительных движений, например, за счет исключения реверсивного движения путем замены его вращательным движением инструмента;

- совмещение исполнительных движений, например, формообразования и деления для упрощения схемы обработки поверхности и обеспечения возможности ее реализации на модернизируемом станке;

- перенесение функции исполнительного движения (формообразования, деления, врезания, ориентации и др.) на режущий инструмент или приспособление;

- обеспечение рационального сочетания скоростей элементарных движений, например, для стабилизации скорости исполнительного движения или управления ею по определенному закону;

- сообщение инструменту или заготовке дополнительных движений для улучшения условий резания или качества обработки;

- рациональное разделение элементарных движений между инструментом и заготовкой для повышения производительности обработки и др.

В результате реализации этих принципов на базе универсальных станков создано оборудование для изготовления импортозамещающих изделий.

#### Л и т е р а т у р а

1. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А. М. Русецкий [и др.] ; под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск : Беларус. навука, 2014. – 316 с.
2. Данилов, В. А. Научные основы технологии формообразования сложных поверхностей резанием : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.01 ; 05.02.08 / В. А. Данилов ; Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск : Технопринт, 2002. – 50 с.

## МЕТОДЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПРОФИЛЕМ В ВИДЕ ТРЕУГОЛЬНИКА РЕЛО НА ЗУБОДОЛБЕЖНЫХ СТАНКАХ

А. А. Данилов

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

В машиностроении все шире применяются профильные моментопередающие соединения типа «вал–втулка», которые по сравнению с традиционными шлицевыми соединениями обладают более высокой усталостной прочностью, износостойкостью и долговечностью при меньшей до 50 % стоимости изготовления. Поэтому актуальное значение имеет разработка эффективных технологий обработки деталей таких соединений.

Из возможных профилей моментопередающих соединений (РК-3 профиль DIN 32711–79 и синусоидальный профиль для неподвижных соединений, К-4 профиль DIN 32712–79 для подвижных соединений и др.) заслуживает внимания обладающий, как и РК-3 профиль, свойством равноосности профиль в виде треугольника Рело (Рело-профиль), который благодаря своим геометрическим свойствам может применяться как в подвижных, так и в неподвижных соединениях. Треугольник Рело представляет пересечение трех дуг окружности одного радиуса, равного его ширине.

Известен способ формообразования такого профиля на зубодолбежном станке методом обката [1], по которому специальному долбяку 1 (рис. 1) и заготовке 2 сообщают согласованные противоположно направленные вращательные движения, соответственно  $B_1$  и  $B_2$ . Существенный недостаток этого способа – криволинейная форма режущих кромок долбяка, ее зависимость от геометрии формируемого профиля, что обуславливает сложность конструкции и изготовления режущего инструмента.

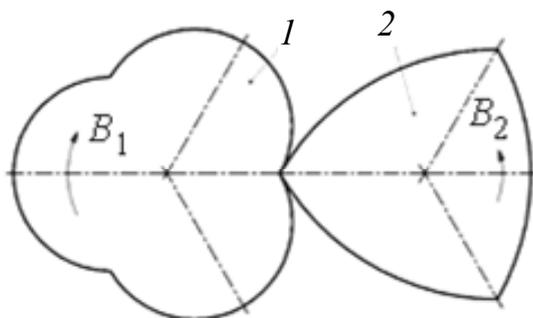


Рис. 1. Схема формирования Рело-профиля методом обката [1]

Теоретически доказана и экспериментально подтверждена возможность полигонального формирования Рело-профиля методами прерывистого огибания и следа, при которых он образуется двумя одинаково направленными вращательными движениями инструмента и заготовки с равными угловыми скоростями, что исключает необходимость в станках со сложной механикой, копировальной или числовой системами управления, применяемыми для обработки поверхностей с другими профилями. В отличие от метода обката, форма режущих лезвий не зависит от параметров Рело-профиля, что позволяет существенно упростить конструкцию инструмента, выполнять его режущие лезвия в виде сменных круглых пластин [2].

В процессе обработки заготовке 1 (рис. 2) и режущему инструменту 2 сообщают одинаково направленные вращательные движения  $B_1$  и  $B_2$  с равными угловыми скоростями вокруг параллельных осей, соответственно, 3 и 4. Инструмент имеет три режущих лезвия 5 в виде круглых сменных пластин радиусом  $r_1$ , центры  $b$  круговых режущих кромок которых равномерно расположены по окружности радиусом  $R$ .

Значение  $R$  определяется из схемы профилирования, согласно которой окружность 7 радиусом  $\rho$ , ограничивающая сторону  $AB$  треугольника Рело  $ABC$ , формируется как огибающая окружности радиусом  $r_1$ , центр которой перемещается относительно заготовки 1 по окружности 8 радиусом  $\rho_1$ , эквидистантой окружности 7. Окружность 8 является траекторией точки  $b$  в движении относительно неподвижной заготовки 1. Аналитически установлено, что  $R = \frac{b}{\sqrt{3}}$ .

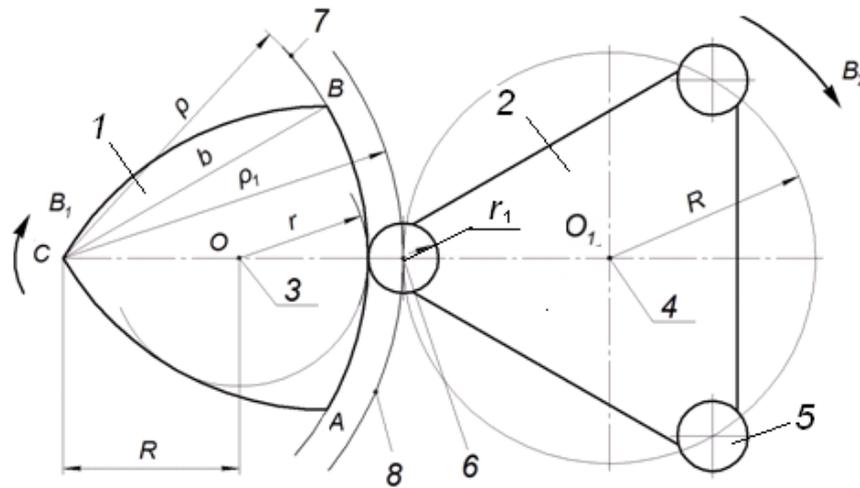
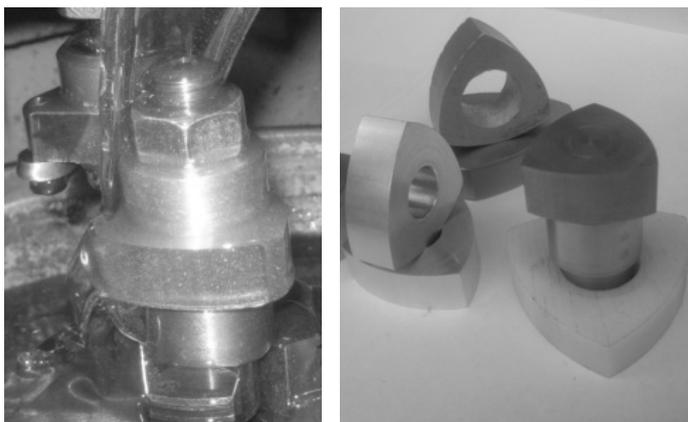


Рис. 2. Схема формирования Рело-профиля методом огибания [2]

Согласно рис. 2,  $b = R + r_1$ , следовательно, радиус  $r_1$  режущей кромки не влияет на ширину  $b$  формируемого треугольника Рело, что позволяет многократно перетачивать режущие лезвия 5 или периодически заменять их. Благодаря этому формирование треугольника Рело методом огибания круглой режущей кромкой имеет существенные преимущества по сравнению с методом обката инструментом с криволинейными режущими кромками [1], от формы которых зависит образуемый профиль. Оснащение инструмента сменными круглыми пластинками позволяет технически просто восстанавливать его режущую способность и точность, что невозможно при применении метода обката [1].

При  $r_1 = 0$  метод огибания трансформируется в метод следа, который реализуется цельным или сборным инструментом с прямолинейными режущими кромками.

Достоверность результатов аналитического исследования и моделирования процесса формообразования подтверждена экспериментально на зубодолбежном станке модели 5122 при обработке изделий с профилем в виде треугольника Рело инструментами с круглыми (рис. 3) и прямолинейными режущими кромками. Доказана возможность формирования треугольника Рело методами огибания и следа на зубодолбежном станке обкатного типа без его модернизации.



а)

б)

Рис. 3. Рабочая зона зубодолбежного станка (а)  
и образцы обработанных изделий (б)

Экспериментально установлено, что новые методы формообразования и созданные инструменты обеспечивают шероховатость обработанных поверхностей с профилем в виде треугольника Рело  $Ra = 1,01-1,15$  мкм и 8–9 качества точности геометрических параметров обработанных деталей, что удовлетворяет требованиям к точности деталей профильных моментопередающих соединений.

#### Литература

1. Понкратов, П. А. Разработка эффективного долбежного инструмента для обработки сложных криволинейных поверхностей : автореф. дис. ... канд. техн. наук / П. А. Понкратов. – Курск, 2013. – 20 с.
2. Способ обработки некруглых деталей с треугольным профилем равной ширины : Евраз. пат. 031383 / Данилов А. А., Данилов В. А. – Опубл. 28.12.2018.

УДК 621.923

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ СЕЧЕНИЯ НАПРАВЛЯЮЩИХ НА ИХ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

Д. А. Роговенко, М. И. Михайлов, К. С. Теплова

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

Режущий инструмент в процессе резания испытывает динамические нагрузки, которые снижают надежность процесса обработки. В среднем 40–50 % металлорежущего инструмента, изготовляемого в соответствии с существующими стандартами, теряется непроизводительно из-за поломок твердого сплава. Из них 10–15 % инструмента идет в брак уже при его изготовлении из-за образования трещин в твердом сплаве и 30–35 % выходит из строя в результате поломок изделий из твердого сплава при эксплуатации. Для обеспечения работоспособности процесса резания необходимо выбирать такие конструктивные варианты направляющих станков, которые обладают наименьшими деформациями.

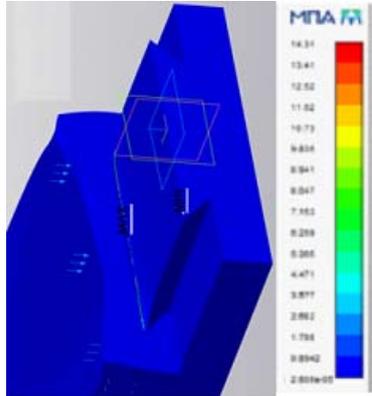
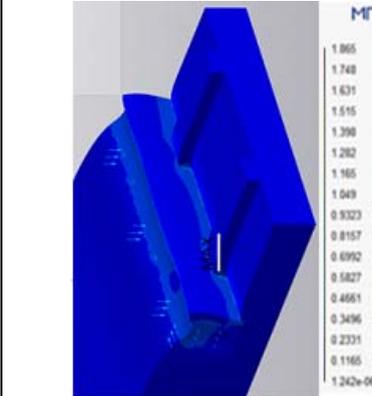
Расчеты выполнялись с использованием пакета APM FEM в программе КОМПАС-3D. Прикладываемые силы составляли: 1000 Н по вертикальной плоскости на стол модели, распределенной по площадке  $20 \times 200$  мм, сбоку на стол действует сила величиной 100 Н, распределенная по площадке  $20 \times 45$  мм.

Для решения задачи использовался метод конечных элементов, при этом модель разделялась на множество тетраэдров, сторона которого не превышает определенной величины (в работе использовались следующие значения: максимальная величина 5 мм, минимальная – 1 мм). Положение вершин элементов определялась, решением уравнений равновесия из условия равенства работ.

Поскольку все модели имеют разную форму направляющих, то количество элементов во всех моделях разное, что и определяет большую разницу в числе уравнений, требуемых для решения. Так, направляющая типа «ласточкин хвост» имеет наибольшее число уравнений: 1700 тыс., в то время как призматические направляющие описывало 370 тыс. уравнений. Результаты расчетов представлены в таблице.

### Результаты расчетов напряжений

Напряжения в направлении осей	Формы сечения направляющих	
	типа «ласточкин хвост»	призматические
$Ox$		
$Oy$		
$Oz$		

Напряжения в направлении осей	Формы сечения направляющих	
	типа «ласточкин хвост»	призматические
Суммарные		

Анализ результатов расчетов позволяет заключить, что переход от формы направляющих типа «ласточкин хвост» к призматическим направляющим приводит к изменению характера распределения напряжений в ползуне и к увеличению суммарных значений в 3,3 раза.

#### Литература

1. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / А. М. Русецкий [и др.] ; под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск : Беларус. навука, 2012. – 239 с.
2. Пашинин, А. В. Анализ причин появления вибраций при фрезеровании фланцев корпусов / А. В. Пашинин, Е. А. Чернышев // Науч. вестн. ДГМА. – 2012. – № 2 (3Е). – С. 250–253.

УДК 621.9

## ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩЕГО ПРОЕКТА «СОЗДАНИЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ»

Ю. Н. Кульбаков

*ОАО «СтанкоГомель», Республика Беларусь*

Машиностроительный комплекс наших стран всегда испытывал, испытывает и будет испытывать острую потребность в современном металлорежущем оборудовании, так как станок – это начало цепочки, связывающей идею разработчика и готовое изделие в каталогах супермаркетов и маркет-плейсов.

На данный момент на территории постсоветского пространства единственным предприятием, обладающим компетенциями и сохранившим интеллектуальное наследие СССР в части разработки, проектирования, постановки на производство современного металлообрабатывающего оборудования с ЧПУ, является Открытое акционерное общество «СтанкоГомель», которое с 1885 г. успешно вносит свой вклад в развитие отечественной станкостроительной отрасли.

За последние годы в рамках Государственной научно-технической программы «Инновационное машиностроение и машиностроительные технологии» подпрограммы «Машиностроительное оборудование» наши специалисты разработали станки для

обработки деталей сложной пространственной конфигурации, удовлетворяющие концепции Industry 4.0 и Done-in-one, а также с характеристиками, соответствующими уровню ведущих мировых производителей, а порой и превосходящими их.

Мы провели огромную работу по продвижению нашей продукции на рынках Республики Беларусь и Российской Федерации.

Участие в специализированных выставках как регионального, так и федерального уровня привело к тому, что к нашему продукту был проявлен активный интерес не только машиностроительных предприятий Республики Беларусь, но и Российской Федерации. Оборудование, поставленное нашим потребителям, показало высокий технический и интеллектуальный уровень развития нашей организации. Результатом этой работы явилась взаимная заинтересованность двух стран в разработке и реализации импортозамещающего проекта «Создание производства многофункционального обрабатывающего оборудования».

Объектами производства по данному инвестиционному проекту являются:

- вертикальные обрабатывающие центры как 3-координатные, так и 5-координатные;
- горизонтальные обрабатывающие центры с перспективой 5-координатной обработки;
- 5-координатные токарно-фрезерные обрабатывающие центры;
- консольно-фрезерные станки с ЧПУ;
- металлорежущие станки консольно-фрезерные без числового управления.

В рамках данного инвестиционного проекта на сумму 2372 млн российских рублей планируется к приобретению 61 единица оборудования, обеспечивающая высокое качество выпускаемой продукции для проведения масштабной модернизации и технического перевооружения на нашем предприятии.

Глобально перед нами стоит задача переформатировать старые неэффективные мощности и создать современное высокотехнологичное гибкое производство для выпуска современного, точного и надежного станка.

Если говорить о концепции проекта, то следует отметить, что он подразделяется на три основные части, первая из которых производство так называемых базовых корпусных деталей, составляющих основу любого современного металлообрабатывающего оборудования. Для реализации этой цели планируется приобретение двух уникальных многофункциональных станков портального типа с функцией 5-осевой обработки и двух палетных горизонтально-расточных обрабатывающих центров с дополнительными сменными угловыми головками. Это позволит получить из заготовки готовое изделие за одну установку. Так, все манипуляции производятся на одном станке без необходимости перемещения заготовки по технологическому маршруту, что соответствует современной тенденции развития машиностроения «Done-in-one» – сделано в одном.

Вышеуказанные станки будут использоваться для обработки деталей сложной пространственной конфигурации габаритными размерами до  $2,5 \times 4 \times 2,1$  м (Ш  $\times$  Д  $\times$  В) и массой до 20 т. После обработки готовое изделие будет иметь точностные характеристики до 0,02–0,03 мм на длину 4 м.

Для наглядности приведем следующий пример. Толщина человеческого волоса в среднем равна 60 мкм. В результате выполнения обработки на этом уникальном оборудовании точность ориентировочно составляет 30 мкм на длину 4 м, что в 2 раза меньше толщины волоса среднестатистического человека.

Следующей основной частью проекта является группа оборудования, результат работы которого состоит в производстве шпиндельных устройств. На ОАО «Станко-Гомель» говорят, что шпиндель – это сердце любого станка, элемента, определяющего жизнеспособность, долговечность, надежность, точностные параметры оборудования.

Также претерпит изменение в производстве многофункционального обрабатывающего оборудования такое направление, как термическое.

Планируется к приобретению линия химико-термической обработки, которая позволяет обеспечить автоматизацию процесса термообработки, минимизацию человеческого фактора, а также повысить качество термообрабатываемых изделий и получить детали с узкозаданной дискретной точностью.

Немаловажным, а порой и весьма существенным фактором выбора любого продукта, а тем более современного обрабатывающего центра с ЧПУ, является его внешний вид. Для решения данной задачи мы планируем внедрение современной окрасочной камеры для обеспечения эффектного дизайна с использованием современных технологий окраски, а также красок, разработанных как белорусскими, так и российскими производителями.

Выход на проектную мощность запланирован в 2028 г. Результатом реализации проекта будут показатели, приведенные в таблице.

Наименование продукции	Количество выпускаемого оборудования в 2022 г., шт.	Количество планируемого к выпуску оборудования при выходе на проектную мощность в 2028 г., шт.
Станки с ЧПУ (обрабатывающие центра)	21	144
Металлорежущие консольно-фрезерные станки без числового управления	54	75
<i>Итого</i>	75	219

На данном этапе реализации инвестиционного проекта проводится покупка новой техники и реконструкция производственных площадей.

Необходимо подчеркнуть, что реализация импортозамещающего проекта невозможна без наличия соответствующих информационных технологий и измерительной техники. Уже сегодня мы задумываемся о внедрении современных CAD-, САМ-систем с переходом их в программные продукты для облегчения составления конструкторской и технологической документации, а также управления производством.

В заключение следует отметить, что реализация инвестиционного проекта «Создание производства многофункционального обрабатывающего оборудования» позволит предприятию и в целом всему станкостроительному кластеру Республика Беларусь – Российская Федерация двигаться вперед, находясь в русле современных тенденций металлообработки.

УДК 621.9

## **ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РАМКАХ ПРОВОДИМОГО ПЕРЕВООРУЖЕНИЯ**

**А. А. Сотский**

*ОАО «СтанкоГомель», Республика Беларусь*

Изучив опыт мирового станкостроения, можно выделить следующие аспекты. Существует несколько устойчивых трендов, которым вынуждены подчиняться все мировые производители станочного оборудования. Речь идет прежде всего о повышении производительности при обеспечении высокого качества изготовления изделия (деталей, узлов). Это заставляет станкостроителей активнее внедрять автоматизацию для минимизации влияния «человеческого фактора» в процессе производства.

Кроме того, общемировой тенденцией является переход от производства узкоспециализированных устройств и агрегатов к выпуску универсальных обрабатывающих центров, имеющих различное количество управляемых координат, а также основных и вспомогательных приспособлений и механизмов для реализации необходимых параметров обработки.

В настоящее время наша станкостроительная отрасль отстала от требований современного станкостроения, где требуются качественные показатели, которые на порядок выше принятых в 80-е и 90-е гг. прошлого века.

Цель нашего проекта – реорганизовать устаревшие неэффективные мощности и создать современное высокотехнологичное гибкое производство для выпуска высокоточных и надежных станков с ЧПУ, разработанных специалистами ОАО «СтанкоГомель» по государственной научно-технической программе «Инновационное машиностроение и машиностроительные технологии» подпрограммы «Машиностроительное оборудование».

На данный момент конструкторские разработки ОАО «СтанкоГомель» на порядок превосходят технологические возможности современного производства, которое модернизировалось еще в 90-х гг. прошлого века. С целью обеспечения высокого качества выпускаемой продукции для инвестиционного проекта разработана технология, включающая современное оборудование и позволяющая провести на ОАО «СтанкоГомель» масштабную модернизацию и техническое перевооружение, ведь выпуск современного, точного и надежного станка возможен лишь тогда, когда каждая из его составляющих произведена в соответствии с четкими требованиями конструкторской документации и технологического процесса.

Проводимое ОАО «СтанкоГомель» техническое перевооружение в рамках реализации импортозамещающего проекта «Создание производства многофункционального обрабатывающего оборудования» подразумевает под собой не только и не столько внедрение современного оборудования, а в первую очередь использование современных перспективных инновационных технологий, позволяющих получить максимальный экономический эффект и обеспечить выпуск современного многофункционального оборудования с требованиями не только удовлетворяющими, но и превосходящими мировые аналоги.

При разработке технологий, исходя из конструктивных особенностей изготавливаемого оборудования, специалистами ОАО «СтанкоГомель» учитывались следующие основные перспективные направления:

– обработка высокоточных базовых корпусных деталей, составляющих основу геометрии станка;

- обработка особо точных и ответственных деталей, входящих в основные узлы (шпиндельный узел, коробку скоростей, узел стола и др.);
- термическая обработка, позволяющая свести к минимуму и отсутствию поводов деталей;
- применение современных контрольно-измерительных машин и приборов, а также систем активного контроля нового поколения;
- применение стандов и приспособлений для комплектации и сборки основных узлов, их предварительного контроля вне станка, а также для испытания;
- внедрение и адаптация современных CAD-, CAM-систем для разработки конструкторской документации, технологических процессов и управляющих программ для станков с ЧПУ, а также программ управления производством.

Определив основные направления технического перевооружения на ОАО «СтанкоГомель» с целью реорганизовать устаревшие и неэффективные мощности, была выработана и решена в планировочно-расчетных проектах задача, которая позволит в рамках реализации разработанных технологий учесть направление движения технологических потоков и расстановку приобретаемого и уже существующего технологического оборудования таким образом, чтобы обработка деталей выполнялась от стадии заготовки до получения готового изделия.

Это касается всех переделов, начиная от лезвийной обработки, вертикальных, горизонтальных, токарных обрабатывающих центров и заканчивая станками с ЧПУ шлифовальной группы.

Приобретаемое современное оборудование и разработанная технология рассчитана на обработку с применением прогрессивного режущего инструмента на повышенных режимах резания, что позволит существенно сократить время изготовления деталей.

Разрабатывая технологические процессы изготовления деталей, сборочных узлов были учтены направления потоков и расстановка оборудования в МП № 1 таким образом, чтобы полная обработка выполнялась как на одном виде оборудования за одну-две установки, так и возможность выстраивания в гибкую производственную линию из нескольких и более станков при изготовлении особо сложных изделий (более трех установок).

В процессе выполнения проекта перевооружения ОАО «СтанкоГомель» стало очевидно, что одним из ключевых параметров производственной эффективности является технологический уровень приобретаемого оборудования, позволяющего осуществить вышепоставленные задачи основных направлений.

После проведения маркетинговых исследований и определения необходимого оборудования с требуемыми техническими характеристиками, для качественного изготовления деталей, соответствующих конструкторской документации, были заключены договора на его поставку и дальнейший запуск в эксплуатацию с выполнением инжиниринга по обработке деталей и проведения обучения инженерного и ремонтного персонала правилам эксплуатации и обслуживания по согласованной программе на нашем предприятии.

Для реализации инвестиционного проекта планируется приобрести 61 единицу оборудования.

Так, в качестве примера для обработки деталей, входящих в основные узлы (корпусные детали и детали типа тел вращения) планируется приобретение токарных обрабатывающих центров, горизонтальных и вертикальных обрабатывающих центров собственного производства, а также шлифовальных станков с ЧПУ с точными характеристиками менее 1 микрона.

Подытожив все вышеперечисленные аспекты, можно отметить следующее, что внедрение современных инновационных технологий в совокупности с необходимым оборудованием позволит:

- снизить трудоемкость механической обработки деталей и повысить производительность;
- применить современные САМ-системы (модуль автоматизированной системы, предназначенный для подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ) в сочетании с виртуальным станком (набор трехмерных моделей всех рабочих органов реального станка, позволяющий обеспечить полную идентичность процесса обработки с процессом обработки на реальном оборудовании) и исключить человеческий фактор;
- исключить зависимость от высококвалифицированного персонала и использовать многостаночное обслуживание;
- сократить количество необходимой станочной оснастки, режущего и вспомогательного инструмента;
- рационально использовать производственные площади;
- использовать принципиально иные подходы в проектировании и изготовлении, что приведет к более рациональным, простым решениям для создания новых объектов производства;
- свести в один технологический цикл механическую обработку от стадии установки заготовки до получения готового изделия, что соответствует современной тенденции развития машиностроения;
- полностью реализовать тенденцию развития мирового машиностроения Индустрия 3.0.

УДК 621.9

## **ОПЫТ ОРГАНИЗАЦИИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ АДАПТАЦИИ НОВЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ ИНСТРУМЕНТА НА РЫНКЕ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**С. В. Сулавко**

*ОАО «СтанкоГомель», Республика Беларусь*

Экономическое состояние во многом зависит от уровня развития производства промышленности, в том числе и станкостроения. Деятельность производственных предприятий очень многообразна и оказывает существенное влияние на различные стороны жизни общества. Производственная система предприятия охватывает все стадии его производственной и сбытовой деятельности, начиная от закупки сырья, комплектующих, инструмента и заканчивая отгрузкой готовой продукции заказчикам. Таким образом, от эффективности производственной системы и поступления на производство передового инструмента зависит качество выпускаемой продукции и в конечном итоге – конкурентоспособность предприятия.

Главной задачей обеспечения предприятия является своевременное и бесперебойное снабжение производства необходимыми материалами и видами режущего, вспомогательного инструмента, технологической оснасткой, соответствующей комплектности и качеству.

До середины 2021 г. плотное сотрудничество с европейскими поставщиками позволяло обеспечить функционирование предприятия с достаточной степенью уверенности в рамках ранее существующих экономических условий. В результате сложившихся обстоятельств с конца 2021 г. были разорваны ранее существующие и ус-

пешно функционировавшие кооперативные связи с поставщиками импортного инструмента. В связи с такими изменениями нашему предприятию пришлось в сжатые сроки искать новых производителей и формировать новые логистические цепочки с целью недопущения перебоев в снабжении и остановки производства.

В большинстве случаев высококачественный и производительный инструмент был представлен на рынке европейскими компаниями, которые в новых условиях либо частично поставляют, либо совсем прекратили его поставки. Таким образом, главной целью предприятия ОАО «СтанкоГомель» в сложившихся условиях стала переориентация с европейских поставщиков инструмента на инструмент производства Республики Беларусь, а также российских и азиатских производителей. Тем самым был решен вопрос по замене европейских поставщиков на данный инструмент. Так, ОАО «СтанкоГомель» длительное время использовало осевой инструмент ведущих фирм Германии, Японии, Чехии. В настоящее время его использование стало невозможным в связи с длительными сроками изготовления и поставки, в результате чего был найден инструмент, не уступающий, а порой и превосходящий по сочетанию цены и качества, а также с оперативной поставкой.

Затронув тему цен, в качестве примера хотелось бы привести расточные системы, которые в среднем ранее мы приобретали по цене примерно от 300 до 500 у. е. В настоящее время у найденных новых поставщиков с учетом существующих логистических цепочек стоимость этого инструмента на 40 % дешевле.

Необходимо отметить, что наибольшей возможностью для приобщения к современным техническим достижениям обладают такие профессиональные встречи, как выставки. Данные мероприятия проходят регулярно и собирают огромное количество сведущих людей из промышленной и смежных сфер деятельности, что позволяет найти и новых поставщиков, и новые логистические цепочки. После посещения вышеуказанных мероприятий и анализа маркетинговых исследований оперативно и в сжатые сроки нашим предприятием была проведена большая работа по подбору, закупке и испытанию режущего и вспомогательного инструмента российского, азиатского и отечественного производства.

Следует отметить, что в сложившейся ситуации ключевую роль в обеспечении инструментом сыграли длительные и долгосрочные контракты с белорусскими производителями, такими как:

- ОАО «ОИЗ», г. Орша, входящий в холдинг «МТЗ-Холдинг»;
- ОАО «БЗСП», г. Барановичи;
- Филиал ОАО «Гомсельмаш «Гомельский завод специнструмента и технологической оснастки»;
- ОАО «БелТАПАЗ», г. Гродно;
- ЗАО «Гомельский механический завод»;
- ОАО «Оршанский станкостроительный завод «Красный борец»;
- учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»;
- ОАО «Гомельское ПО «Кристалл – Управляющая компания холдинга КРИСТАЛЛ-ХОЛДИНГ».

Так, совместно с учреждением образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины» был разработан успешный проект по изготовлению специальных шлифовальных кругов для механической обработки изготавливаемых деталей.

Необходимо подчеркнуть, что прежде всего с точки зрения обеспечения инструментальной национальной безопасности, нами была проведена работа по изготовлению инструмента для импортозамещения белорусским предприятиям, в частности, с ОАО «ОИЗ» (г. Орша, входящий в холдинг «МТЗ-Холдинг»). Наши партнеры успешно реализовали возможность изготовления в рамках импортозамещения твердосплавных концевых, шпоночных фрез и сверл. На сегодняшний день проводятся испытания данной продукции на нашем предприятии. Также в результате длительных отношений решен вопрос по поставкам вспомогательных инструментов ОАО «ОИЗ».

ОАО «СтанкоГомель» вместе с ГНУ «Институт технологии металлов НАН Беларуси» проводит совместную работу по апробации пластин твердосплавных в реальных условиях на производстве. Нашими специалистами отмечено, что вышеуказанные твердосплавные пластины обеспечивают отличные характеристики обрабатываемых поверхностей, а достигнутая точность соответствует техническим требованиям чертежей деталей.

Также особое внимание следует обратить на то, что в рамках реализации импортозамещающего проекта «Создание производства многофункционального обрабатывающего оборудования» были поставлены сложные задачи по обеспечению инструментом и оснасткой, так как значительно увеличиваются объемы производства, а оборудование, внедряемое на ОАО «СтанкоГомель», подразумевает использование только современного и лучшего инструмента.

Найденные решения позволят решить поставленную задачу безусловной реализации вышеизложенного импортозамещающего инвестиционного проекта.

УДК 621.9

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОСИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**Е. В. Хазеев, Д. Л. Стасенко**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

В настоящее время объемные гидроприводы стали одним из основных средств автоматизации рабочих процессов в промышленности, что объясняется рядом существенных их преимуществ перед другими видами приводов. К числу таких преимуществ относятся: возможность широкого бесступенчатого регулирования скоростей на ходу машины; способность широкой автоматизации рабочих процессов и малая инерционность рабочих органов. В свою очередь объемные гидроприводы имеют существенный недостаток, который заключается в высоких потерях при одновременном использовании в гидроприводе двух и более потребителей, на которых возникают разные величины внешней нагрузки, что приводит к снижению коэффициента полезного действия работы системы. Следовательно, повышение коэффициента полезного действия данного вида приводов является перспективным направлением в современном машиностроении [1].

Целью данной работы является повышение коэффициента полезного действия гидросистемы линии по производству бетонных изделий «ВКПБ-20».

Линия по производству бетонных изделий «ВКПБ-20» предназначена для формования бортовых камней, тротуарных плит, а также других бетонных изделий в пределах формовочного поля 1000 × 650 мм [2].

Гидросистема линии (рис. 1) предназначена для перемещения рабочих механизмов линии и включает в себя следующие элементы: станцию гидропривода, распределительную и контрольно-регулирующую гидроаппаратуру, гидроцилиндр привода пуансона Ц6, гидроцилиндры привода матрицы Ц4, Ц5, гидроцилиндр перемещения дозатора основной смеси Ц1, гидроцилиндр затвора бункера основной смеси Ц2, гидроцилиндр механизма подачи поддонов Ц3, трубопроводы и рукава высокого давления [2].

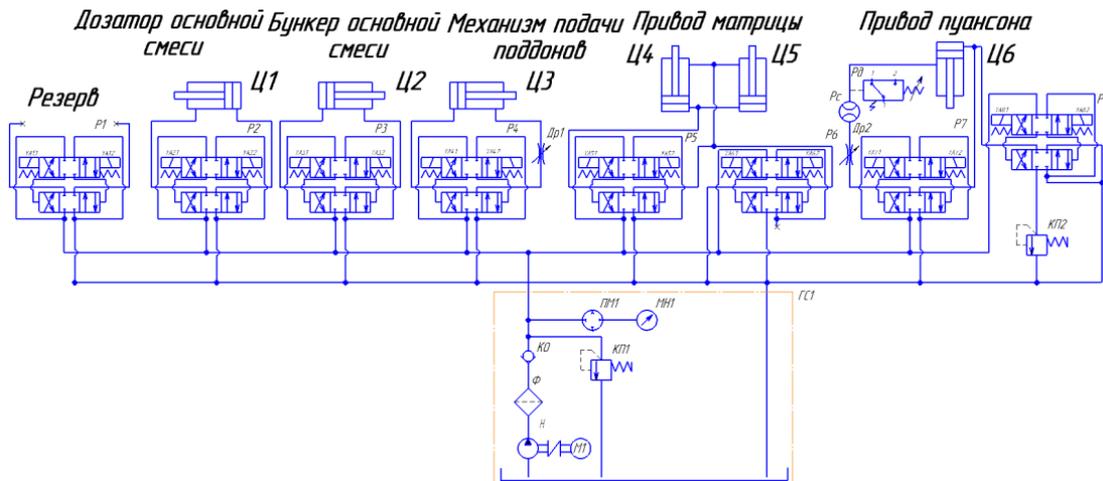


Рис. 1. Принципиальная схема гидросистемы линии для изготовления бетонных изделий «ВКПБ-20»

Предлагаемый способ повышения коэффициента полезного действия гидросистемы осуществляется за счет замены дроссельного регулирования на гидросистему с объемной адаптацией к нагрузке (рис. 2).

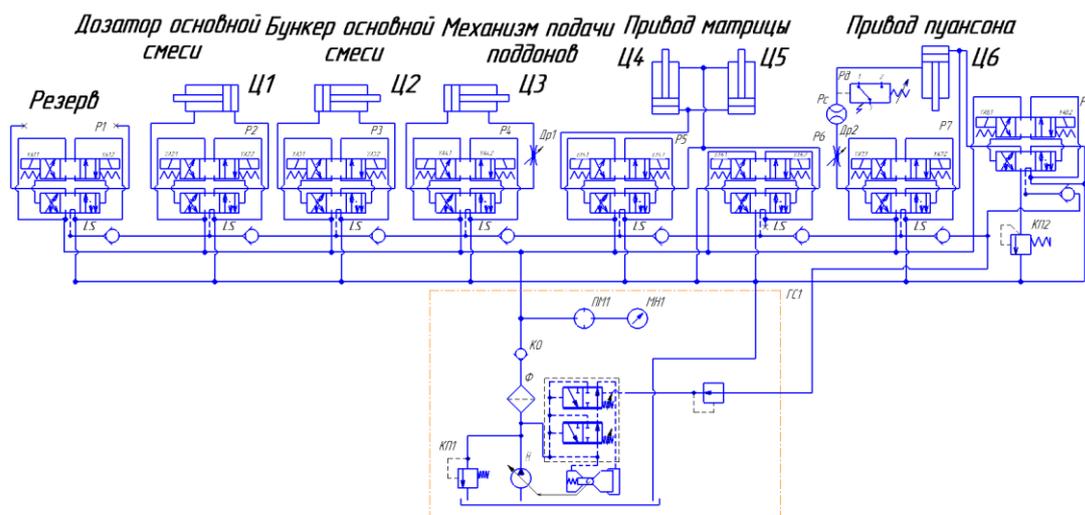


Рис. 2. Принципиальная схема гидросистемы линии с объемной адаптацией к нагрузке



УДК 699.81:678.073

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ  
ПРОЦЕССА ПРИ ВНУТРЕННЕМ ФРЕЗЕРОВАНИИ РЕЗЬБ**Д. В. Никитенко<sup>1</sup>, М. И. Михайлов<sup>2</sup><sup>1</sup>Гомельское конструкторское бюро «Луч», Республика Беларусь<sup>2</sup>Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь

Процесс внутреннего фрезерования резьбовых поверхностей отличается большой неравномерностью [1]. Теоретические исследования динамических процессов при внутреннем фрезеровании резьб приведены в работах [2, 3]. В работе [2] выполнено математическое моделирование параметров срезаемого слоя, сил резания, продольных и крутильных колебаний заготовки. Работа [3] посвящена анализу условий безвибрационного фрезерования резьбы при внутреннем касании инструмента с заготовкой.

Обзор конструкций вихревых головок показал, что вихревая головка, как правило, связана с электродвигателем с помощью клиноременной передачи. Кинематическая связь посредством клиноременной передачи вносит особенности в динамику вращательного движения резцовой головки, так как ременная передача обладает значительно меньшей жесткостью по сравнению с различными зубчатыми передачами и проскальзывает относительно шкивов, что не учтено в работах [2] и [3]. Кроме того, часто применяемые в качестве привода асинхронные электродвигатели не обладают жесткой характеристикой. Все это вносит динамические погрешности при формообразовании резьбовых поверхностей внутренним фрезерованием и требует дальнейшего изучения.

Для изучения динамики вращательного движения резцовой головки при внутреннем фрезеровании резьб создана экспериментальная установка, представленная на рис. 1.



Рис. 1. Экспериментальная установка для изучения динамики вращательного движения при внутреннем фрезеровании резьб: 1 – вихревая головка; 2 – энкодер; 3 – заготовка; 4 – цифровой осциллограф; 5 – источник постоянного тока; 6 – компьютер

Экспериментальная установка собрана на базе токарного станка 16К20. На станке установлена вихревая головка 1 и заготовка 3. Для преобразования угла поворота вихревой головки в электрические импульсы служит энкодер 2, связанный с вихревой головкой посредством компенсирующей муфты. За один оборот вихревой головки на выходе энкодера образуется 600 прямоугольных импульсов, которые записываются на компьютер 6 через цифровой осциллограф 4. Энкодер питается от источника постоянного тока 5. Измеряя время  $\Delta$  между двумя соседними прямоугольными импульсами энкодера, можно определить замедляется или ускоряется вихревая головка в данный момент времени  $t$ . Время между двумя соседними прямоугольными импульсами энкодера соответствует повороту вихревой головки на угол  $1/600^\circ$ .

На рис. 2 представлены результаты эксперимента при следующих параметрах обработки: шаг резьбы – 6 мм; угол профиля резьбы –  $60^\circ$ ; наружный диаметр резьбы – 31,84 мм; внутренний диаметр резьбы – 25,58 мм; угол наклона вихревой головки –  $3^\circ 48'$ ; межосевое расстояние (эксцентриситет) – 6,16 мм; мощность электродвигателя – 1,1 кВт; материал заготовки – Сталь 40; материал режущей части резца – Т15К6. При этом среднее по выборке число оборотов вихревой головки на холостом ходу, замеренное с помощью энкодера, составило 1670,6 об/мин при среднеквадратичном отклонении 3,2.

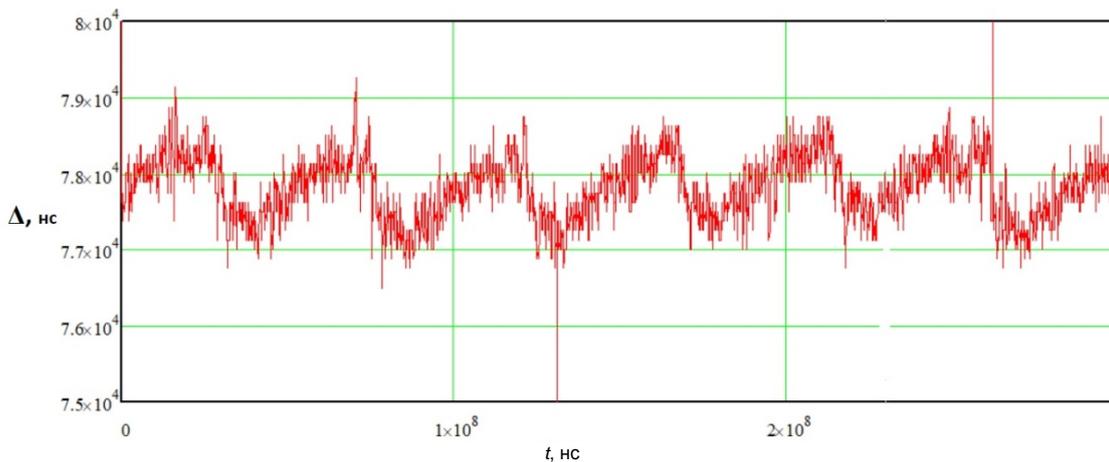


Рис. 2. Результаты эксперимента

Пересчет величины  $\Delta$  в обороты в минуту позволил определить среднюю частоту вращения вихревой головки, которая в условиях эксперимента составила 1642,6 об/мин при среднеквадратичном отклонении 19,9. Следовательно, по правилу трех сигм, частота вращения в процессе обработки изменялась от 1583 об/мин до 1702 об/мин, что значительно превосходит изменения частоты вращения на холостом ходу. Из рис. 2 видно, что изменение скорости вращения вихревой головки имеет периодический характер, при этом один цикл соответствует одному обороту головки. Ниспадающая ветвь кривой на рис. 2 соответствует процессу резания, который характеризуется плавным изменением силы резания от нуля до максимального значения, и, как следствие, замедлением скорости вращения вихревой головки вследствие упругости ременной передачи, проскальзывания ремня и нежесткой характеристики электродвигателя. Возрастающая ветвь кривой соответствует холостому ходу и характеризуется отсутствием сил резания и, как следствие, возрастанием скорости вращения вихревой головки.

Проведенный эксперимент показал, что изменение скорости вращения вихревой головки в процессе резания носит существенный характер и должно учитываться при анализе динамики процесса внутреннего фрезерования резьб.

#### Л и т е р а т у р а

1. Виксман, Е. С. Скоростное нарезание резьб и червяков (вихревое нарезание вращающимися резцами) / Е. С. Виксман. – М. : Машиностроение, 1966. – 91 с.
2. Ямникова, О. А. Особенности процесса нарезания резьб охватывающими фрезами / О. А. Ямникова // Технология машиностроения. – 2002. – № 6. – С. 13–17.
3. Кузнецов, В. П. Устойчивость технологической системы при нарезании резьб вихревыми головками / В. П. Кузнецов, О. А. Ямникова // СТИН. – 2004. – № 2. – С. 12–14.

УДК 621.91

### **ОПЫТ КОНСТРУИРОВАНИЯ УНИВЕРСАЛЬНО-СБОРНЫХ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ**

**М. И. Михайлов, А. А. Карпов, З. Я. Шабакаева**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

В современном машиностроении и станкостроении при обработке различных деталей широко используется сборный металлорежущий инструмент с механическим креплением сменных многогранных пластин различной формы, размера и типа. Сборный инструмент может представлять собой блочную конструкцию, универсальную, переналаживаемую или регулируемую. В качестве режущих элементов может применяться как сама сменная многогранная пластинка с механическим креплением к корпусу инструмента, так и различные конструкции блок-вставок.

Сборный инструмент может быть предназначен для обработки отдельных поверхностей детали или для обработки нескольких поверхностей одновременно за один проход на различных металлорежущих станках с ЧПУ.

Цель разработки – повышение производительности обработки осесимметричных деталей.

Предлагаемая конструкция универсально-сборного металлорежущего инструмента предназначена для обработки деталей типа втулки, крышки, диски, фланцы с параллельной обработкой поверхностей (внутренних, торцовых, наружных цилиндрических или угловых) на станке с ЧПУ. Конструкция универсально-сборного инструмента состоит: из хвостовика с конусом 7 : 24; набора втулок, дисков, в пазах которых закрепляются блок-вставки с режущими элементами, в качестве которых используются сменные многогранные пластины. Конструкция блок-вставки (рис. 1) позволяет использовать различные сменные многогранные пластины по типоразмеру и по форме (квадратные, круглые, трехгранные, пятигранные, шестигранные, ромбические), которые можно устанавливать под различным углом в плане в зависимости от формы обрабатываемых поверхностей детали. Также конструкция блок-вставки позволяет производить регулировку ее положения и может закрепляться как в осевом, так и в радиальном направлении. Количество режущих элементов, устанавливаемых в корпусную часть сборного инструмента, определяется в зависимости от точности обработки и размеров каждой отдельной поверхности детали. Блок-вставки закрепляются в корпусе универсально-сборного инструмента с помощью винтов, а отдельные корпусные части сборного инструмента соединяются между собой

с помощью штифтов и винтов. Конструкция универсально-сборного инструмента позволяет использовать одинаковые корпусные части для создания инструмента для обработки деталей разной конфигурации и размеров.

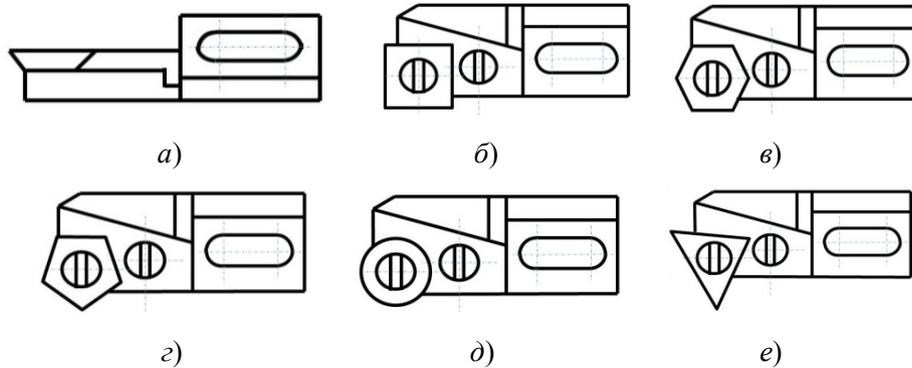


Рис. 1. Конструкция блок-вставки с различными сменными многогранными пластинами

На рис. 2 показаны примеры схематичного изображения конструкций универсально-сборного металлорежущего инструмента для одновременной обработки нескольких поверхностей типовых деталей машиностроения и станкостроения.

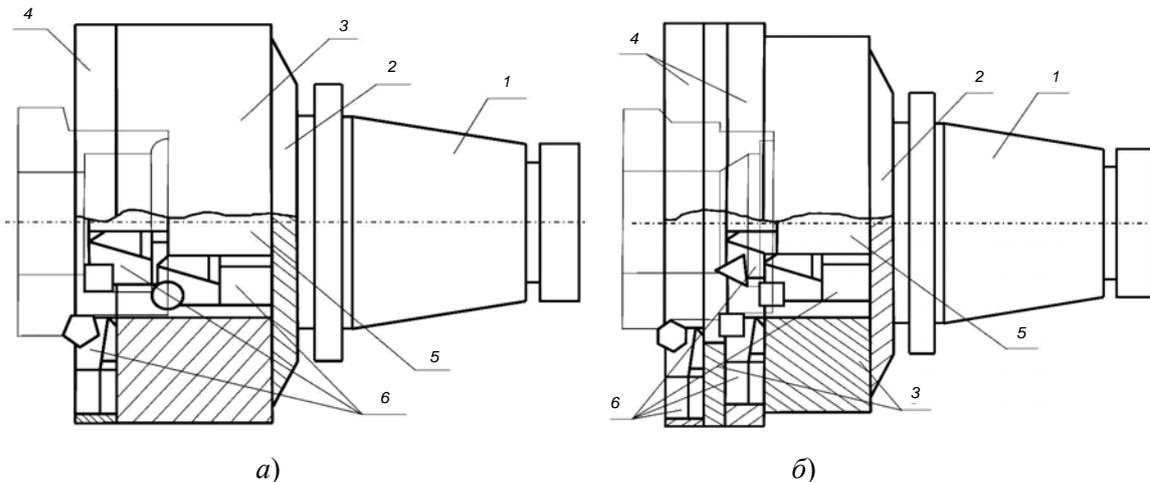


Рис. 2. Примеры конструкций универсально-сборного инструмента:  
 а – для обработки детали типа «штулка»; б – для обработки детали типа «фланец»: 1 – хвостовик; 2 – диск вспомогательный; 3 – диск промежуточный; 4 – диск с блок-вставками; 5 – штулка с блок-вставками; 6 – блок-вставки с различными сменными многогранными пластинами

#### Литература

1. Михайлов, М. И. Сборный металлорежущий механизированный инструмент: Ресурсосберегающие модели и конструкции / М. И. Михайлов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 339 с.

**ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОГО  
ИНДУКТОРА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ ИНСТРУМЕНТА  
ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ  
ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

**А. П. Лепший**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

В настоящее время в машиностроении широкое применение находят комбинированные методы финишной обработки деталей машин. Одним из перспективных методов формирования поверхностного слоя является магнитно-абразивная обработка (МАО). Метод отличается относительной простотой в осуществлении, экологической чистотой, обеспечивает высокое качество микрогеометрии поверхности, формирование остаточных сжимающих напряжений, повышение износостойкости, контактной прочности и сопротивление коррозии.

Технология МАО плоскостей предполагает применение в основном одной из двух принципиальных схем реализации процесса: обработка ферроабразивным порошком, сформированным магнитным полем в инструменте на торцовой поверхности или периферии магнитного (электромагнитного) индуктора. В многочисленных устройствах первого варианта магнитный поток, выходящий из торцовой поверхности индуктора, проходит через обрабатываемую поверхность детали. Такие схемы применяются при обработке материалов, обладающих различными магнитными свойствами, т. е. как диамагнитными, так и ферромагнитными. Устройства, основанные на данном принципе, имеют достаточно широкую конструкторскую проработку и всесторонние теоретические и экспериментальные исследования.

Схемы МАО плоских поверхностей по второму варианту основаны на формировании режущего инструмента на периферии (цилиндрической поверхности) магнитного индуктора, т. е. рабочий магнитный поток проходит по касательной к обрабатываемой поверхности. Формирование такого инструмента имеет свои особенности и закономерности. Оценка его эффективности и перспектив практического применения требует проведения соответствующих исследований.

На эффективность процесса МАО, в том числе плоских поверхностей, оказывают влияние много факторов и параметров, которые можно разделить на конструктивные и технологические.

К конструктивным относятся такие факторы, как геометрия и конфигурация полюсных наконечников и рабочих зазоров магнитного индуктора, величина рабочего зазора, наличие и форма концентраторов магнитного поля, конструкция магнитной системы и другие, которые определяют картину магнитного поля в рабочей области инструмента, а также количество участвующих в процессе резания зерен магнитно-абразивного порошка, ориентацию порошка относительно обрабатываемой поверхности, условия удержания порошка в рабочем зазоре и т. п.

Из технологических факторов наибольшее влияние на процесс МАО оказывает величина магнитной индукции, скорость вращения магнитного индуктора, материал магнитно-абразивного порошка и его зернистость, скорость подачи заготовки, наличие и вид СОЖ, физико-механические свойства обрабатываемой детали и состояние исходной поверхности, характер вспомогательных движений и ряд других факторов.

В настоящее время достаточно широко изучены вопросы влияния технологических факторов на процесс МАО с целью выработки практических рекомендаций по применению данного способа финишной обработки.

Возможности повышения эффективности МАО за счет изменения конструктивных факторов, не связанных с повышением энергоемкости оборудования и усложнением устройств, в настоящее время изучены недостаточно.

Целью работы является исследование влияния конструктивных параметров магнитного индуктора на распределение магнитного поля в рабочем пространстве инструмента при МАО плоских поверхностей.

В основу исследований положена разработка обобщенной модели магнитного индуктора (рис. 1, а), реализующего схему кинематического резания, основной особенностью которой является уменьшающийся рабочий зазор между индуктором и обрабатываемой поверхностью при ее обработке, а также комплексный анализ различных форм полюсных наконечников, образующих варианты разной конфигурации межполюсного пространства при обеспечении сил магнитного поля, достаточных для производительной обработки.

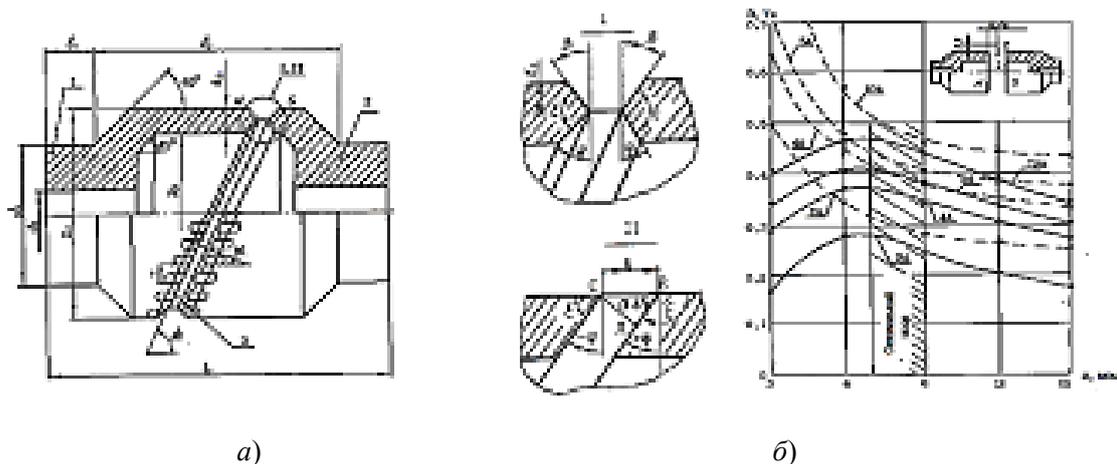


Рис. 1. Обобщенная модель магнитного индуктора (а) и распределение магнитной индукции  $B$  в межполюсном зазоре (б) при  $\alpha = 90^\circ$ :  
 - - - основной поток  $B_0$ ; — — — поток выпучивания  $B_B$

Наличие угла наклона торцовых поверхностей полюсов к оси его вращения ( $\alpha$ ) вносит определенные изменения в картину распределения магнитного поля как в межполюсном, так и в рабочем зазорах, что влияет на производительность обработки.

Картину магнитного поля в индукторе определяют два потока – основной ( $B_0$ ), действующий в межполюсном зазоре, и поток выпучивания ( $B_B$ ), определяющий характер формирования абразивного инструмента и действующий в рабочем зазоре (рис. 1, б).

Исследования магнитной индукции (рис. 2) проводились при  $\alpha = 90^\circ, 75^\circ, 60^\circ, 45^\circ$  для потока выпучивания на расстоянии 2,5 мм от периферии рабочей поверхности полюса (точка 2) и для основного потока в середине межполюсного зазора (точка 1).

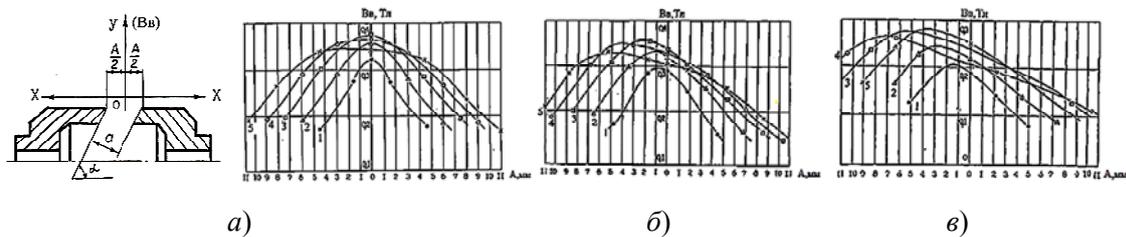


Рис. 2. Распределение магнитного потока выпучивания в рабочем зазоре при наклоне полюсов:

$a - \alpha = 75^\circ$ ;  $b - \alpha = 60^\circ$ ;  $v - \alpha = 45^\circ$  и межполюсном зазоре:

1 –  $a = 3$  мм; 2 –  $a = 6$  мм; 3 –  $a = 9$  мм; 4 –  $a = 12$  мм; 5 –  $a = 15$  мм

По результатам выполненной работы установлена взаимосвязь конструктивных параметров магнитного индуктора и их влияние на распределение магнитного поля в рабочем пространстве инструмента; выявлены особенности формирования инструмента с наклонным межполюсным пространством индуктора; установлена величина оптимального межполюсного зазора ( $a = 7-9$  мм) при соотношении магнитных потоков  $B_0/B_B \approx 1,0$ .

#### Литература

1. Финишная обработка поверхностей при производстве деталей / С. А. Клименко [и др.] ; под общ. ред. С. А. Чижика и М. Л. Хейфеца. – Минск : Беларус. навука, 2017. – 376 с.
2. Хомич, Н. С. Магнитно-абразивная обработка изделий : монография / Н. С. Хомич. – Минск : БНТУ, 2006. – 218 с.

УДК 547.458.61

### ВЛИЯНИЕ МЕТОДА ПОДАЧИ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ НА КОНТАКТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДАВЛЕНИЯ СВЕРЛЕНИЯ

Э. Ш. Джемилов, Э. Л. Бекиров, Р. М. Джемалидинов

*Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова,  
г. Симферополь, Российская Федерация*

Большинство деталей машин, подвергающихся механической обработке, имеют отверстия. Наиболее распространенным методом получения отверстий в сплошном материале является сверление. Этот процесс широко изучен и не представляет особых трудностей. Сверление глухих отверстий в металлических сплавах часто проводят с подачей смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) в зону обработки. Постоянное удаление стружки и высокие удельные давления в зоне обработки не гарантируют попадания смазочных материалов на границу раздела «инструмент – заготовка». Поэтому очень важно производить подбор смазочных материалов с учетом характеристик протекания процесса, физико-химических свойств обрабатываемого материала, современных требований к экологизации производства и способов их подачи непосредственно в зону стружкообразования.

На данном этапе развития производства наблюдается тенденция к снижению негативных факторов при изготовлении деталей машин, связанных с применением СОЖ на основе продуктов нефтепереработки. Одним из направлений является пол-

ный отказ от использования технологических сред и переход к сухому резанию [1]. Однако этот метод не пригоден для ряда операций и зачастую требует либо применения специального инструмента [2, 3], либо перехода на высокоскоростную обработку [4, 5].

Второй способ снижения негативного воздействия – использование технологии минимального количества смазки [6]. Несмотря на все преимущества, эта технология не подходит для процессов, происходящих в условиях закрытого резания, например, сверления глухих отверстий. Постоянное удаление стружки затрудняет попадание небольших доз смазочных материалов в зону обработки.

Третий способ снижения негативного воздействия – использование экологически чистых СОЖ. В основе таких составов обычно лежат жирные кислоты растительного и животного происхождения.

Для качественной оценки процесса сверления необходимо учитывать не только выходные параметры, такие как шероховатость поверхности и стойкость инструмента, но и динамически изменяющиеся показатели контактных давлений и температур непосредственно в зоне резания.

Для более эффективной оценки влияния СОЖ в работе резания было исследовано влияние подачи технологической среды в зону обработки в процессе сверления глухих отверстий в заготовках из конструкционной стали 40Х и подшипниковой стали ШХ15. В качестве самих технологических были рассмотрены применяемые в производстве для обработки данных типов материалы: эмульсия на водной основе Аквафриз-6 и масляная СОЖ MobilMet423, в качестве экологически безопасного аналога было применено рапсовое масло.

В качестве инструмента применялись спиральные сверла фирмы Yamawa (материал Р6М5К5 диаметром 12 мм, средней серии, с каналами для подачи СОЖ) и сплошные.

Подача СОЖ осуществлялась методом полива и по внутренним каналам инструмента. Рабочее давление при подаче СОЖ по внутренним каналам составляло 5 атмосфер.

Режимы обработки выбирались по усредненным производственным значениям для двух видов материалов: скорость резания – 18,84 м/мин, подача – 0,1 мм/об.

Полученные результаты показали, что применение Аквафриз-6 оказывает наибольшее влияние на снижение контактных давлений, что объясняется меньшей вязкостью и, как следствие, большей проникающей способностью непосредственно в зону резания.

Наибольший эффект на снижение температуры резания оказывает также Аквафриз-6 как за счет полива, так и за счет подачи внутренних фекалий инструмента, объясняется это за счет того, что эндотермические характеристики водной основы эмульсии приводят к более эффективному охлаждению зоны резания.

Говоря про исходные характеристики процесса, можно отметить, что подача технологических сред через каналы инструмента способствовала более чем двукратному снижению высоты микронеровностей после сверления.

Незначительное влияние маслянистых технологических сред можно объяснить их низкими скоростями теплоотвода в закрытом процессе резания при сверлении глухих отверстий. Температура дымления таких масел начинается от 250 °С. Таким образом, в зоне стружкообразования они полностью сгорают, оставляя графит как один из продуктов деструкции масел.

Обобщая полученные данные, можно отметить, что при сверлении глухих отверстий в металлических сплавах основной характеристикой, влияющей на качество обработки, является температура в зоне резания, а применение масляных технологических сред требует корректировки режимов резания таким образом, чтобы температура в зоне контакта была ниже значений их температуры дымления.

#### Л и т е р а т у р а

1. Москвичев, А. А. Тенденции экологически безвредного «сухого резания» металлов / А. А. Москвичев, А. Р. Кварталов // Тр. НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2015. – № 3 (110). – С. 110–116.
2. Дубров, Д. Ю. Снижение интенсивности размерного износа режущих инструментов // Вестн. еврз. науки. – 2018. – № 10 (5). – С. 73–80.
3. Хаустова, О. Ю. Повышение работоспособности твердосплавного инструмента и качества обработанных поверхностей при сухом резании различных конструкционных материалов : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / О. Ю. Хаустова. – М., 2004. – 181 с.
4. Оленин, Л. Д. О некоторых особенностях фрезерования в режиме высокоскоростной обработки (BCO) / Л. Д. Оленин, Д. И. Очкин // Изв. МГТУ. – 2014. – № 3 (21). – С. 25–31.
5. Surface roughness prediction model in high-speed dry milling CFRP considering carbon fiber distribution / Y. Song [et al.] // Composites Part B: Engineering. – 2022. – N 245. – Article 110230.
6. Ваниев, Э. Р. Повышение стойкости лезвийных инструментов с износостойким покрытием путем направленного действия СОТС в начальный период обработки / Э. Р. Ваниев, В. В. Скакун, Р. М. Джемалядинов // Уч. зап. Крым. инженер.-пед. ун-та. – 2019. – № 1 (63). – С. 245–251.

УДК 621.923

### **ОПЫТ ФОРМИРОВАНИЯ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТОРЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ**

**Р. С. Сейдалиев, Р. Д. Курманов, А. А. Фукала, Э. Ш. Джемилов**

*Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова,  
г. Симферополь, Российская Федерация*

В настоящее время фрезерование стало одним из наиболее часто используемых методов получения поверхностей резанием, так как позволяет получить деталь практически любой конфигурации. Основными достоинствами этого метода обработки являются: высокая производительность, точность и качество обработанных поверхностей.

Несмотря на широкое распространение и практическое применение, теоретические исследования данного метода обработки до сих пор остаются актуальными, так как они позволяют вскрывать и максимально использовать заложенный в этом методе потенциал. Вопрос о повышении качества обработанной поверхности фрезерной обработки в непростых современных экономических условиях стоит особенно остро.

Постоянное повышение требований к точности и качеству обработанной поверхности, а также к ресурсу изготовленной детали приводят к необходимости проведения исследований по всем параметрам качества поверхности и разработке новых технологических рекомендаций, позволяющих получить оптимальный комплекс свойств обработанной поверхности на данном этапе изготовления детали [8].

Не только шероховатость, но и наклеп обработанной поверхности влияют на ресурс изготовленной детали, а остаточные напряжения, возникшие в результате обработки, могут значительно исказить форму окончательно изготовленной детали, в критическом случае приводя к неисправимому браку.

Все это указывает на необходимость исследования параметров качества обработанной поверхности фрезерованием, разработки новых методов исследования и решения известных задач новыми методами.

Различают горизонтальные, наклонные и вертикальные плоские поверхности. К ним предъявляются требования по прямолинейности, плоскостности, точности расположения по отношению к базовой поверхности и шероховатости. Плоскости, как правило, обрабатывают торцовыми или цилиндрическими фрезами. Заготовки устанавливают в тисках или специальных приспособлениях. На подлежащую обработке поверхность наклеивают смазанную маслом полоску бумаги. Затем ручными подачами сближают заготовку с фрезой на расстояние 5–6 мм. Включают шпиндель станка и плавно сближают заготовку с вращающейся фрезой до их легкого касания (срыв бумажки) и затем при включенном шпинделе ручной продольной подачей выводят заготовку из-под фрезы. По лимбу устанавливают необходимую глубину резания и выполняют врезание фрезы на ручной подаче, затем включают механическую продольную подачу и обрабатывают заготовку на всю длину.

При торцовом фрезеровании вертикальных (торцовых) плоских поверхностей нужно стремиться к тому, чтобы отлетающая стружка падала вниз. Для этого центр фрезы устанавливают на 2–3 мм ниже середины обрабатываемой поверхности. При фрезеровании торцовой поверхности трехсторонней фрезой ее диаметр нужно выбирать с таким расчетом, чтобы расстояние от режущей кромки фрезы, расположенной на цилиндрической поверхности, до поверхности кольца на оправке было больше ширины обрабатываемой поверхности, но и не слишком выходило за нижнюю линию поверхности заготовки [1, 3, 7, 10].

Плоскостность обработанной поверхности определяют по равномерности просвета между ребром лекальной линейки и этой поверхностью. Перпендикулярность обработанной поверхности относительно смежных с ней плоских поверхностей проверяют угольником по величине просвета между полкой угольника и обработанной плоской поверхностью. Углы обработанных деталей контролируют угольниками, угловыми мерами, коническими калибрами, угломерами и др.

При фрезеровании плоских поверхностей возможны следующие дефекты:

- дробленая поверхность (причины: не закреплены консоль и серьга; плохо отрегулированы салазки; фреза установлена далеко от опор);
- волнистая поверхность (причина: большая подача);
- подрез обработанной поверхности из-за остановки стола при вращающейся фрезе (поэтому останавливать перемещение стола не следует до полного выхода заготовки из-под фрезы).

Как известно из опыта, при любой механической обработке (в том числе и при фрезеровании) получить абсолютно точные размеры невозможно, поэтому конструктивные размеры детали назначаются с допусками, т. е. с некоторыми отклонениями от номинального размера. Величина этих отклонений для взаимно сопряженных деталей должна, с одной стороны, обеспечивать возможность взаимозаменяемости при сборке и ремонте, а с другой – не должна выходить за пределы неточности (погрешностей) изготовления [11].

Основными причинами, влияющими на степень точности (погрешность) фрезерной обработки, являются: неточность фрезерного станка и его износ; неточность приспособления; вибрации; неточность изготовления, установки и износ фрезы; недостаточная жесткость станка, приспособления, фрезы с оправкой и обрабатываемой заготовки, рассматриваемых как одна система; температурные деформации обрабатываемой заготовки; неточности измерения [2, 4–6, 9].

## Литература

1. Алехин, А. Н. Исследование процесса торцового фрезерования инструментами с СМП с целью повышения производительности и точности обработки : автореф. дис. ... / А. Н. Алехин. – Самара, 2009. – 20 с.
2. Амосов, И. С. Осциллографическое исследование вибраций при резании металлов / И. С. Амосов // Точность механической обработки и пути ее повышения : сб. науч. тр. – М. ; Л. : Машгиз, 1951. – С. 414–485.
3. Баграмов, Л. Г. Расчет режимов резания при фрезеровании. Методические рекомендации / Л. Г. Баграмов, А. М. Колокатов. – МГАУ, 2000. – Ч. 1. Торцовое фрезерование. – 59 с.
4. Вульф, А. М. Резание металлов / А. М. Вульф. – М. ; Л. : Машгиз, 1963. – 425 с.
5. Жарков, И. Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И. Г. Жарков. – Л. : Машиностроение, 1986. – 184 с.
6. Каширин, А. И. Исследование вибраций при резании металла / А. И. Каширин. – М. ; Л. : АН СССР, 1944. – 133 с.
7. Махнев, В. М. Исследование процесса резания сталей твердосплавными фрезами : дис. ... канд. техн. наук / В. М. Махнев. – Иркутск, 1961.
8. Осипов, В. В. Нормирование точности в машиностроении / В. В. Осипов ; под ред. Ю. М. Соломенцева. – М., 2001. – 335 с.
9. Пашинин, А. В. Анализ причин появления вибраций при фрезеровании фланцев корпусов / А. В. Пашинин, Е. А. Чернышев // Науч. Вестн. ДГМА. – 2012. – № 2 (3Е). – С. 250–253.
10. Пименов, Д. Ю. Расчет величины смещения фрезы относительно заготовки, при которой обеспечивается постоянное число зубьев фрезы, участвующих в работе / Д. Ю. Пименов, В. И. Гузеев, А. А. Кошин // Справочник. Инженер. журнал. – 2011. – № 4. – С. 6–10.
11. Розенберг, А. М. Резание металлов и инструмент / А. М. Розенберг. – М. : Машиностроение, 1964. – 226 с.

## СЕКЦИЯ 2 СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.9.011:517.962.1

### ВЛИЯНИЕ СОЛЕГИРУЮЩИХ ИОНОВ ЦЕРИЯ, ЛАНТАНА И ГАДОЛИНИЯ НА СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИТТРИЙ-АЛЮМИНИЕВОГО ГРАНАТА

Е. Н. Подденежный, Н. Е. Дробышевская, А. А. Бойко,  
О. В. Давыдова, А. Д. Лёвкина

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

В настоящее время широкое применение получили светодиодные источники света, основой которых является кристаллическая структура GaN на сапфире, генерирующая синее излучение и покрытая желтым люминофором на основе иттрий-алюминиевого граната, излучение которой для глаза воспринимается как белый свет [1, 2]. Преимущества тонкодисперсных порошков в конструкциях мощных светодиодов и светопреобразователей связаны с меньшим рассеянием света на малых частицах люминофора, уменьшением расхода люминофора и его однородным распределением в компаунде. Важным также является возможность введения солегирующих добавок в состав люминофора, позволяющих произвести сдвиг излучения в красную область спектра для смещения видимого излучения в сторону более «теплого», комфортного для глаза света. С целью изучения влияния солегирующих ионов церия, лантана или гадолия на сдвиг спектрально-люминесцентных характеристик иттрий-алюминиевого граната в «красную сторону спектра» разработана методика термохимического синтеза сложного иттрий-алюминиевого соединения, содержащего два солегирующих иона.

Спектрально-люминесцентные исследования порошков проводились при возбуждении люминесценции светом ртутной лампы с фильтром при комнатной температуре.

Методика синтеза солегированного YAG для получения порошка химического состава  $Y_{2,95}Ce_{0,05}Al_5O_{12}:La/Gd$  следующая: реагенты в соотношении 23,0 г  $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ , ЧДА, ТУ 6-09-4676-83; 38,0 г  $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ , ЧДА, ГОСТ 3757-75; 1,0 г  $Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ , ЧДА, ТУ 6-09-4081-84; 0,5 г  $La(NO_3)_3 \cdot 6H_2O/Gd(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ ; 21,6 г карбамида  $CH_4N_2O$ , ЧДА, ГОСТ 6691-77 растворяли в 30,0 мл дистиллированной воды и добавляли в смесь 2,4 г гексаметилентетрамина (ГМТА)  $(CH_2)_6N_4$  (ЧДА, содержание аминов 99,9 %, код CAS # 100-97-0). Размешивали смесь до полного растворения сухой массы. Полученный раствор ставили в термостойкой выпарительной чаше в термошкаф с температурой 80–100 °С и при помешивании концентрировали раствор до состояния вязкого геля (1,5–2 часа). Далее закрывали чашу алюминиевой фольгой, проделывали отверстия для выхода газов. Помещали эту чашу в другую, большего диаметра. Ставили в чаши в муфельную печь, нагретую до температуры 350 °С. В печи под воздействием быстрого нагрева проходит бурная химическая реакция окисления-восстановления, инициируемая ГМТА, температура повышается до 1200–1300 °С. Далее прекурсор выдерживали в печи при

температуре 650 °С в течение 1 часа. За время выдержки удаляется остаточная вода, выгорают органические остатки. После остывания печи извлекали чашу, в которой формируется пенообразный продукт желтого цвета.

Размол спекшегося продукта проводили в планетарной шаровой мельнице Пульверизетте 5 (фирма Fritsch, Германия) в стаканах из диоксида циркония с шарами из диоксида циркония диаметром 10 мм (30 штук). Размол проводили в течение 10 минут.

Данные рентгенофлуоресцентного анализа подтверждают, что в процессе термохимической реакции формируется основная кристаллическая фаза – иттрий-алюминиевый гранат  $Y_3Al_5O_{12}$  пространственной группы  $Ia3d$  кубической сингонии (карточка PDF № 33–40 по каталогу JCPDS–1996). Незначительный пик на 34,2138° принадлежит примесной фазе иттрий-алюминиевого перовскита –  $YAlO_3$  (карточка PDF № 16–219 по каталогу JCPDS–1996), – которая, по-видимому, формируется при недостатке ионов кислорода в закрытом фольгой сосуде.

Средний размер области когерентного рассеяния, рассчитанный по формуле Шеррера [3] дает значение  $D \approx 45$  нм для  $YAG:Ce$ , полученного при обработке на воздухе при  $T = 650$  °С в течение 1 часа. В связи с малыми концентрациями солигирующихся ионов церия, лантана или гадолиния примеси в кристаллической структуре иттрий-алюминиевого граната не идентифицируются.

Порошки на основе  $YAG:Ce^{3+}$ , синтезированные методом горения, люминесцируют в диапазоне 470–720 нм при возбуждении синим светом ( $\lambda = 455$  нм).

Легирование иттрий-алюминиевого граната ионами церия с добавлением гадолиния (Ce – 4,0 ат. %, Gd – 0,5 ат. %) позволяет сдвинуть спектр люминесценции  $YAG:Ce$  в красную область (ширина полосы 500–750 нм) и тем самым получить излучение «теплого» белого света. Введение примеси La (0,25 – 0,5 ат. %) в виде азотнокислой соли приводит к появлению дополнительных пиков на длине волны 610 нм при  $\lambda_{\text{возб}} = 455$  нм. Таким образом, при частичном прохождении синего излучения светодиода визуально создается ощущение «теплого» белого света за счет смешения цветов синего, желтого и красного. С другой стороны, ионы гадолиния в подрешетке оксида иттрия дают широкий спектр излучения со сдвигом в красную область, который при наложении на спектр иона  $Ce^{3+}$  (с максимумом на длине волны 550 нм) дает суммарную картину расширенного спектра в диапазоне 500–750 нм с центром на 575 нм, что также в сумме с синим создает визуальное ощущение «теплого» белого света. Дополнительная обработка (прокаливание) порошка  $YAG:Ce, Gd$  в среде аргона при  $T = 1100$  °С в течение 1 часа приводит к росту интенсивности люминесценции, скорее всего, за счет увеличения доли ионов  $Ce^{3+}$  в решетке  $YAG$  и уменьшения концентрации оптически не активных ионов  $Ce^{4+}$ , а также к дополнительному сдвигу кривой интенсивности люминесценции в красную область спектра.

На основы вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

– разработан термохимический метод получения сложно-легированных порошков иттрий-алюминиевого граната с использованием в азотно-кислых солей церия, лантана и гадолиния;

– изучены спектрально-люминесцентные характеристики наноструктурированного люминофора на основе иттрий-алюминиевого граната, полученного при прокаливании прекурсора при температуре 1100 °С и концентрации легирующей примеси церия  $Ce^{3+}$  на уровне 4,0 ат. %;

– легирование иттрий-алюминиевого граната ионами церия с добавлением гадолиния ( $Gd^{3+}$  0,5 ат. %) позволяет сдвинуть спектр люминесценции  $YAG:Ce$  в красную область (ширина полосы 500–750 нм), тем самым получить излучение «теплого» белого света;

– введение примеси La (0,25–0,5 ат. %) в виде азотнокислой соли приводит к появлению дополнительных пиков на длине волны 610 нм при  $\lambda_{\text{возб}} = 455$  нм. Таким образом, при частичном прохождении синего излучения светодиода визуально создается ощущение «теплого» белого света за счет смешения цветов синего, желтого и красного.

#### Литература

1. Kitai, A. Luminescent Materials and Applications / A. Kitai. – John Wiley & Sons, 2008. – 374 p.
2. White LEDs / W. J. Park [et al.] // Sol. St. Phen. – 2007. – Vol. 124–126. – P. 379–382.
3. Рентгеновский анализ микронапряжений и размера областей когерентного рассеяния в поликристаллических материалах / А. К. Штольц [и др.]. – Екатеринбург, 2005. – Режим доступа: <http://window.edu.ru/resource/729/28729/files/ustu336.pdf>. – Дата доступа: 07.08.20.

УДК 621.865:004.896

### **ФОРМИРОВАНИЕ БИОРАЗЛАГАЕМЫХ КОМПОЗИТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛЬНОКОСТРЫ**

**Е. Н. Подденежный, Н. Е. Дробышевская, А. А. Бойко, О. В. Давыдова**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

В последние годы актуальным стало создание композиционных материалов, полностью разрушаемых в природных условиях, на основе термопластичных биоразлагаемых полимеров, например, полимолочной кислоты (полилактида), поликапролактона, полигидроксиалконоата [1–3]. Такие материалы, используемые для создания для упаковки, одноразовой посуды, разлагаемые в природной среде, промышленном или домашнем компосте, должны соответствовать принятым стандартам (ISO 16929:2013, ГОСТ Р 57226–2016) и полностью дезинтегрироваться в течение 3–6 месяцев. Наполнение биоразлагаемых полимеров лигноцеллюлозными материалами природного происхождения, такими как древесная мука, солома, лузга злаковых культур и льнокостра, удешевляет полимерные композиции и позволяет значительно уменьшить длительность биоразложения и экологическую нагрузку на природу после их использования.

Таким образом, поиск дешевых природных наполнителей, решение проблем повышения биоразлагаемости подобных композитов с использованием новых биоразлагаемых матриц, а также задачи совмещения частиц наполнителя с полимерной основой остаются актуальными.

Для получения экспериментальных образцов биоразлагаемых материалов на основе полилактида, наполненного льнокострой, были использованы следующие исходные материалы:

- полилактид марки INGEO™ Вуорopolymer 3001D в виде гранулированного материала;
- поливиниловый спирт ПВС 16/1 (ГОСТ 10779–78);
- микротальк марки МТ-К, (ГОСТ 19284–79);
- полиэтиленгликоль ПЭГ-4000;
- льнокостра высушенная (Кормянский льнозавод, Гомельская область, Республика Беларусь).

Используемая в качестве биоразлагаемого наполнителя костра льняная – это одеревеневшие части льняных стеблей. Костра имеет следующий химический

состав, мас. %: целлюлоза – 45–58; лигнин – 21–29; гемицеллюлоза – 9,1; экстрактивные вещества – 9,9; пектиновые вещества – 2,0; зола – 1,5; вода – 8 [4]. Для использования льнокостры в качестве наполнителя необходимо предварительно очистить ее от загрязнений, размолоть и рассеять до порошкообразного состояния.

В качестве биоразлагаемой основы был взят порошкообразный и гранулированный полилактид (полимолочная кислота) марки INGEO™ Вуорopolymer 3001D.

Полиэтиленгликоль ПЭГ-4000 – неионный полимер, хорошо растворим в воде. Используется в качестве лубриканта и биндера. Химическая формула имеет следующий вид:  $\text{HO}-(\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O})_n-\text{H}$ .

Поливиниловый спирт (ПВС) относится к синтетическим биоразлагаемым веществам, хорошо набухает в воде, что создает дополнительный источник водопоглощения композиционного материала.

Тальк (химическая формула  $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ) – минерал из класса силикатов, кристаллическое вещество, которое используется в композиции в качестве зародышеобразователя для иницирования формирования кристаллической фазы полилактида при получении композитов из расплава, что способствует повышению термостойкости.

Дисковые образцы композитов формировали с помощью гидравлического пресса в форме цилиндрической таблетки под давлением 10 МПа, после чего помещали в нагреваемое приспособление между двумя фторопластовыми пластинами.

Ленточные экспериментальные образцы композитов вытягивали на одношнековом экструдере HAAKE RHEOCORD 90 (Германия), диаметр шнека – 20 мм, длина шнека – 500 мм, скорость вращения – 50 об/мин. Способность материалов к биоразложению под действием природных факторов охарактеризована водопоглощением за 24 часа (по ГОСТ 4650–80) и способностью к биоразложению в компосте в соответствии с ГОСТ Р 57226–2016 (ISO 16929:2013).

Для изучения структурных свойств и морфологии композиционных материалов использованы методы оптической и сканирующей электронной микроскопии (микроскоп TESCAN, Чехия).

Состав исходной шихты варьируют таким образом, мас. %: гранулированный полилактид – 40–50; костра льна – 30–40; поливиниловый спирт – 5–10; полиэтиленгликоль ПЭГ-4000 – 8–12; микротальк – 2–3.

Очищенную и подсушенную в течение 2–3 часа при 105 °С костру измельчают в центробежной мельнице 20–30 минут, затем рассеивают на вибросите до состояния порошка с размерами частиц менее 0,5 мм.

Экспериментальные образцы композиционных материалов изготавливаются следующим образом: гранулы полилактида смешивают с порошком поливинилового спирта ПВС 16/1 и полиэтиленгликоля ПЭГ-4000 в скоростном турбосмесителе, затем в смесь добавляют тальк и засыпают порошок костры и выдерживают смесь при вращении 20 минут, затем поднимают температуру в смесителе до 125 °С и обрабатывают шихту в течение 30 минут для удаления избыточной влаги и повышения однородности, после этого отключают нагрев и охлаждают шихту до комнатной температуры. Для получения дисковых образцов используют порошкообразный полилактид, а полученную смесь прессуют в форме цилиндрической таблетки под давлением 10 МПа на гидравлическом прессе и помещают в нагреваемое приспособление между двумя фторопластовыми пластинами. Нагрев производят под давлением при температуре 175 °С в течение 15 минут.

Для получения ленточных образцов смесь загружают в экструдер со щелевой головкой для расплавления и гомогенизации при температуре 160–175 °С и закручивают на каландр.

По сравнению с чистым полилактидом полученные образцы обладают более высоким водопоглощением и повышенной способностью к биоразложению за счет наличия органического наполнителя и более рыхлой структуры.

Таким образом, создана термопластичная композиция с уменьшенным периодом биоразложения с использованием лигноцеллюлозного наполнителя – костры льняной, изделия из которой разрушаются полностью после эксплуатации под действием влаги и микрофлоры компоста или почвы за 5–6 месяцев.

#### Литература

1. Ahmed, J. Polylactides—Chemistry, Properties and Green Packaging Technology : a review / J. Ahmed, S. K. Varshney // International Journal of Food Properties. – Vol. 14. – P. 37–58.
2. Rogovina, S. Z. Biodegradable Polymer Composites Based on Synthetic and Natural Polymers of Various Classes / S. Z. Rogovina // Polymer Science, Series C. – 2016. – Vol. 58, N 1. – P. 62–73.
3. Polyblends and composites of poly (lactic acid) (PLA) : a review on the state of the art / Krishna Prasad Rajan [et al.] // Journal of Polymer Science and Engineering. – 2018. – Vol. 1. – P. 1–14.
4. Карпунин, И. И. Химия льна и перспективные технологии его углубленной переработки / И. И. Карпунин, И. А. Голуб, П. П. Казакевич. – Минск : Беларус. навука, 2013. – 96 с.

УДК 546:54.057

## РЕВЕРСИВНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И 3D-ПЕЧАТЬ КАК ИНСТРУМЕНТЫ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ОГНЕУПОРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

И. Н. Прусенко

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

Реверсивное проектирование – это эффективный способ построения компьютерных 3D-моделей на основе физических объектов. Для этого, как правило, применяется комплекс технологий, состоящий из оборудования и программных решений. Совместное использование 3D-сканирования и аддитивных технологий представляет собой современный инструмент для прототипирования объектов в различных отраслях промышленности.

В лаборатории «Аддитивные технологии» Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого используется высокоточное оборудование для 3D-печати по технологиям FDM и SLA. При этом изготовление цифровых моделей для аддитивного синтеза изделий производится посредством сканирования по световозвратной технологии структурированного света (точность – 7 и 40 мкм) либо с использованием систем автоматизированного проектирования.

Используя опыт работы лаборатории «Аддитивные технологии», совместно с ООО «Рефралит» произвели разработку технологической оснастки для изготовления горелки печной установки патентирования. Для этого была разработана CAD-модель существующей горелки, после чего проведена оптимизация ее конструкции и произведена 3D-печать.

Для построения 3D-модели использовался оптический сканер Shining EinScan Pro 2x Plus. Данное устройство позволяет зафиксировать форму физических объектов с использованием структурированных линий светового излучения и получить макси-

мально точную цифровую модель объекта с учетом всех размерностей. Полученная таким образом цифровая модель представляет собой совокупность координат точек в пространстве, которые объединены в поверхность отдельными полигонами (рис. 1).

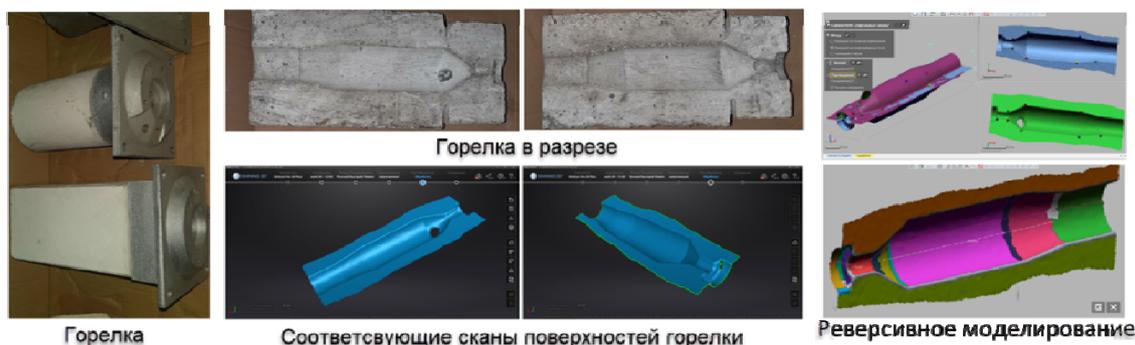


Рис. 1. Проектирование 3D-модели горелки

Следующим шагом исследования было построение твердотельного объекта полученной полигональной 3D-модели с использованием средства обратного моделирования. Полигональные модели в программах точного САПР представляют собой совокупность поверхностей, являющимися не только граничными условиями твердотельного моделирования, но и вспомогательными компонентами для формирования плоскостей, осей, точек и других базовых элементов проектирования. Это позволяет сформировать вектор пересечения пронизывающей плоскости через отсканированную поверхность, т. е. сформировать контур ее сечения для построения полноразмерного эскиза и создания отдельного элемента твердотельной модели. Такой подход позволил произвести построение всего «тела» 3D-модели.

Для контроля геометрической и размерной точности полученной 3D-модели был произведен анализ отклонений параметров сканируемого изделия от эталонного «тела». Для этого 3D-модель сопоставляли с 3D-сканом, что позволило определить отклонения по всей поверхности и размеров в сечениях, погрешности формы и расположения.

После получения твердотельной модели с максимально приближенными значениями размерной и геометрической точности к исходному телу горелки была проведена оптимизация ее конструкции. Для этого произведен CAE-анализ имитации продувки горелки газом. При этом параметры CAE-моделирования движения газообразного топлива максимально были приближены к реальным. В результате проведенного исследования были предложены конструктивные изменения геометрической формы горелки с целью некоторого снижения турбулентности и завихрения потока газа.

Печать оптимизированной модели производили на 3D-принтере Ultimaker S5. Для этого в слайсере Ultimaker Cura была разработана программа изготовления элемента технологической оснастки в виде gcode. Для построения использовали сопло диаметром 0,4 мм, что соответствовало ширине экструзии полимера. Выбор толщины слоев осуществлялся согласно обеспечению достаточной площади сцепления потоков расплавленного полимера, формированию поверхности изделия с возможно меньшей шероховатостью и минимальными затратами времени.

Для улучшения адгезии сатинированного стекла платформы 3D-принтера и печатаемого изделия высота первого слоя составляла 0,28 мм (70 % от диаметра сопла), а для последующих слоев – 0,2 мм (50 % от диаметра сопла). Данные параметры печати обеспечивают достаточную площадь сцепления накладываемых друг на друга слоев с формированием вертикальной стенки изделия близкой к плоской гладкой.

Учитывая, что 3D-принтер Ultimaker S5 имеет жесткий каркас, экструзионную систему Bowden, качественную картезианскую кинематическую схему перемещения печатающей головки и платформы, печать производили на максимальной скорости допустимой для полимера Tough PLA в рамках отдельных слоев и периметров.

Были также произведены настройки 3D-печати, связанные с температурными характеристиками материала и рабочей среды построения, корректировкой показателей потока жидкого полимера, охлаждения и формирования внутренних и внешних периметров, вспомогательных стенок, режима перемещения печатающей головки и др. При этом параметры построения подбирались с учетом обеспечения высокой точности соответствия геометрическим и размерным характеристикам 3D-модели и снижения времени 3D-печати элемента технологической оснастки (рис. 2).

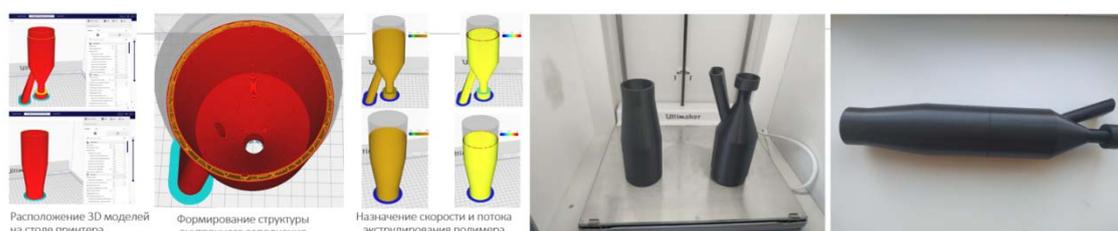


Рис. 2. Подготовка оптимизированного изделия к 3D-печати и реальный образец

По полученному элементу технологической оснастки был изготовлен реальный образец горелки из огнеупорных материалов, обеспечивающий заданные параметры работы печной установки патентирования. В данный момент разработанная горелка эффективно используется в производственных условиях ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК».

Таким образом, проведенный комплекс работ позволяет заключить, что использование современных средств цифровых технологий в производстве изделий (в том числе огнеупорных элементов) позволяет не только снизить расход материальных ресурсов и время изготовления, но и улучшить их технологические показатели.

#### Л и т е р а т у р а

1. Additive Manufacturing Technologies. Third Edition / I. Gibson [et al.]. – Cham, Switzerland : Springer, 2021. – 685 p.

УДК 546:54.057

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРОВ

М. И. Михайлов, О. А. Лапко

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

В настоящее время ввиду неуклонного роста доли полимерных композиционных материалов в технике научно-технический прогресс отрасли в значительной степени определяется как расширением производства новых видов [1], так и совершенствованием существующих полимерных материалов [2]. Одно из ведущих мест в машиностроении занимают полимерные материалы. При этом особая роль отво-

дится эпоксидным смолам. Благодаря оптимальному сочетанию физико-химических и теплофизических свойств на их основе разработаны одни из лучших связующих для большинства волокнистых композиционных материалов.

Цель работы – изготовление экспериментальных композиций на основе полимеров и исследование физико-механических свойств данных составов.

Объекты исследования: композиция из эпоксидной смолы и отвердителя; композиция из полиэфирной смолы и отвердителя; композиция из эпоксидной смолы, полиэфирной смолы и отвердителей; композиция из эпоксидной смолы, наполнителя и отвердителя; композиция из полиэфирной смолы, наполнителя и отвердителя; композиции из эпоксидной смолы, полиэфирной смолы, отвердителей и наполнителя зернистостью 50 мкм; композиции из эпоксидной смолы, полиэфирной смолы, отвердителей и наполнителя зернистостью 250 мкм; композиция из полиэфирной смолы, стекловолокна и отвердителя; образцы с «холодной сваркой» (всего 22 образца) (рис. 1).

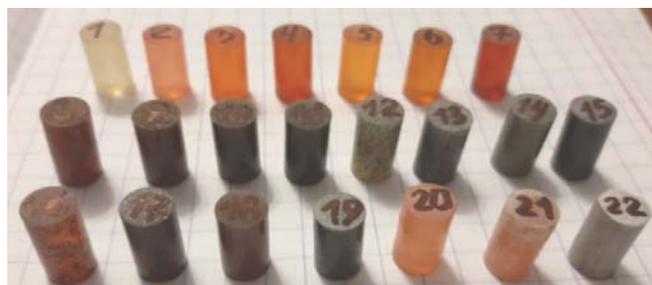


Рис. 1. Образцы, подготовленные для испытаний

Испытания проводились на сжатие на машине INSTRON 5969 с предельной нагрузкой 50 кН. При проведении испытаний образцы под номерами № 2–11 не разрушились (рис. 2). При дальнейшем нагружении образцы продолжали деформироваться, превращаясь в диск без разрушения.



Рис. 2. Образцы № 2–11 после снятия нагрузки

Образцы № 1, № 12–22 разрушились (рис. 3).



Рис. 3. Образцы № 1, № 12–22 после деформации

По данным испытаний были построены графики зависимости деформации образцов от нагрузки.

Анализируя полученные данные, при нагружении образцов было выявлено, что наибольшую нагрузку выдержали образцы, в составе которых есть эпоксидная смола. Образец из эпоксидной смолы выдерживает 109 МПа. Образец с «холодной сваркой» довольно хрупкий и выдерживает нагрузку не более 27 МПа. Образец из полиэфирной смолы не разрушился. Введение карбида кремния приводит к увеличению прочности. Увеличение зернистости при одинаковом соотношении компонентов приводит к уменьшению предела прочности в 1,3 раза, а увеличение в составе полиэфирной смолы уменьшает предел прочности в 2 раза.

Таким образом, при проведении предварительных испытаний было установлено, что введение полиэфирной смолы увеличивает эластичность, но уменьшает прочность эпоксидных композитов. Введение дисперсных наполнителей в эпоксидную смолу приводит к увеличению прочности, но повышению хрупкости материала. Однако тот факт, что эпоксидная смола модифицирована полиэфирной смолой, позволяет перейти от хрупкого разрушения материалов к упруго-пластичной деформации.

#### Л и т е р а т у р а

1. Нильсон, Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций / Л. Нильсон. – М. : Химия, 1978. – 378 с.
2. Михайлов, М. И. Оптимизация состава фрикционного покрытия твердосплавных пластин сборного инструмента / М. И. Михайлов, З. Я. Шабакаева // Материалы, технологии, инструмент. – 1996. – № 3. – С. 28–30.

УДК 546:54.057

## **СОВРЕМЕННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

**С. Н. Бобрышева, И. Ю. Ухарцева**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

Развитие современной техники требует новых конструкционных материалов, превосходящих по своим прочностным, упругим и другим свойствам традиционные. К числу наиболее интересных и перспективных относятся полимерные композиционные материалы (ПКМ), которые все чаще применяются в современном машиностроении, причем их используют в тех случаях, когда ни один другой материал не отвечает возрастающим требованиям новой техники. В настоящее время полимеры и материалы на их основе серьезно потеснили такие основные конструкционные материалы, как железобетон, металл, дерево. Возможности полимерных материалов чрезвычайно широки благодаря многообразию полимеров и наполнителей, неисчерпаемой варибельности составов композитов на их основе и методов их модификации.

Применение ПКМ в машиностроительном производстве является одним из наиболее перспективных путей повышения конкурентоспособности выпускаемой продукции. Снижение металлоемкости изделий и, как следствие, массы машины оказывает существенное влияние не только на экономию материалов, но и на энергозатраты на этапе их эксплуатации.

В зависимости от поставленных задач можно подобрать ПКМ, отвечающие требованиям условий эксплуатации и обладающие, например, такими свойствами, как механическая прочность, относительно низкая удельная масса, пожаробезопасность, дешевизна, хорошая обрабатываемость, низкие затраты на утилизацию и т. д. [1].

Современные методы прочностных расчетов позволяют смоделировать и более точно определить нагрузки на проектируемую деталь, снизить трудоемкость процесса разработки изделий и повысить качество машиностроительной продукции в целом.

Небольшой спрос на композиты в машиностроении связан с непониманием или неспособностью потребителя оценить затраты на приобретение и эксплуатацию на весь жизненный цикл. Ведь как правило, прямые затраты (а они в случае изготовления, например, корпуса из композиционных материалов составят 10–15 %) оказываются выше по сравнению со стальными.

Дипломные работы выпускников кафедры «Материаловедение в машиностроении» показали, что применение ПКМ в области машиностроения позволяет решить ряд инженерных задач, направленных на снижение металлоемкости изделий и, как следствие, их массы, вибрации, шума, динамических нагрузок, рабочей температуры при повышении коррозионной стойкости и надежности изделия. Внедрение новых альтернативных материалов, оптимизация технологических процессов и конструктивных элементов возможны благодаря трехмерному моделированию и анализу, а также применению аддитивных технологий.

В работе представлен пример замены в исходной конструкции металлических элементов трапа на композиционные для кормоуборочного комбайна КЗС-10К (рис. 1). На рис. 1, *а* представлены основные элементы конструкции: лестница/трап, металлические ступеньки, блок установочного крепления, передающий вращательный момент для обеспечения поворота трапа. Проведена оптимизация конструкции и дальнейший прочностной расчет. Результатом исследования и расчета явилась разработка новой конструкции (рис. 1, *б*) лестницы и ступеньки трапа (рис. 1, *в*), оптимизированной также заменой материала с конструкционной стали 30 на композитный ABS-пластик, наполненный антипиренами [2].

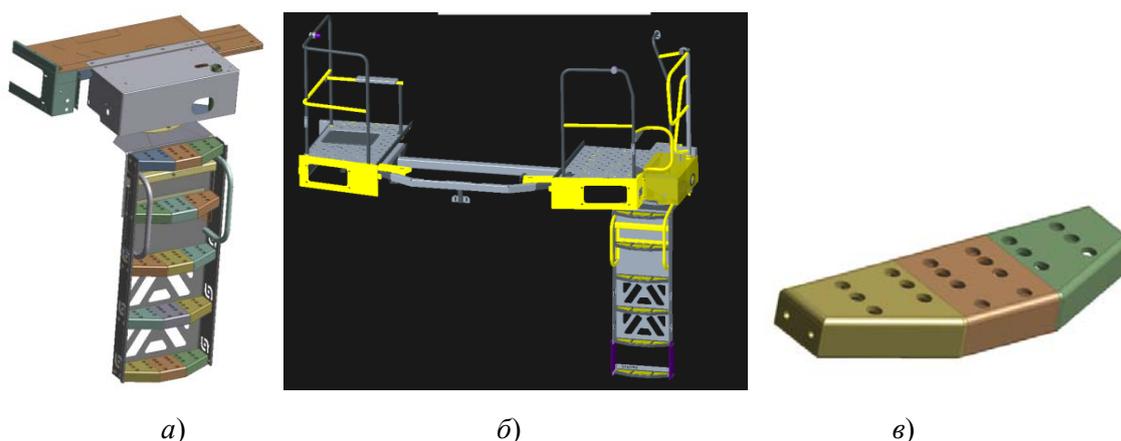


Рис. 1. Замена металлических элементов трапа на композиционные:  
*а* – модель трапа, совмещенная с площадкой крепления;  
*б* – конечная конструкция трапа; *в* – оптимизированная ступенька

Данная оптимизированная конструкция детали из пластика практически не уступает оригинальной металлической как в плане технологических, механических свойств, так и эксплуатационных нагрузок, поскольку:

– напряжения, возникающие в ходе приложения нагрузки в 200 кг на ступеньку, как металлическую, так и пластиковую, не превышают предела текучести заданного материала;

– деформации металлической ступеньки равны 8 мм в зоне приложения нагрузки, а пластиковой – 11 мм, что является отличным показателем для альтернативной конструкции, так как разница незначительна и составляет всего лишь 3 мм;

– оптимизированная конструкция ступеньки трапа получила возможность быстрого демонтажа и замены в случае поломки в связи с добавлением отверстий под болты, чего не скажешь о приваренной металлической ступеньке;

– толщины металлической и пластиковой конструкции трапа варьируются от 2 до 6 мм и являются практически идентичными;

– масса исходной конструкции ступеньки трапа составляет 1,9 кг металлической массы, в то время как масса альтернативной пластиковой – 1,3 кг.

Для получения результатов разрабатывалась САД-модель технологического процесса 3D-печати, проводился расчет прочностных характеристик с использованием лицензионных программных пакетов Pro/ENGINEER, Ansys Workbench, программы Ultimaker Cura и стандартных методик, что обусловило достоверность полученных результатов.

#### Л и т е р а т у р а

1. Бондалетова, Л. И. Полимерные композиционные материалы : учеб. пособие / Л. И. Бондалетова, В. Г. Бондалетов. – Томск : Том. политехн. ун-т, 2013. – 118 с.
2. Бобрышева, С. Н. Способы снижения пожароопасности наиболее распространенных полимерных материалов / С. Н. Бобрышева // Современные проблемы машиноведения : сб. материалов XIV Междунар. науч. техн. конф., Гомель, 27–28 окт. 2022 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2023. – С. 35–38.

УДК 620.178

### **СТРУКТУРА, МИКРОТВЕРДОСТЬ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ДИФфуЗИОННО-УПРОЧНЕННЫХ СЛОЕВ КОРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ 40X13 И BOHLER M303 EXTRA**

**И. Н. Степанкин<sup>1</sup>, Е. П. Поздняков<sup>2</sup>, А. В. Рабков<sup>2</sup>,  
Д. В. Куис<sup>3</sup>, А. Б. Найзабеков<sup>4</sup>, С. Н. Лежнев<sup>4</sup> б ь**

<sup>1</sup>*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

<sup>2</sup>*Белорусский научно-исследовательский институт нефти*

*РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», г. Гомель*

<sup>3</sup>*Белорусский государственный технологический университет, г. Минск*

<sup>4</sup>*НАО «Рудненский индустриальный институт», Республика Казахстан*

При изготовлении различного рода деталей конструкционного назначения и инструментальной оснастки наряду с традиционно применяемыми сталями 40X, 35ХГСА могут быть использованы стали с особыми свойствами 40X13 и BOHLER M303 Extra. Их необходимость применения определяется в первую очередь заказчи-

ком. Однако влияние различного рода термической и химико-термической обработок на структуру и свойства указанных сплавов недостаточно исследовано.

Химический состав стали 40X13 соответствует ГОСТ5632 и содержит около 0,4 % С и 13 % Cr. Состав стали BOHLER M303 Extra приведен в табл. 1. В табл. 2 представлены режимы термической и химико-термической обработок.

Таблица 1

Химический состав стали BOHLER M303 Extra, мас. %

С	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
0,27	0,30	0,65	14,50	0,85	1,00

Таблица 2

Режимы термодиффузионного упрочнения и твердость сталей BOHLER M303 Extra и 40X13

Марка стали	Обозначение партии	Режимы термохимической обработки			Режимы термической обработки		Микротвердость поверхности/сердцевины, ГПа
		Вид обработки	Время, час	Температура, °С	Температура закалки, °С	Температура отпуска, °С	
BOHLER M303 Extra	△	–	–	–	1060	200	48**
	○	Цементация	6	900	950	200	4,5/4,2
	◇	Нитроцементация	6	900	950	200	6,3/4,2
	□	Нитроцементация*	6	500	1060	400	5,6/4,4
40X13	▲	–	–	–	1050	200	51–53**
	●	Цементация	8	900	980	200	5,1/4,9
	◆	Нитроцементация	6	880	980	200	7,7/5,2
	■	Нитроцементация*	6	500	1050	200	5,1/4,9

\*Нитроцементация проводилась после закалки и отпуска.

\*\*Твердость HRC

После всего цикла упрочнения оказалось, что максимальная микротвердость поверхности зарегистрирована у образцов стали 40X13 после предварительной нитроцементации. Способность стали BOHLER M303 Extra приобретать наибольшую микротвердость также отмечена у образцов после предварительной нитроцементации. При этом следует отметить, что микротвердость сердцевины у образцов из стали 40X13 оказалась выше, чем у стали BOHLER M303 Extra. Проведение только закалки с последующим низкотемпературным отпуском позволяет получить твердость для стали BOHLER M303 Extra на уровне 48HRC, а для стали 40X13 – 53HRC.

В процессе испытаний на контактную усталость на установке [1] получены кривые износа от числа циклов нагружения при амплитуде контактных напряжений 950МПа (рис. 1). Наибольшей стойкостью к усталостному изнашиванию обладает сталь 40X13, подвергнутая лишь закалке и низкому отпуску. Нарботка на отказ при достижении глубины лунки износа данной партии образцов составила 13960 циклов

нагрузки. Удовлетворительную износостойкость показали образцы стали 40X13 после предварительной нитроцементации, наработка которых зарегистрирована на уровне 7480 циклов. Их стойкость оказалась в 2,4 раза выше, чем стойкость аналогичного слоя стали BOHLER M303 Extra. У остальных партий образцов износостойчивость оказалась очень низкой вследствие низкой микротвердости поверхностного слоя и сердцевины, а также малой толщины диффузионных слоев.

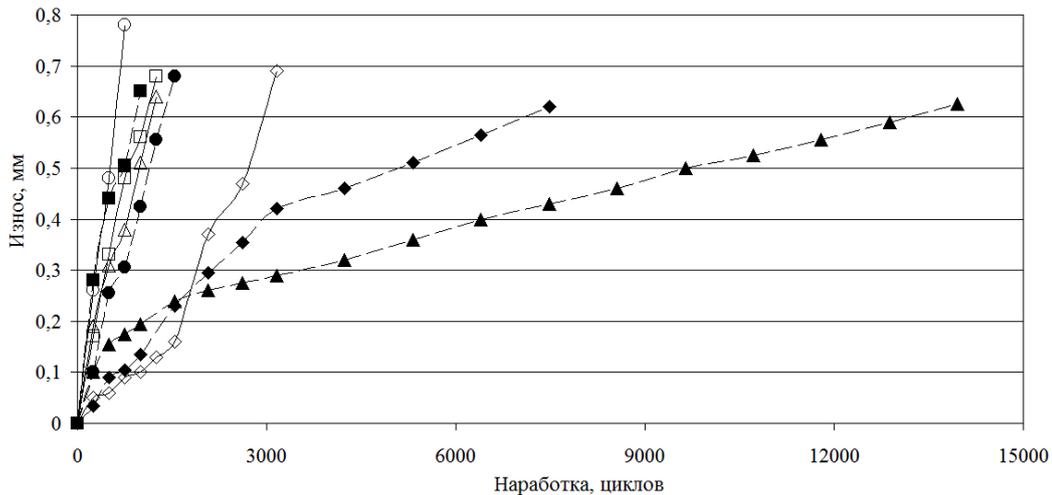


Рис. 1. Кривые износа образцов из стали 40X13 (темные маркеры) и BOHLER M303 Extra (светлые маркеры) при амплитуде контактных напряжений 950 МПа

Исследование структуры образцов в процессе испытаний показало, что материал в области контакта с контртелом на начальном этапе подвергается пластической деформации, приводящей к образованию наклепа. При дальнейшем воздействии на образцы образуются трещины контактной усталости, формирующие в итоге питтинги.

#### Литература

1. Устройство испытания материалов на контактную усталость и износ : пат. 8260 U Респ. Беларусь : МПК G01N 3/00 / И. Н. Степанкин, И. А. Панкратов, В. М. Кенько, Е. П. Поздняков, Л. В. Степанкина ; заявитель Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – № u 20110940 ; заявл. 23.11.2011 ; опубл. 30.06.2012.

УДК 669.14.018.298.2:620.178

### ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ЦЕМЕНТОВАННЫХ СЛОЕВ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ 35ХГСА, 40Х И 42СRМO54

Е. П. Поздняков<sup>1</sup>, И. Н. Степанкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский научно-исследовательский институт нефти  
РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», г. Гомель

Традиционно для использования штампового инструмента применяются легированные инструментальные стали 5ХВ2С, Х12М, Р6М5, 6Х4М2ФС и т. д. В их химическом составе содержатся сильные карбидообразующие элементы (Cr, V, W, Mo),

формирующие высокое содержание карбидных включений. При перекове заготовки и формировании гравюры инструмента методами пластической деформации карбиды разрушаются, что является причиной распространения трещины из включения в металлическую матрицу материала. На ОАО «Гомельский завод литья и нормалей» отработана технология изготовления мелкоразмерного холодновысадочного инструмента из конструкционных среднеуглеродистых сталей 40X и 35XГСА с диффузионно-упрочненной поверхностью [1]. В настоящее время на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» для стран Европейского союза выплавляется сталь 42CrMoS4, о свойствах которой мало известно. Поэтому целью работы являлось влияние фазовых составляющих цементованных слоев на свойства сталей 35XГСА, 40X и 42CrMoS4.

Результаты проведенных исследований показали, что структура металлической матрицы цементованных слоев всех сталей состоит из мартенсита и остаточного аустенита, в которой содержатся карбиды цементитного типа. Наиболее мелкие включения формируются в слоях стали 35XГСА (см. таблицу), содержащей меньше хрома, чем остальные стали, и имеющей повышенное содержание кремния, провоцирующего диффузию углерода при цементации непосредственно в аустенитное зерно [2] с последующим выделением мелкодисперсных карбидов при отпуске. Их объемная доля в слоях стали 35XГСА также оказалась минимальной. Повышенное содержание кремния в стали 35XГСА так же позволило получить высокую микротвердость поверхности. Для слоев сталей 40X и 42CrMoS4 при увеличении времени цементации наблюдается повышение микротвердости поверхности.

#### Показатели науглероженных слоев конструкционных сталей

Показатель		Марка стали					
		35XГСА		40X		42CrMoS4	
		Длительность цементации, часов					
		8	12	8	12	8	12
Объемная доля карбидной фазы, об. %		10	15	15	40	30	40
Максимальный размер включений, мкм		2	3	10	20	10	30
Микротвердость, ГПа	поверхности	9,1	9,1	7,9	8,2	8,3	8,5
	сердцевины	6,0	6,0	5,6	5,5	6,1	6,1
Общая толщина диффузионного слоя, мм		2,0	2,2	2,0	2,2	1,9	2,0
Толщина заэвтектоидной зоны, мм		0,2	0,2	0,5	0,7	0,7	0,7
Количество углерода на поверхности, об. %		1,10	1,3	1,67	> 1,80	> 1,80	> 1,80
Объемная доля остаточного аустенита, об. %		7,0	10,0	17,0	18,0	11,7	13,3

Испытания на контактную усталость проводились на оригинальной установке [3]. Установлено, что при амплитуде контактных напряжений 1300МПа максимальную наработку при достижении глубины лунки износа 0,6 мм показал науглероженный слой, сформированный на стали 40X в течение 12 часов (рис. 1). Следует отметить, что у обоих слоев стали 35XГСА и слоя стали 40X после 8-часового науглероживания после этапа приработки, длящегося порядка 1000–1500 циклов нагружения, имеется этап высокой износоустойчивости. Отсутствие данного этапа на иных слоях связано с тем,

что поверхностные слои содержат слишком большое количество углерода (более 1,80 об. %) и высокое содержание крупных карбидов (более 30 об. %), размер которых превышает 10 мкм.

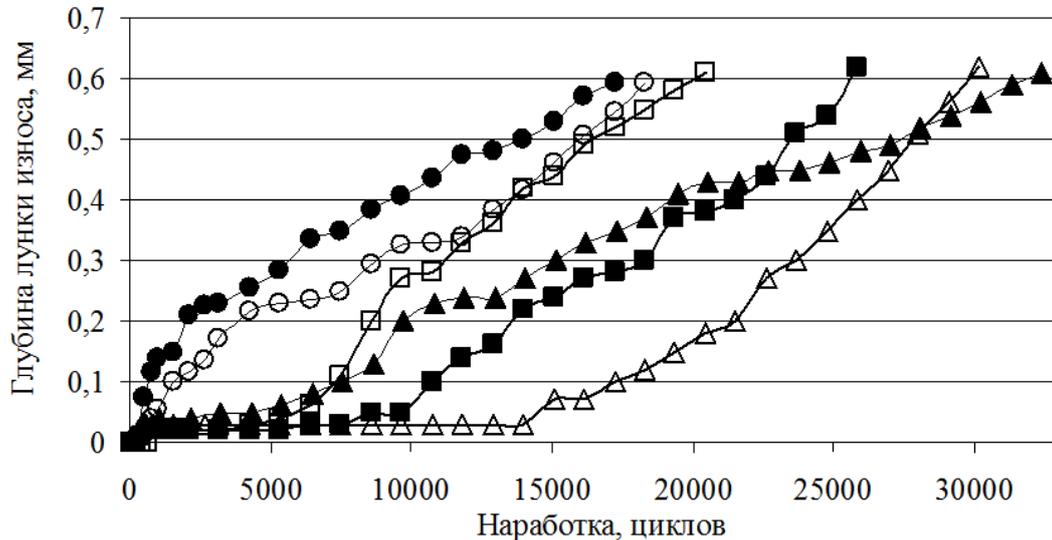


Рис. 1. Кривые износа науглероженных слоев стали:

■, □ – 35ХГСА; ▲, △ – 40Х; ●, ○ – 42CrMoS4  
 (8-часовая химико-термическая обработка – светлые маркеры;  
 12-часовая химико-термическая обработка – темные маркеры)

Все исследованные слои сопровождаются питтинговым изнашиванием. На начальном этапе при первых контактах с дисковым контртелом материал образцов претерпевает пластическую деформацию. При увеличении наработки в деформированных объемах материала образуются зоны наклепа, в которых зарождаются и распространяются трещины контактной усталости, приводящие к выкрашиванию объемов материала.

В результате проведенных испытаний установлено, что максимальная износостойкость для стали 35ХГСА достигается после 12-часовой цементации, а для стали 40Х – после 8-часовой цементации. Их структура состоит из мартенсита, 10–15 % избыточных карбидов, размером менее 10 мкм, и остаточного аустенита (10 % в стали 35ХГСА и 17 % в стали 40Х).

#### Литература

1. К вопросу влияния остаточного аустенита на износостойкость науглероженных слоев стали 40Х и 35ХГСА / И. Н. Степанкин [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. / редкол.: А. В. Белый [и др.]. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, – 2019. – Кн. 1. Материаловедение. – С. 104–116.
2. Ворошнин, Л. Г. Теория и технология химико-термической обработки : учеб. пособие / Л. Г. Ворошнин, О. Л. Менделеева, В. А. Сметкин. – М. ; Минск : Новое знание, 2010. – 304 с.
3. Устройство испытания материалов на контактную усталость и износ : пат. 8260 U Респ. Беларусь : МПК G01N 3/00 / И. Н. Степанкин, И. А. Панкратов, В. М. Кенько, Е. П. Поздняков, Л. В. Степанкина ; заявитель Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – № и 20110940 ; заявл. 23.11.2011 ; опубл. 30.06.2012.

УДК 621.778.073

### ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В. М. Шаповалов<sup>1</sup>, К. В. Овчинников<sup>1</sup>, С. Ф. Мельников<sup>1</sup>, Р. С. Напреев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГНУ «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси», г. Гомель

<sup>2</sup>ОДО «Полидрев», г. Гомель, Республика Беларусь

В настоящее время все большее распространение получают древесно-полимерные композиты (ДПК) на основе термопластичных полимеров. Уверенным лидером потребления ДПК в Европе является автомобильная промышленность, принимая на себя более половины общих объемов потребления. Одним из важных факторов коммерческого успеха конструкций из ДПК является их низкое водопоглощение, долговечность, высокие прочностные характеристики, легкость установки и механической обработки, низкие (по сравнению с деревом) требования к техническому обслуживанию. Листовые изделия из ДПК также обладают важным технологическим свойством – при нагреве до определенной температуры они легко поддаются изгибу, позволяя создавать любые радиусные и гнутые формы.

В ИММС НАН Беларуси совместно с ОДО «Полидрев» разработаны составы высоконаполненных ДПК [1] (отходы деревообрабатывающего производства составляют в них более 50 мас. %), позволяющие без применения дорогостоящих модификаторов или трудоемких технологических операций улучшить эксплуатационные характеристики изделий (водопоглощение, горючесть) с сохранением удовлетворительных прочностных показателей, уменьшить энергетические затраты на производство композиций, снизить себестоимость и улучшить экологичность производства изделий из ДПК. В качестве полимерного связующего в композициях использовали вторичные полипропилен и полиэтилен низкого давления, в качестве наполнителя – древесную муку марки М 400 (фракция 0,2–0,4 мм), а также термопластичные отходы ДПК (ОДПК) производства ОДО «Полидрев». Технологический процесс подготовки ОДПК включал операции отделения полиэфирной ткани от ДПК и измельчение с получением дробленного композита. В качестве технологических смазок при экструзии использовали полиэтиленовый воск, стеараты цинка и кальция. Проведенные в работе [2] исследования позволили установить оптимальные рецептурно-технологические параметры получения образцов ДПК на основе различных термопластичных связующих. Изготовление деталей осуществляется из древесно-наполненного полипропилена методом термопрессования за один технологический цикл с одновременным дублированием обивочными материалами. Результаты испытаний образцов приведены в таблице и демонстрируют высокий уровень показателей разработанных композиций.

#### Физико-механические показатели изделий

Наименование показателя	Технические нормативные правовые акты	Значение
Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м <sup>2</sup> , не менее	ГОСТ 4647–2015	5
Прочность при изгибе, МПа, не менее	ГОСТ 4648–2014	30
Водопоглощение, %, не более	ГОСТ 4650–2014	2

На базе разработанных составов ДПК возможно производство широкой номенклатуры конкурентоспособных изделий для машиностроительной отрасли. Например, на ОДО «Полидрев» налажено производство деталей потолка тракторов ОАО «МТЗ» (рис. 1).



Рис. 1. Лист и деталь потолка из древесно-полимерных композитов

Возможно получение других формованных деталей из листовых заготовок для автомобильной и автотракторной техники, а также профильных изделий в качестве опор и направляющих скольжения.

#### Л и т е р а т у р а

1. Древесно-полимерная композиция для изделий декоративно-строительного назначения и способ ее получения : заявка № а20210310 / В. М. Шаповалов, К. В. Овчинников, С. Ф. Мельников, С. В. Зотов, Р. С. Напреев, Д. Л. Подобед. – Оpubл. 04.11.2021.
2. Влияние отходов листового древеснополимерного композита на физико-механические свойства композиционных материалов на основе термопластов / В. М. Шаповалов [и др.] // Гор. механика и машиностроение. – 2021. – Вып. 4. – С. 82–91.

УДК 621.65:621.9.048

### **ПОВЫШЕНИЕ ПОРИСТОСТИ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ ДЛЯ ФАСОННЫХ ЭЛЕКТРОД-ИНСТРУМЕНТОВ**

**М. Ф. С. Х. Аль-Камали<sup>1</sup>, В. С. Будник<sup>2</sup>, Н. В. Лушпа<sup>2</sup>,  
И. А. Врублеский<sup>2</sup>, А. К. Тучковский<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

<sup>2</sup>*Белорусский государственный университет информатики  
и радиоэлектроники, г. Минск*

Для получения изделий из порошковых материалов используют методы порошковой металлургии [1]. В этом случае формирование окончательного материал проходит через термическую обработку при температуре ниже температуры плавления основного компонента [2, 3]. В таком технологическом процессе от чистоты материалов исходного порошка зависят форма частиц, насыпная масса, химический состав, прессуемость и спекаемость порошков. Для повышения прочности изготовления изделий порошок загружают в форму и прессуют, что обеспечивает сцепление частиц порошка вследствие взаимной диффузии. С повышением температуры спекания плотность спеченных изделий возрастает. При низких температурах за счет испарения влаги и удаления адсорбированных газов с поверхности частиц и снятием остаточных напряжений от усилий прессования происходит незначительная усадка. При повышении температуры протекают процессы окончательного снятия внутренних напряжений. Дальнейшее повышение температуры приводит к образованию

металлического контакта между частицами, что свидетельствует о полном спекании и образовании капиллярно-пористой структуры изделия. После операции спекания применяется механическая обработка путем фрезерования, точения или шлифования для получения требуемого качества поверхности.

Изделия на основе капиллярно-пористых материалов находят применение в качестве фасонных электрод-инструментов при электроэрозионной обработке. Электроэрозионная обработка заключается в воздействии на металлы электрическими разрядами (импульсами), которые возникают между электродом и поверхностью заготовки, приводящими к изменению формы, размера и шероховатость обрабатываемого материала.

Электроэрозионная обработка применяется для изменения размеров изделий из металла, создания отверстий различного диаметра и формы, нанесения маркировки, извлечения сломанного инструмента и крепежа из узлов, деталей, шлифовки, резки, а также для получения фасонных полостей, канавок и пазов в деталях и упрочнения поверхности. Объектом обработки служат любые токопроводящие материалы, в том числе твердые и прочные, вязкие и хрупкие. В качестве расходников используются электроды-инструменты из таких материалов, как латунные, медные, вольфрамовые и алюминиевые стержни. Возможности технологии позволяют проводить обработку глубоких отверстий, щелей и прошивание отверстий специальной проволокой на электроэрозионных станках. Извлечение сломанных инструментов или крепежей происходит без нарушения резьбы, чаще всего не требуя демонтажа узла, детали, установки их на станину и т. д.

Достоинством такой обработки является отсутствие силового воздействия на материал, что позволяет обрабатывать тонкостенные и нежесткие конструкции. Электроэрозионные станки и приборы имеют широкий диапазон работы, что обеспечивает необходимую мощность, производительность, точность. Электроэрозионная технология нашла свое применение в металлообработке и других сферах – извлечение обломков метчиков и другого резьбонарезного инструмента, обломков сверл, болтов и другого инструмента.

В настоящей работе в качестве образцов для исследований использовались медные шайбы диаметром 50 мм и толщиной 15 мм, полученные методом порошковой металлургии. Для увеличения пористости исходных образцов было проведено контролируемое травление каналов в капиллярно-пористой структуре образца из меди. Морфология поверхности исходного и обработанного образца полученная в оптическом микроскопе представлена на рис. 1.

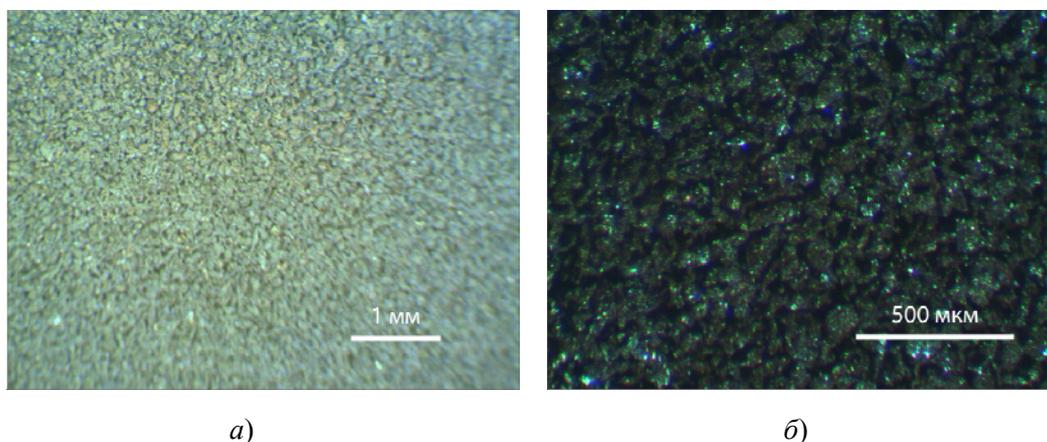


Рис. 1. Морфология поверхности:  
а – исходного образца; б – обработанного образца

Непосредственно перед травлением проводился отжиг образцов в сушильном шкафу при температуре 150 °С в течение 2 часов. После каждого цикла травления проводилось промывание образцов в дистиллированной воде с последующей сушкой в сушильном шкафу при температуре 120 °С в течение 2 часов и затем для контроля взвешивали образцы. Взвешивание проводилось на весах марки АВТ 220-5DM с точностью до 0,0001 г.

В ходе травления наблюдалось постепенное уменьшение массы образцов. После одного цикла травления убыль массы равнялась 8,3483 г, что соответствует 4,94 %. После третьего цикла убыль была равна 31,1597 г и 18,49 %, соответственно. После пятого цикла убыль составила 58,1962 г, что соответствует уже 30,89 %. После шестого цикла убыль массы составила 34,45 % (71,2548 г). Убыль плотности была равна 0,88452 г/см<sup>3</sup>. Таким образом, длительная обработка (60 минут, так как один цикл составлял 10 минут) способствует частичному растворению меди, увеличению пористости и развитию поверхности.

В качестве критерия для оценки увеличения пористости образцов использовалось измерение скорости адсорбции изопропилового спирта. Результаты экспериментов показали, что после обработки образец поглощал изопропиловый спирт в течение 22 секунд, в то время как для исходного образца это время было около 5 минут.

Таким образом, проведенные исследования показали, что дополнительная обработка образца из меди с капиллярно пористой структурой путем контролируемого травления каналов позволяет увеличить общую пористость, что приводит к улучшению пористой структуры и свойств материала, необходимых для использования в качестве фасонных электрод-инструментов в электроэрозионной технологии.

#### Литература

1. Большим, М. Ю. Основы порошковой металлургии / М. Ю. Большим, С. С. Кипарисов. – М. : Металлургия, 1978.
2. Шатт, М. Порошковая металлургия. Спеченные и композиционные материалы / М. Шатт. – М. : Металлургия, 1983.
3. Тохтер, П. В. Новые керамические композиционные материалы / П. В. Тохтер // Металлообработка. – 2001. – № 2. – С. 19–20.

УДК 621.225.7

### **СПЕЦИФИКА КОНТРОЛЯ ПОСЛОЙНОЙ ЗАЛИВКИ ИЗНОСОСТОЙКОГО ЧУГУНА С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОПАР ПРИ ЛИТЬЕ ВКЛАДЫША ОТБОЙНОГО**

**Г. П. Короткин, В. А. Дементьев, А. И. Калентионок, Т. М. Рубанова**

*ГНУ «Институт технологии металлов НАН Беларуси», г. Могилёв*

Вкладыш отбойный является ответственной деталью центробежных машин для измельчения минерального сырья. Производство таких деталей в ИТМ НАН Беларуси производится литьем износостойкого хромистого чугуна в кокиль. Одним из путей повышения износостойкости таких деталей может быть послойное литье [1], поскольку оно позволяет уменьшить неоднородности по размерам карбидов, по твердости чугуна вблизи поверхности и глубине отливки [2].

В предыдущем эксперименте для реализации 5-слойного литья была изменена конструкция кокиля для визуального контроля заливки через открытую прибыль. С обычным кокилем, используемым для опытного производства, визуальное наблюдение заливки по слоям невозможно.

Идея данного эксперимента заключалась в использовании четырех термопар (1–4 на рис. 1) в качестве датчиков уровня расплава в обычном кокиле: по резкому подъему температуры (кривые 1–2, 2–3, 3–4, 4–5 на рис. 2) определяется достижение расплавом границы слоев, и заливка приостанавливается. Термопары вводились через отверстия в боковой плите кокиля на глубину около 1 см от боковой поверхности в полость отливки (рис. 3, а) для последующего вмораживания в отливку.

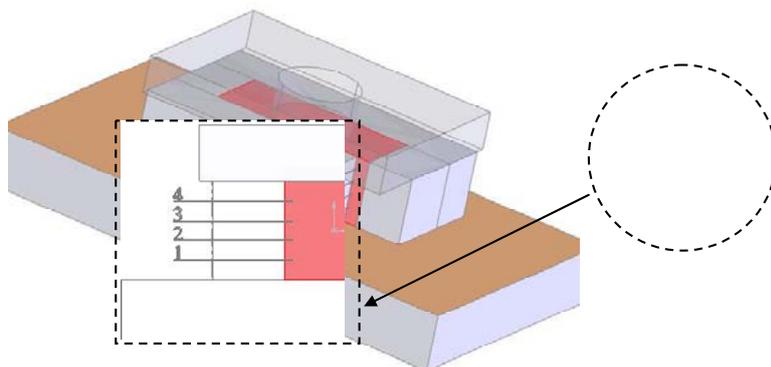


Рис. 1. Схема размещения термопар в боковой стенке кокиля в качестве датчиков заливки слоев

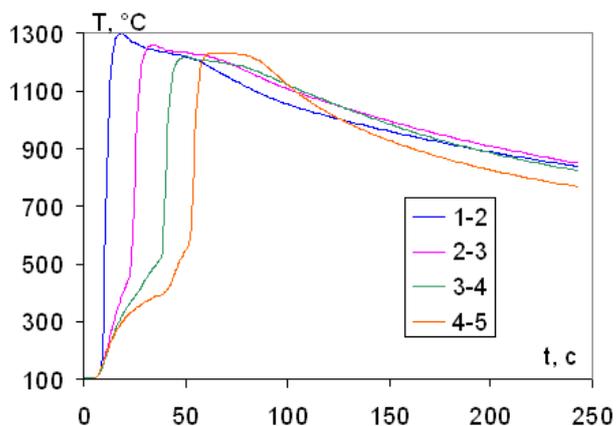


Рис. 2. Динамика температуры при 5-слойной заливке

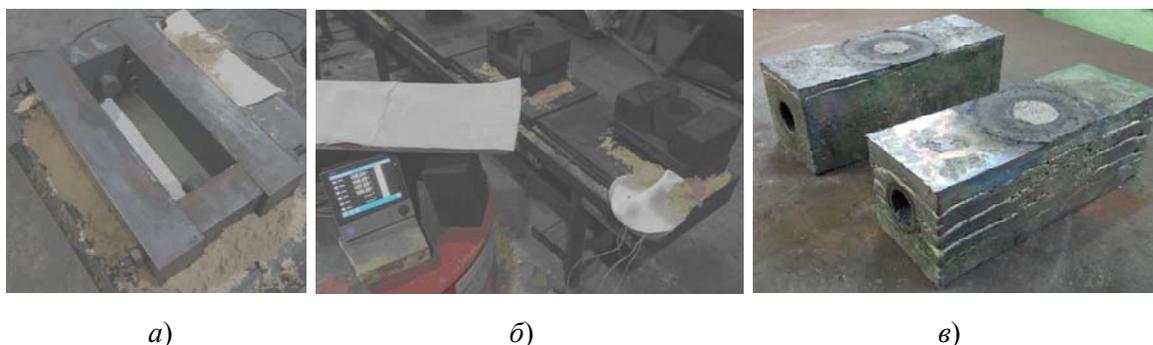


Рис. 3. Подготовка кокиля к эксперименту и полученные отбойные вкладыши

Термопары изготавливались методом сварки из хромелевых и алюмелевых проводов диаметром 0,5 мм и применялись с открытым спаем в керамической соломке. Фиксация температур проводилась на приборе с графической и цифровой индикацией 8 раз в секунду. Расчеты показывали отсутствие сплошной корки на зеркале расплава вплоть до выдержки 20 с [1], однако условия ковшевой разливки не позволяют и такую выдержку между заливками слоев. Температура расплава износостойкого хромистого чугуна (ИЧХ) (3,52 % С; 17,7 % Cr; 0,3 % Ni; 0,57 % Mn; 0,48 % Si; 0,35 % W; 0,18 % V; 0,31 % Mo) в ковше после слива из печи обычно около 1400 °С. Допустимое снижение температуры заливки расплава ИЧХ в промежуточной ковше ограничило время выдержки 10-ю секундами, и время заливки каждого слоя ориентировочно предполагалось 4–5 с. Время выдержки после прерываний заливок задавалось секундомером.

В результате эксперимента (рис. 3, а, б) были получены отбойные вкладыши (рис. 3, в, дальний – залитый целиком, ближний – 5-слойный) и кривые с термопар (рис. 2), установленных на межслойных границах, как на рис. 1. Названия кривых – пары номеров соседних слоев. Резкие подъемы кривых около 9, 23, 38, 52 с свидетельствуют о том, что между заливками проходило 14–15 с, включая заливку слоя и последующую выдержку, что подтвердило данные хронометража секундомером. У кривых 2–3, 3–4, 4–5 резкому подъему предшествует слабый подъем, что говорит о прогреве термопар через слой воздуха от зеркала расплава в процессе послойной заливки и инерционности процесса измерения температуры. Максимумы кривых снижаются для каждой последующей термопары, что связано с некоторым снижением температуры в ковше при последовательной заливке слоев, однако у кривой 3–4 он ниже всех.

#### Литература

1. Дувалов, П. Ю. Теплофизические особенности литья вкладыша отбойного в 5 слоев из износостойкого хромистого чугуна / П. Ю. Дувалов, В. А. Дементьев, Ю. А. Лебединский // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. / Физико-техн. ин-т Нац. акад. наук Беларуси ; редкол.: В. Г. Залесский [и др.]. – Минск, 2023. – Кн. 1. Материаловедение. – 324 с.
2. Структура и твердость литых деталей из износостойких чугунов / Е. И. Марукович [и др.] // Литье и металлургия. – 2017. – № 3. – С. 39–44.

УДК 621.791.927.55

### **СБОР ОТРАБОТАННОЙ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОПОРИСТЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

**С. М. Э. Эльшербини, М. Ф. С. Х. Аль-Камали, А. А. Бойко**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

Одной из основных проблем, связанных с производством и использованием смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), является необходимость утилизации отработанных жидкостей после использования. Традиционные методы утилизации, такие как сжигание или слив в канализацию, могут приводить к негативным последствиям для окружающей среды и здоровья людей. В связи с этим использование высокопористых керамических материалов становится привлекательным решением.

Высокопористые керамические материалы обладают специальной структурой, которая позволяет эффективно поглощать и удерживать СОЖ. Эти материалы обладают большой поверхностью и сильной адсорбционной способностью, что позволяет им эффективно улавливать различные компоненты СОЖ, такие как металлические частицы, эмульсии, масла и другие загрязнители. Преимущества данного метода включают эффективные сбор и утилизацию СОЖ, минимизацию воздействия на окружающую среду и снижение затрат на утилизацию. Высокопористые керамические материалы обладают длительным сроком службы и могут быть использованы в различных отраслях, включая металлообработку, автомобильную промышленность, машиностроение и другие области, где применяются СОЖ. Кроме того, данный метод способствует экономической выгоде за счет возможности извлечения ценных компонентов СОЖ и повторного использования материалов. Это также способствует сокращению экологической нагрузки и снижению выбросов загрязняющих веществ. Целью работы является использование высокопористых керамических материалов на основе оксида магния, полученных золь-гель методом, для сбора и утилизации отработанной СОЖ.

Получение пористых композиционных материалов золь-гель методом включало несколько этапов. На первом этапе получали золь оксида магния, затем гель с использованием аммония фтористого кислого ( $\text{NH}_4\text{F} \cdot \text{HF}$ ), после сушки полученный ксерогель термообработывали [1]. Этапы формирования композиционного материала на основе матрицы MgO приведены на рис. 1.

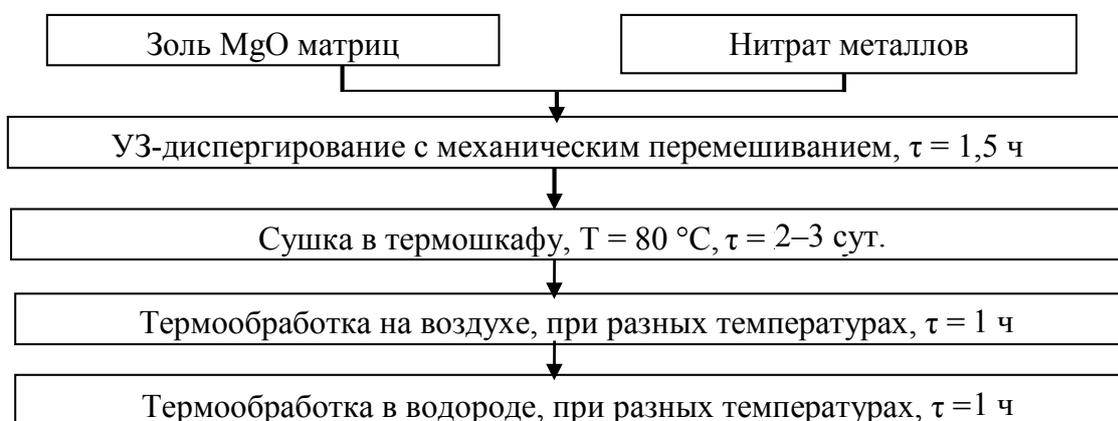


Рис. 1. Схема технологических этапов получения ксерогельных наночастиц металлов на основе MgO-матриц [2, 3]

В настоящей работе в качестве образцов для исследований использовались композиционные ксерогели составов MgO, MgO:ZnO, MgO:Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и MgO:BaO, включающие формирование ксерогеля, получения микропорошка путем размола и формование дисков методом прессования.

Структуру и морфологию поверхности полученных материалов исследовали с помощью оптической и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). На рис. 2 показаны результаты анализов. Наличие пористой структуры поверхности образующихся сорбционных комплексов показано методами оптической микроскопии, а СЭМ позволяет более детально проанализировать наличие сформированного рельефа и макропор в сорбентах.

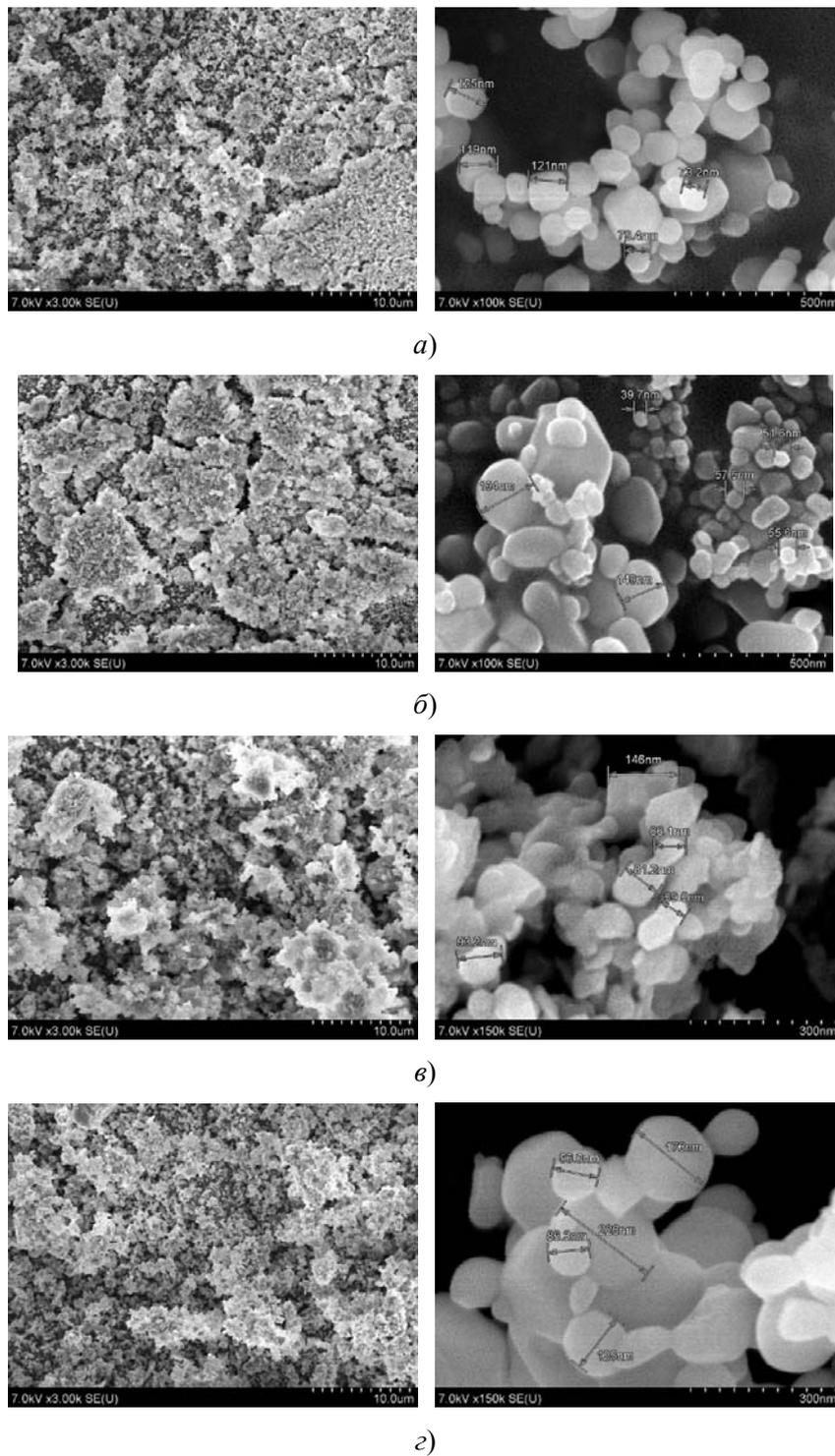


Рис. 2. СЭМ-изображения особенности морфологии сорбционных материалов на основе оксида магния:  
*a* – отжиг на воздухе при  $T = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 1 ч. Фазовый состав ксерогеля –  $\text{MgO}$ ; *б* – отжиг на воздухе при  $T = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 1 ч. Фазовый состав ксерогеля –  $\text{MgO} : \text{ZnO}$ ; *в* – отжиг на воздухе при  $T = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 1 ч. Фазовый состав ксерогеля –  $\text{MgO} : \text{Y}_2\text{O}_3$ ; *г* – отжиг на воздухе при  $T = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 1 ч. Фазовый состав ксерогеля –  $\text{MgO} : \text{Fe}_2\text{O}_3$

Из анализа рис. 2, а видна рыхлая структура ксерогеля MgO, при этом наблюдается четко выраженная глобулярная структура ксерогеля, а глобулы сформированы агрегатами, состоящими из частиц, имеющих достаточно узкий интервал распределения по размерам первичных зерен (от 73 до 125 нм). При введении легирующих элементов наблюдается сильное влияние на формирование первичных частиц оксида магния и рост глобулярности структуры. Наблюдается широкий разброс первичных частиц как в сторону уменьшения их размеров, так и роста. При введении ионов цинка наблюдаемый размер первичных частиц лежит в интервале от 39 до 294 нм. Форма частиц близка к чистому MgO (рис. 2, б). Введение оксида иттрия влияет как на размер, так и на форму частиц (рис. 2, в), формируются агломераты более плотные по сравнению как с чистым MgO, так и с легированным ZnO и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Ионы железа приводят к значительному росту первичных частиц (до 230 нм). Таким образом, введение легирующих элементов в матрицу MgO повышает склонность к агрегированию и характеризуется высокой степенью полидисперсности легированных порошков MgO.

Анализ сорбционной способности полученных материалов проводили по изменению массы образцов, погруженных в сырую нефть и промышленное масло (выдержка составляла 24 ч). Установлено, что сорбционные свойства полученных материалов зависят от вида и концентрации оксидов в матрице MgO-ксерогеля. Экспериментально доказано, что наибольшей сорбционной способностью обладают ксерогели легированные оксидом бария, для которого при концентрации BaO 0,25 моль составляет 98 %.

В результате проведенных исследований разработаны технологические этапы синтеза композиционных ксерогельных заготовок (составов MgO, MgO : ZnO, MgO : Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO : Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и MgO : BaO), включающие формирование ксерогеля, получение микропорошка путем размола и формование дисков методом прессования.

Методом СЭМ изучены структурные особенности сформированных материалов. Определено, что каркас ксерогеля сформирован из агрегированных первичных частиц. Размер первичных частиц зависит от вида легирующих элементов и их концентрации в матрице MgO-ксерогеля.

Наилучшими сорбционными свойствами характеризуется материал MgO : BaO, для которого при концентрации BaO 0,25 моль сорбционная способность равна 98 %.

Таким образом, использование высокопористых керамических материалов для сбора и утилизации отработанного СОЖ представляет собой эффективное и экологически устойчивое решение. Этот метод способствует сохранению окружающей среды, снижает затраты на утилизацию и открывает возможности для восстановления ценных компонентов СОЖ. Применение данного метода может быть полезным в различных отраслях, где используются СОЖ, и способствует устойчивому развитию и охране окружающей среды.

#### Литература

1. Подденежный, Е. Н. Золь-гель синтез оптического кварцевого стекла / Е. Н. Подденежный, А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2002. – 374 с.
2. Аль-Камали, М. Ф. С. Х. Структурообразование SiO<sub>2</sub>-ксерогелей, содержащих соединения меди различного фазового состава / М. Ф. С. Х. Аль-Камали, А. А. Алексеенко, О. А. Титенков // Проблемы физики, математики и техники. – 2020. – № 3 (44). – С. 7–12.
3. Аль-Камали, М. Ф. С. Х. Синтез таблетированных мишеней на основе микропорошков пирогенного кремнезема, содержащих соединения меди / М. Ф. С. Х. Аль-Камали, А. А. Алексеенко // Инновационные материалы и технологии – 2020 : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Минск, 9–10 янв. 2020 г. / Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2020. – С. 95–97.

УДК 004.9:616.724

## К ВОПРОСУ ДИНАМИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ СТАЛИ 5XB2C В РЕЗУЛЬТАТЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

В. Е. Пищиков<sup>1</sup>, С. Н. Лежнев<sup>1</sup>, И. Н. Степанкин<sup>2</sup>,  
Е. П. Поздняков<sup>3</sup>, Д. В. Куис<sup>4</sup>

<sup>1</sup>НАО «Рудненский индустриальный институт», Республика Казахстан

<sup>2</sup>Белорусский научно-исследовательский институт нефти

РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», г. Гомель

<sup>3</sup>Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь

<sup>4</sup>Белорусский государственный технологический университет, г. Минск

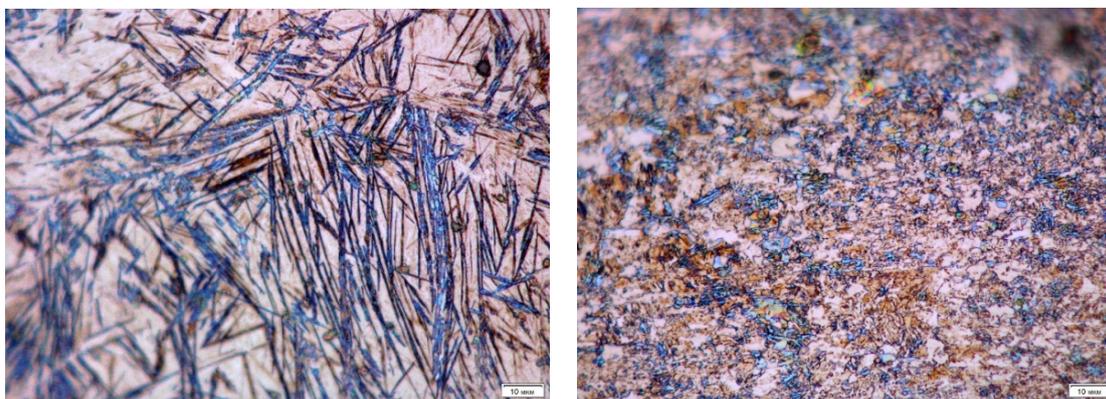
Особенности структурообразования легированных инструментальных сталей обусловлены не только физико-химическим сродством компонентов сплава, но и условиями термодинамического взаимодействия фазовых составляющих в процессе термомеханической обработки заготовок. В связи с этим интерес к структурному совершенствованию, направленному на формирование градиентной структуры в заготовке будущего инструмента, вполне очевиден с точки зрения экономических и научно-практических аспектов, формирующих пул инжиниринговых решений с признаками ноу-хау. Неожиданные по продуктивности решения во многих случаях становятся залогом разработки наукоемкой технологии, защищенной от несанкционированного копирования третьими лицами.

Среди объектов технологического совершенствования стали, химический состав которых содержит сильные карбидообразующие элементы, имеют особую привлекательность (по причине различной кинетики) структурообразования карбидов типа  $MC$ ,  $M_2C$ ,  $M_6C$ ,  $M_7C_3$ ,  $M_{23}C_6$ . Один из наиболее привлекательных сплавов, способных к многонаправленным морфологическим трансформациям, – инструментальная сталь 5XB2C. Интерес к исследованию этого сплава обусловлен тем, что снижение содержания углерода на 0,1 % (по сравнению с ее ледебуритным аналогом – 6XB2C) существенно расширяет диапазон эффектов, которые можно получить при термомеханической обработке заготовок. В нашем случае представленные результаты получены посредством проведения термомеханической обработки при помощи радиально сдвиговой прокатки и последующего контролируемого охлаждения.

Технология прокатки заготовок на стане радиально-сдвиговой прокатки заключалась в следующем: предварительно нагретые заготовки до 1200 °С подавались в рабочую клеть трехвалкового прокатного стана, в которой происходило ее обжатие радиальным уменьшением диаметра до 0,5 мм; температура образца в процессе обработки снижалась до уровня 830–850 °С; после того как заготовка полностью вышла из клетки, производили ее подогрев при 1200 °С в течение 10 минут; затем повторяли радиально-сдвиговую прокатку с реверсированием движения валков, при этом осевое перемещение заготовки происходило в направлении противоположном предыдущему проходу; суммарная обработка с уменьшением диаметра заготовки с 36 до 18 мм произведена за три повторно-возвратных цикла прокатки (шесть переходов); охлаждение заготовок осуществляли на свободном воздухе без обдува.

По результатам оценки морфологии сплава было выявлено, что в радиальном направлении заготовок структурные изменения можно ассоциировать с эпюрой

остаточных напряжений, создаваемых радиально-сдвиговой прокаткой. Основной особенностью такого структурного градиента является образование мартенситных структур в области оси заготовок (рис. 1, *a*). Размеры игл  $\alpha$ -фазы говорят о достаточно крупнозернистом строении металла в указанной области. В тоже время поверхностный слой, не содержащий признаков автозакалки, сохраняет мелкозернистую структуру, преимущественно ферритоперлитного строения, что свидетельствует о протекании процесса перекристаллизации в указанной зоне. При этом очевидно, что именно наружный слой заготовки, контактирующий с воздухом, должен был претерпеть мартенситное превращение из-за ускоренного охлаждения. В то время как внутренний слой, аккумулирующий теплоту, по условиям термодинамики распада аустенита в большей степени должен был приобрести ферритоперлитную структуру. Выявленные структурные различия противоречат традиционному механизму структурного превращения. В соответствии с диаграммой изотермического распада аустенита не одинаковая скорость охлаждения различных сечений заготовки определяет качественную и количественную картины прокаливаемости.

*a)**б)*

*Рис. 1.* Структура образцов из стали 5ХВ2С, подвергнутых термомеханической обработке с охлаждением на воздухе после окончания деформационного воздействия:

*a* – сердцевина; *б* – поверхность

В нашем случае особенность охлаждения в совокупности с диаграммой изотермического охлаждения стали 5ХВ2С привела к стабилизации аустенита сердцевины. В последующем металл сердцевины находился в условиях всестороннего деформированного состояния со стороны внешних слоев металла, претерпевающих усадку от двух одновременно действующих факторов – от градиента температур и градиента деформаций. Полученный результат дает возможность сформулировать требования к предварительной термомеханической обработке осевого инструмента. Такие номенклатурные единицы, как пуансоны обратного выдавливания, прошивные пуансоны и аналогичные виды инструмента, могут существенно улучшить свои эксплуатационные характеристики при разработке совмещенных технологий обработки заготовок на основе термомеханической и последующей термической обработок. Научно-технологической нишей для разработки перечня технологий являются режимы финишной термической обработки. Для указанного класса сталей широко применяются изотермические виды закалки с различными температурами промежуточной выдержки заготовки во время охлажде-

ния. По нашему мнению, именно этот параметр способен обеспечить управление градиентом структуры по сечению заготовки, а также сформировать благоприятное распределение остаточных напряжений по сечению.

Полученные результаты показывают, что для заготовок осевого инструмента из стали 5ХВ2С с применением радиально-сдвиговой прокатки создаются условия для получения новых вариантов распределения структуры и свойств по сечению.

#### Литература

1. Геллер, Ю. А. Инструментальные стали : справочник / Ю. А. Геллер. – М. : Металлургия, 1984. – 584 с.

### СЕКЦИЯ 3

## САД-, САМ-ТЕХНОЛОГИИ. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ И АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.313

### ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГЕ ДЕТАЛЕЙ НАСОСА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

О. Н. Калачев<sup>1</sup>, К. Д. Малашин<sup>1</sup>, И. В. Поздняков<sup>1</sup>, П. В. Никитин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ярославский государственный технический университет,  
Российская Федерация

<sup>2</sup>ПАО «Автодизель» (Ярославский моторный завод), Российская Федерация

Работа посвящена выполнению студентами кафедры «Компьютерно-интегрированная технология машиностроения» ЯГТУ кейса «Профстажировки» с задачей разработки конструкторской документации для изготовления изношенных деталей узла «Топливный насос низкого давления».

В ходе решения кейса выполнялись этапы, показанные на рис. 1.

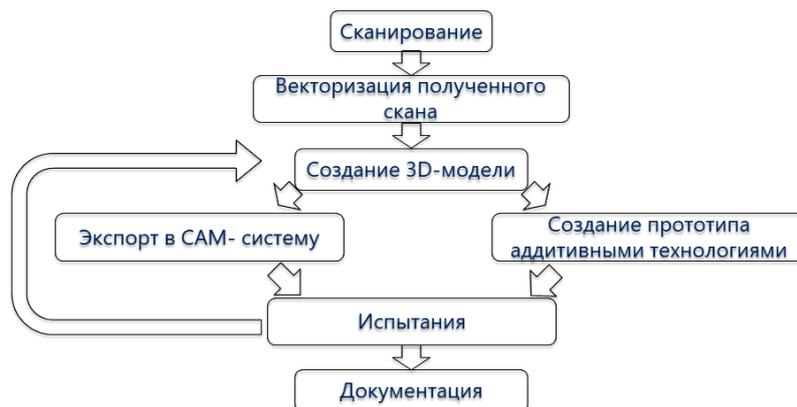


Рис. 1. Алгоритм решения задачи

Полученный с завода узел был разобран, его детали обработаны составом для создания матовой поверхности и подвергнуты сканированию на 3D-сканере Einscan SE в программе EXScan S. В качестве примера на рис. 2, слева, показан результат двукратного сканирования детали «пробка» с получением файла fix\_rpt.

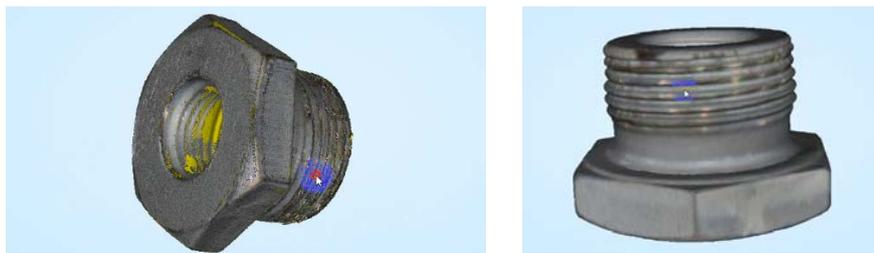


Рис. 2. Результат сканирования матированной детали насоса

В ходе дальнейшей обработки 3D-модели из полигонов методом «заполнения модели» получен файл с расширением stl (рис. 2, справа).

Векторизация 3D-скана является центральной частью реверс-инжиниринга, она выполнялась в программе Geomagic Design X. Сначала модель выровнивалась по осям координат и подвергалась разбиению на области (рис. 3, слева).

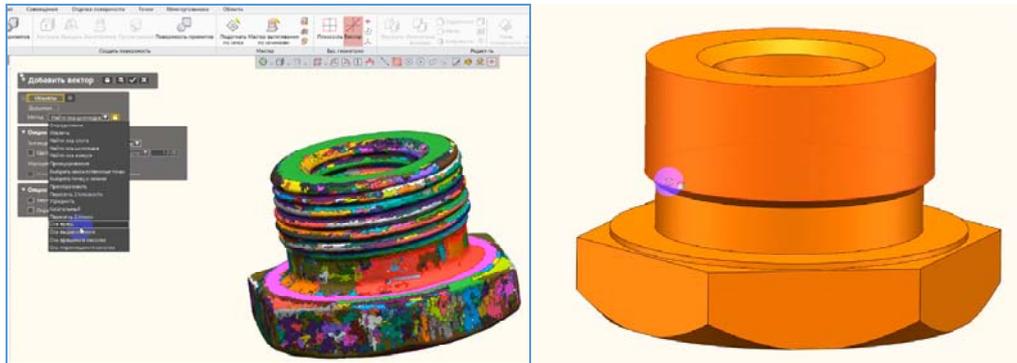


Рис. 3. Выбор метода «Ось вращения» (слева) и модель после векторизации (справа)

После выравнивания модели в Geomagic Design X методом «3-2-1» и построения геометрически правильных эскизов, завершающегося твердотельными операциями, получаем модель (рис. 3, справа) для доработки резьбы в САД-системе. Эту модель, конвертированную в формат STP, загружали затем в Компас-3D для воссоздания резьбы (рис. 4, слева).

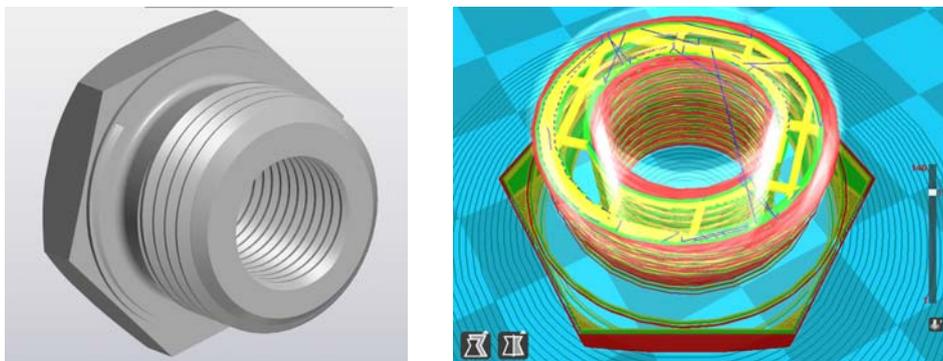


Рис. 4. Модель после доработки в Компас-3D и просмотр 114-го слоя в Cura

Для получения натурального прототипа сохранялась 3D-модель в формате stl и после ее настройки (рис. 4, справа) выполнялась печать на принтере MZ3D-256 в программе-слайсере Cura 15.04.6 (рис. 5, справа).



Рис. 5. Оригинал и образец из пластика ABS

Таким образом обработаны и напечатаны остальные 23 детали насоса, и после проверки собираемости изделия на основе полученных 3D-моделей деталей подготовлена конструкторская документация для завода и разработаны управляющие программы их изготовления на оборудовании с числовым программным управлением. Каждый этап выявил свои особенности программного обеспечения и преодоления специфических проблем.

*Работа удостоена диплома победителя федерального проекта «Профстажировка 2.0» за подписью директора «Группы ГАЗ».*

УДК 621.313

## **РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ MRP НА МАЛЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ MS SQL SERVER И REPORT BUILDER**

**К. С. Леон, О. Н. Калачев**

*Ярославский государственный технический университет,  
Российская Федерация*

В настоящее время малые предприятия сталкиваются с проблемой планирования производственного процесса и материального обеспечения. Они усугубляются неритмичным снабжением и заполнением складских помещений. Как известно, учет материальных ресурсов решается применением корпоративных информационных систем типа Material Requirements Planning (MRP) [1]. Рассмотрим принципы создания MRP-системы без привлечения решений известных вендоров.

Для реализации задач MRP-системы предлагается использовать продукты компании Microsoft: систему управления базами данных (СУБД) MS SQL Server Express и приложение Report Builder. Данная версия СУБД является открытой и доступной без лицензии. Report Builder стал отличной заменой классическому инструменту FastReport.

Создаваемая система должна предоставлять ведомость материалов – список должен отражать наименование, сортамент и объем материала, а также суммарное количество по каждому виду сортамента.

На первом этапе предложена универсальная структура базы данных (БД) (рис. 1), которая содержит информацию не только о материале заготовок, но и ключевую информацию об изделии. Благодаря такой структуре получаем возможность осуществлять поиск по различным атрибутам.



Рис. 1. Структура базы данных

Следующий этап характеризуется переходом к тривиальной реализации предложенной схемы средствами СУБД – созданием пяти взаимосвязанных таблиц, одна из них будет ключевой, а остальные – дочерними. В ключевой таблице будет содержаться информация об изделии и внешние ключевые ссылки на повторяющуюся информацию, которая находится во вспомогательных таблицах.

В ходе реализации структуры информационной системы производим логическое связывание таблиц и создаем представление БД, которое формулирует результирующую таблицу с подставленными значениями ключей. Поскольку манипулирование интерфейсом СУБД для обычного пользователя – сложная задача, предлагаем использовать инструмент Report Builder для создания макета отчета с включением отображения графического отображения соответствующих атрибутов.

Работа с приложением Report Builder начинается с подключения БД, находящейся на сервере, и создания набора данных на основе принятой структуры БД. Набор данных может отображать любые столбцы таблиц БД, но в нашем случае это столбцы из ранее созданного представления.

Файл макета отчета в Report Builder должен представлять собой сводную ведомость с необходимой информацией, которая была определена ранее. Для этого в режиме конструктора описывается таблица, которая содержит три родительских атрибута («Входит в»; «Материал»; «Сортамент») (рис. 2), а также столбец «Масса заготовки». Все эти столбцы будут автоматически заполнены информацией из производной таблицы БД. Однако для достижения поставленной цели необходимо добавить еще один столбец «Масса материала заготовки». Для заполнения этого столбца необходимо вставить выражение, которое будет суммировать параметры из столбца «Масса заготовки» каждой группы «Сортамент». По необходимости также можно отобразить графическую информацию об объекте [2].

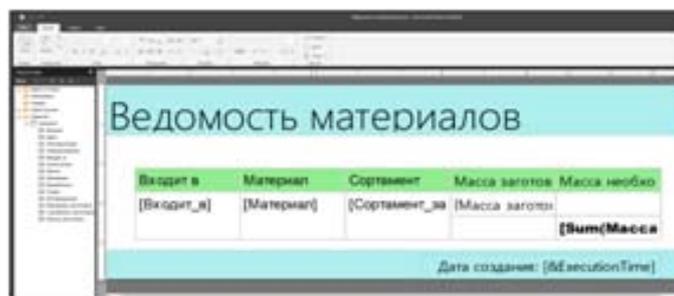


Рис. 2. Макет отчета в среде Report Builder

После наполнения БД мы можем получить отчет в виде ведомости материалов (рис. 3), в котором представлено, какое количество материала необходимо закупить для изготовления каждой единицы изделия. Полученный отчет может быть экспортирован в различных форматах: Word, Excel, PDF, TIFF и т. д. Это дает возможность использовать файлы отчетов в различных вторичных системах.

Виды и материалы	Сортмент изделий	Масса заготовки	Масса необходимого материала заготовки
236 00 00 00-81			
2304 1201047 ШР35			
	15KH2TA	Круг 100	8,20
			2,40
			3,30
			3,80
			<b>17,70</b>
		Круг 200	2,80
			<b>2,80</b>
		Круг 210	2,50
			<b>2,50</b>
	Сталь 40	Круг 80	0,80
			<b>0,80</b>
		Пластина	0,30
			<b>0,30</b>
	157	Прокладка	1,00
			0,80
			<b>1,80</b>

Дата создания: 26.10.2023 16:36:07

Рис. 3. Сформированная ведомость материалов

В результате реализован автоматизированный способ подсчета количества материала для обеспечения производственных мощностей. Такая схема благодаря вариативности настройки с легкостью разворачивается на любом предприятии и формирует предпосылки к созданию единого информационного пространства.

Таким образом, применение Report Builder позволяет сконструировать любую конечную структуру таблицы ведомости материалов и при этом отобразить файлы изображений объектов БД без создания программного кода на алгоритмических языках.

При дальнейшем развитии данной методики можно предложить интерфейс, предоставляющий пользователю режим работы без прямого взаимодействия с СУБД [3].

#### Л и т е р а т у р а

1. Андреасян, Г. М. Планирование материальных потребностей (MRP) / Г. М. Андреасян, М. Е. Федоров // Экономика и социум. – 2021. – № 4–1 (83). – С. 612–616.
2. Леон, К. С. Сравнение методик реализации информационного обеспечения на основе СУБД MS SQL Server и PDM-системы ЛОЦМАН: PLM / К. С. Леон, О. Н. Калачев // Семьдесят шестая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием : сб. мат. конф., Ярославль, 19–20 апр. 2023 г. : в 3 ч. / Яросл. гос. техн. ун-т. – Ярославль, 2022. – С. 44–49.
3. Пашкин, П. В. Разработка автоматизированной системы оценки технологичности конструкции изделия на основе данных PDM-системы / П. В. Пашкин, О. Н. Калачев // Информатика и вычислительная техника : сб. науч. тр. / Ульян. гос. техн. ун-т. – Ульяновск, 2011. – С. 316–320.

УДК 621.78.72:621.431.73

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В РАБОТЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

О. Ю. Латышев<sup>1</sup>, П. А. Латышева<sup>1</sup>, М. Луизетто<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Международная Мариинская академия имени М. Д. Шаповаленко,  
г. Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>Международная Мариинская академия имени М. Д. Шаповаленко,  
г. Пьяченца, Итальянская Республика

Для повышения эффективности работы машиностроительного предприятия Международная Мариинская академия имени М. Д. Шаповаленко предлагает использовать ряд передовых энергоэффективных технологий в следующих проектах.

**Проект «Солнечный город».** Стратегически каждый квадратный сантиметр площади каждого здания в экстерьере и интерьере, а также крыши автобанов и любых других сооружений должны вырабатывать электроэнергию за счет солнечных панелей, трансформированных в обшивку, декор и все твердые покрытия. Бесплатное предоставление земельных участков и полное освобождение от налогов достаточно быстро приводит к открытию максимально необходимого в данном случае количества компаний, которые специализируются на производстве и монтаже панелей солнечных батарей, прилагающихся к ним инверторов, аккумуляторов и других их составляющих. Благодаря этому панели солнечных батарей имеют различный размер и различную конфигурацию, что позволяет рационально использовать каждый квадратный дециметр здания в целях выработки солнечной энергии для его освещения, охлаждения, а также для работы разнообразных электроприборов. При этом солнечные панели должны размещаться на внутренних и наружных стенах, полах внутренних помещений и тротуарах на прилегающей к зданию территории, а также на крышах. Окна, в которых вместо обычных стекол будут помещены электростекла, также должны выполнять функции солнечных батарей. На данный момент эффективность электростекол все еще значительно уступает настенным панелям солнечных батарей, но при этом выдерживается ключевой в данном случае принцип полного использования площади здания для выработки энергии, и все компоненты его конструкции, вне зависимости от КПД, включены в общую энергетическую цепь. При этом электростекла могут полностью заменить наружную обшивку здания, благодаря чему в него попадет необходимое количество света, хотя часть его и будет забрана электростеклами. Их достаточно низкий КПД компенсируется тем, что они берут на себя часть энергетического потока солнечного света. Это будет происходить более эффективно, потому что электростекла будут закреплены под наклоном, чтобы дополнительно снизить уровень естественного перегрева здания. Это позволяет уменьшить естественный нагрев конструкции здания в особенно жаркие месяцы года. При этом электроэнергия для работы кондиционеров и вентиляторов будет израсходована в значительно меньшей мере. Хотя эффективность использования электростекол в настоящий момент не превышает 7 %, это не мешает одновременно всему зданию быть солнечной электростанцией. В годы, которые будут отделять от осуществления данного проекта, предстоит найти наилучшие пути повышения КПД электростекол, чтобы не только само здание, но и электромобили его жителей могли подзаряжаться на парковке у дома, пока владельцы никуда не едут [1].

**Проект «Могучий ветер».** Следует включить ветрогенераторы во все конструкционные элементы зданий и иных сооружений, присутствие которых позволяет сохранять должный уровень безопасности жителей, работников и комфорт их нахождения в здании. Для этого предстоит найти изящное архитектурное решение, в результате внедрения которого ветрогенераторы не только не испортят изначальный архитектурный замысел, но и внесут в него интересное дополнение. Например, форма и дизайн здания может имитировать некий летательный аппарат, а ветрогенераторы, соответственно, – пропеллеры на его поверхности. Поскольку обилие ветрогенераторов на поверхности здания будет вызывать значительный шум, по мере внедрения проекта в столичную городскую среду будет необходимо найти достаточно эффективные средства шумопонижения.

**Проект «Зеленый шум».** Особые мембраны соберут энергию шума, издаваемого человеческим голосом и голосами животных и птиц, а также искусственными источниками шума, и позволят использовать данный энергетический поток для нужд человека. Достаточно широкое применение в современных энергосберегающих проектах найдет использование шумового потока как источника энергии. Для этого вблизи ветрогенераторов, в концертных залах, кинотеатрах, производственных цехах, на автотрассах и других объектах, работа которых сопровождается шумом, нужно установить особые мембраны, которые при воздействии шумового эффекта будут вырабатывать электрическую энергию [2].

**Проект «Зеленый свет».** Солнечный свет и свет ламп в помещении машиностроительного предприятия призван стать вторичным ресурсом, который на данный момент в большинстве своем не используется никаким образом. Но вмонтированные во все поверхности домашнего интерьера солнечные панели различных цветов и конфигураций позволяют многократно использовать один и тот же свет. Солнечный свет, проникающий внутрь здания машиностроительного предприятия, а также свет работающих внутри него электроламп улавливается теперь уже непрозрачными панелями солнечных батарей, размещенными на внутренних стенах, дверях, полах и потолках каждого помещения здания. При этом следует отметить, что обычный вид панелей солнечных батарей, помещенных в интерьер жилого здания, вряд ли бы смог вызвать энтузиазм у его жителей. Поэтому в процессе осуществления данного проекта будет необходимо достичь высоко эстетичного исполнения солнечных панелей за счет надлежащего дизайнерского решения, способного радовать своим внешним видом всех тех, кто находится в данном помещении. Одновременно с этим в дальнейшем потребуются найти такой вид панелей солнечных батарей, который будет соответствовать экологическим требованиям к жилым и нежилым помещениям. Наряду с этим солнечные панели должны быть прочными, особенно те, что расположены на полу, чтобы срок их службы повышал рентабельность данного материала. Согласно замыслу автора, мебель и бытовая техника в здании тоже обшивается солнечными панелями. Бытовые электроприборы призваны хотя бы в какой-то мере обеспечить собственную потребность в электроэнергии, а предметы комнатной обстановки при этом должны будут передавать накопленную ими энергию в аккумуляторные батареи.

Для того чтобы существенно повысить эффективность работы машиностроительного предприятия, Международная Мариинская академия имени М. Д. Шаповаленко в настоящий момент разрабатывает серию новых энергоэффективных технологий в проектах, которые наш коллектив надеется представить на следующей конференции.

## Литература

1. Формирование адекватных ответов на ключевые вызовы эпохи современному обществу / О. Ю. Латышев [и др.] // Молодежь и наука: от исследовательского поиска к продуктивным решениям : сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Иркутск, 20 апр. 2023 : в 2 т. – Иркутск, 2023. – Т. 2. – С. 60–64.
2. Влияние деятельности современных российских архитекторов и дизайнеров на облик Дубая / О. Ю. Латышев [и др.] // Большая Евразия. Развитие, безопасность, сотрудничество : материалы V Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. / ИНИОН РАН ; отв. ред. В. И. Герасимов. – М., 2023. – Ч. 2. – С. 336–341.

УДК 622

**ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРОВОЛОКИ В РИХТОВКЕ  
НА СНИЖЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ****Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартьянов***Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

Для уменьшения уровня релаксации остаточных напряжений в проволоке необходимо снизить непосредственно уровень этих остаточных напряжений [1]. Для этого используются роликовые устройства, работающие по принципу знакопеременного изгиба. Рихтовальное устройство не влияет на механические свойства проволоки и не изменяет класс прочности продукции. Работа роликового рихтовального устройства регулируется за счет изменения вертикального положения ряда подвижных роликов, при этом регулируется глубина проработки проволоки на данных роликах. Интенсивность воздействия роликов на проволоку регламентируется вертикальным положением роликов рихтовки. Существует основной принцип настройки роликового рихтовального устройства: в случае если пар роликов рихтовального устройства больше двух, то его настраивают таким образом, чтобы первые пары роликов воздействовали на проволоку минимально, а последующие пары роликов увеличивали свое воздействие на нее.

Цель работы – исследовать способы деформации проволоки в рихтовке, позволяющие эффективно снижать остаточные напряжения с помощью численного моделирования.

Для снижения уровня остаточных напряжений предлагается использовать специальный способ заправки тонкой проволоки в рихтовальное устройство.

В качестве объекта исследования выступает тонкая высокопрочная проволока диаметром 0,30 мм класса прочности НТ (прочность – 3000 МПа). Скорость прохождения через рихтовку – 150 мм/с. Диаметр роликов рихтовального устройства по дну проточки – 13 мм. Варьируемым параметром является изменение расстояния между верхней и нижней секциями роликов рихтовки.

По результатам моделирования определены эквивалентные активные и остаточные напряжения в тонкой проволоке, возникающие в процессе плоского изгиба. Результаты сведены в диаграммы. Зависимость величины максимальных эквивалентных напряжений от количества роликов рихтовки для различных положений роликов (мм) представлена на рис. 1.

Аналогичные данные получены для всех порядковых номеров изгибов семироликовой рихтовки. Определено, что наиболее равномерным воздействием на проволоку имеет рихтовка с верхним положением роликов в 2,5 мм. Однако в совокупности такое положение роликов обеспечивает высокий уровень остаточных напряжений в проволоке.

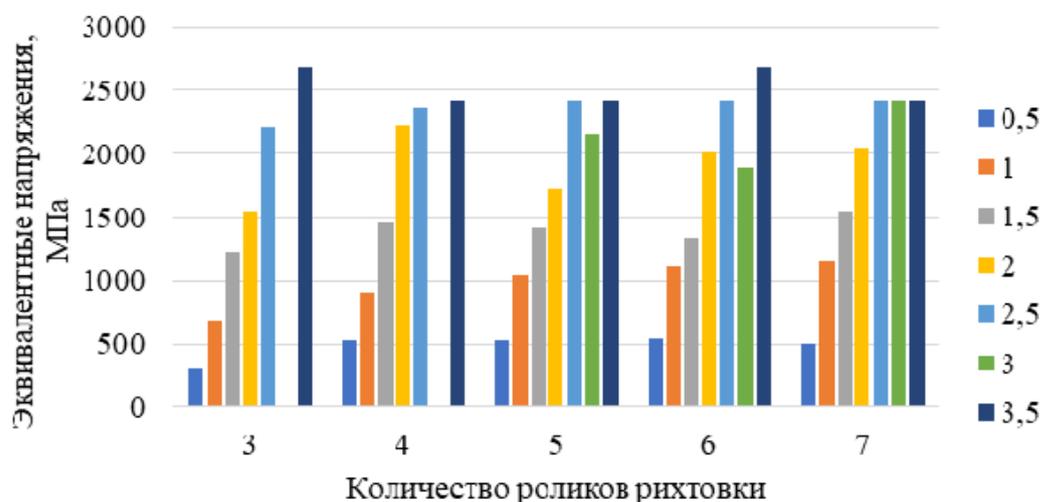


Рис. 1. Зависимость величины максимальных эквивалентных напряжений от количества роликов рихтовки для различных положений роликов (мм). Изгиб № 2 (от входа в рихтовальное устройство)

Произведены механические испытания тонкой проволоки на разрывной испытательной машине INSTRON 5969. Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что предел прочности проволоки в среднем возрастает на величины до 2–4 %, а относительное удлинение проволоки изменяется в диапазоне 2,17–3,22 %, что соответствует классу прочности НТ.

Относительная обрывность проволоки при свивке металлокорда в значительной степени зависит от относительного удлинения тонкой проволоки. Наибольшее значение относительного удлинения тонкая проволока имеет при прохождении через четыре знакопеременных изгиба роликовой рихтовки с положением роликов в 2,5 мм.

При использовании способа заправки тонкой проволоки для четырех роликов рихтовального устройства для тонкой проволоки проявляется наибольшая интенсивность релаксации остаточных напряжений. Это позволяет значительно снизить уровень остаточных напряжений в проволоке.

Таким образом, определен способ деформации проволоки в рихтовальное устройство, позволяющий обеспечить наибольшую интенсивность релаксации остаточных напряжений в проволоке. Это позволит улучшить технологические свойства проволоки.

#### Литература

1. Разработка способов прогнозирования физико-механических свойств тонкой проволоки с целью повышения технологичности свивки металлокорда / Е. С. Ельцова [и др.] // Литейное производство и металлургия – 2022. Беларусь : тр. 30-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16–18 нояб. 2022 г. / Белорус. науч.-техн. ун-т ; под общ. ред. академика Е. И. Маруковича. – Минск, 2022. – С. 110–114.
2. Бобарикин, Ю. Л. Новый подход в определении оптимального диаметра деформирующего ролика канатной машины для улучшения технологических свойств металлокорда / Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартыянов, О. Ю. Ходосовская // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. / редкол.: В. Г. Залесский [и др.]. – Минск, 2022. – С. 29–38.

УДК 621.923

## МОДЕРНИЗАЦИЯ СРЕДСТВАМИ T-FLEX ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС НА ОАО «ГОМСЕЛЬМАШ»

Т. Д. Стасенко, Д. Л. Стасенко

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

Информационная база T-FLEX Технология содержит большое количество справочников по составляющим технологических процессов – это наименования операций, оборудование и т. д. Имеются средства поиска и ускоренного подбора оснащения по различным условиям, а также механизмы фильтрации данных.

Шлифование зубьев в технологическом процессе изготовления зубчатого колеса – самая трудоемкая и дорогая операция. Она требует применения совершенных технических средств ее реализации и наукоемких методов управления точностью, в том числе и для исключения брака по прижогам, подрезам зубьев. Именно на этой операции формируются конечные геометрические параметры прецизионного колеса и его качественные характеристики, определяющие эксплуатационные показатели зацепления. Зубошлифование производят в основном при изготовлении колес повышенной точности с термической обработкой. Различают два метода шлифования: копирование и обкатка (рис. 1). Однако шлифование ухудшает качество поверхностного слоя и его физико-механические свойства, так как выделяемое при шлифовании тепло вызывает структурные изменения в поверхностном слое в виде прижогов и внутренних растягивающих напряжений [1].

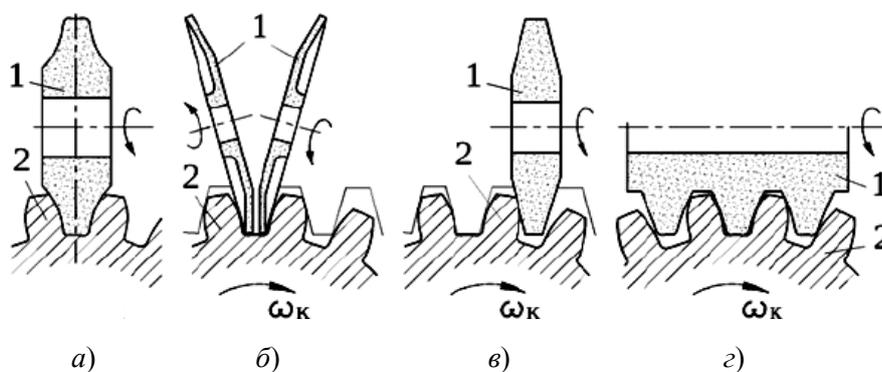


Рис. 1. Методы шлифования профиля зубьев цилиндрических колес:  
*а* – модульными абразивными кругами; *б* – тарельчатыми абразивными  
 кругами; *в* – абразивными кругами с трапециодальным профилем;  
*г* – червячными абразивными кругами; *1* – абразивный круг;  
*2* – зубчатое колесо

Для доводки зубьев термически обработанных колес применяется зубохонингование (рис. 2), которое представляет собой высокопроизводительный процесс окончательной доводки зубьев цилиндрических колес с помощью зубчатого алмазного или абразивного колеса (хона), что позволяет повысить качество пятна контакта, плавность передачи, уменьшить шероховатость рабочих поверхностей зуба и уровень шума передачи [2].

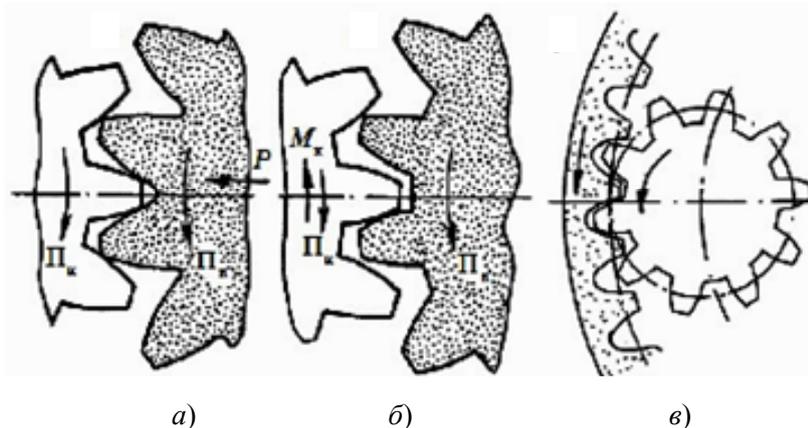


Рис. 2. Схемы зубохонингования при различном зацеплении зубьев хона:  
 а – двухпрофильное зацепление; б – однопрофильное зацепление;  
 в – «коронарное» зубохонингование

Задача исследования – совершенствование средствами T-FLEX технологического процесса изготовления цилиндрического зубчатого колеса КЗК-1624-0107614, устанавливаемого на наружную цилиндрическую поверхность полу корпуса дифференциала. Конструкторской документацией определены требования, предъявляемые к зубчатому венцу с числом зубьев  $z = 49$ , модулем  $m = 6$  и шириной  $b = 50$  мм. Твердость поверхностей зубьев обеспечивается цементацией на глубину 0,9–1,4 мм с последующей закалкой до поверхностной твердости HRC 58–64. Зубчатый венец изготавливают по 8-В степени точности согласно ГОСТ 1643–81. Шероховатость профилей зубьев не должна превышать  $Ra \leq 2,5$  мкм. Оптимальный контакт зацепления обеспечивается за счет применения модификации профиля по головке зуба, глубина контакта составляет  $f_k = 0,01–0,02$  мм, длина его развернутости – 0,09 мм.

Однако, снижение шероховатости до  $Ra = 0,25$  мкм позволяет повысить срок службы колеса более чем на 50 %, что связано с толщиной масляной пленки, которая в свою очередь зависит от шероховатости. Уменьшение шероховатости является одним из способов увеличения удельной толщины масляной пленки. На операцию зубошлифования цилиндрическое зубчатое колесо поступает после химико-термических операций с шероховатостью профиля зубьев  $Ra = 3,05$  мкм. Снижение себестоимости изготовления одного зубчатого колеса можно достичь уменьшением времени отдельных операций.

Анализируя базовый технологический процесс, было установлено, что время операции 170 – Зубошлифование составляет 93 из 242 мин общего времени обработки – более 38 %, а лимитирующими операциями являются операции 020–030 – Токарные с числовым программным управлением (ЧПУ) и 040 – Зубофрезерная, на которых  $T_{шк} \approx 30$  мин. Кроме того, такие операции, как 080 – Фрезерная с ЧПУ и 090 – Сверлильная, выполняются последовательно, что требует дополнительного рабочего места для выполнения сверления, причем время сверлильной операции составляет 3,32 мин. Для снижения себестоимости производства предлагается внести следующие изменения в технологический процесс: перераспределить переходы на токарных операциях с ЧПУ 010–030 так, чтобы уменьшить их количество; объединить операции 110 торцешлифование и 140 – Внутришлифовальную, которые по времени составляют 6,45 и 3,32 мин, соответственно, заменить операцию 170 – Зубошлифование на станке ВЗ-676 Ф4 на шлифование червячным абразивным кру-

гом на станке Reichauer RZ 410, что позволит сократить время обработки зубошлифованием на 30 %, т. е. до 60 минут, однако для обеспечения такта выпуска 30 мин понадобится два таких станка.

Оценка экономической целесообразности обеспечения равной точности венца различными методами зубообработки показала, что затраты на зубофрезерование и шевингование в два раза ниже, по сравнению с зубошлифованием. Если оценивать тенденции технологии изготовления зарубежных зубчатых передач, то для получения нормы точности 7 и 8-7-7 по ГОСТ 1643–81 можно успешно использовать технологические процессы без зубошлифования, поэтому за рубежом получила распространение следующая технология: фрезерование – шевингование – термообработка – хонингование.

При использовании станков с ЧПУ маршрут изготовления зубчатых колес будет иметь следующий вид: токарная обработка на станках с ЧПУ – зубофрезерование на станках с ЧПУ с базированием по центровым отверстиям – термообработка – зубохонингованием алмазным хоним. Такой подход обеспечит использование на последней операции единицы оборудования, так как зубохонингование составляет 30 мин.

Таким образом, на основе проведенного анализа предложен современный вариант технологического маршрута изготовления зубчатых колес, основой которого является использование станков с ЧПУ. Перечисленные выше предложения по изменению технологического процесса в значительной мере будут способствовать снижению себестоимости изготовления детали и будут способствовать росту производительности труда.

#### Литература

1. Макаров, В. Ф. Обработка зубчатых колес сборными шлифовально-профильными кругами / В. Ф. Макаров // Вестн. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 79–87.
2. Механическая обработка зубчатых колес : учеб. пособие / В. И. Жиганов [и др.]. – Ульяновск : УлГТУ, 2011. – 134 с.

УДК 621.9

## АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УДОВЛЕТВОРЕННОСТИ ПОТРЕБНОСТЕЙ

А. Ю. Бердин

*ОАО «СтанкоГомель», Республика Беларусь*

На конкурентных рынках для сохранения (или увеличения) доли рынка крайне важно повышать удовлетворенность клиентов. Удовлетворенность клиентов способствует их лояльности и увеличению доходов.

С другой стороны, неудовлетворенность, которая имеет быстрый и противоположный эффект. Даже всего один-два случая некачественного обслуживания могут привести к потере клиента. Мы провели анализ и выяснили, что 59 % клиентов готовы перейти к конкуренту из-за некачественного обслуживания.

Чтобы не переживать из-за потери клиентов по причине их неудовлетворенности, рассмотрим, как измерить удовлетворенность клиентов, а также связанные с ней показатели.

Этапы измерения удовлетворенности клиентов:

- 1) определить показатели для измерения удовлетворенности клиентов;
- 2) определить цели и создать ключевые показатели эффективности (КПЭ);

3) выбрать способы сбора соответствующих данных;

4) проанализировать данные.

#### **Зачем измерять удовлетворенность клиентов?**

Поскольку от факторов, влияющих на клиентов, таких как предоставление продуктов и услуг и обслуживание, зависит очень многое, необходимо определить, как измерить удовлетворенность клиентов, чтобы отслеживать ее и управлять ею. Она покажет, как клиенты относятся к вашей компании и в какой мере продукты и услуги приносят ожидаемые результаты.

#### **Что такое удовлетворенность клиентов?**

Говоря простым языком, удовлетворенность клиентов – это мера того, насколько клиенты довольны вашими продуктами и услугами. Сначала может казаться, что ее невозможно измерить.

Ведь как можно измерить то, насколько человек доволен? Тем не менее если определить элементы, влияющие на удовлетворенность клиентов, то можно увидеть, что их легко измерять и отслеживать.

Факторы, влияющие на удовлетворенность клиентов, включают в себя то, насколько хорошо компания соответствует ожиданиям клиентов, а также ценность и качество, которые клиенты видят в продуктах и услугах. Клиенты могут оценивать эти факторы, тем самым предоставляя способы измерения их удовлетворенности.

#### **Сравнение удовлетворенности клиентов и успеха клиентов**

Иногда термины «удовлетворенность клиентов» и «успех клиентов» используют как синонимы, хотя у них разные определения. Деятельность по обеспечению успеха клиентов включает в себя проактивное удовлетворение потребностей клиентов, построение крепких отношений и повышение пожизненной ценности клиентов (LTV), а также привлечение клиентов к поддержке вашей компании.

Удовлетворенность клиентов – это составляющая успеха клиентов, что служит еще одним аргументом в пользу ее тщательного отслеживания и измерения.

#### **Четыре основных показателя удовлетворенности клиентов**

При измерении удовлетворенности клиентов рассматривайте четыре показателя, представленных ниже, и выбирайте лучший из них или их сочетание, чтобы получить необходимую информацию.

##### *Индекс удовлетворенности клиентов (CSAT)*

Индекс CSAT определяется по результатам простого опроса, в котором клиенты оценивают уровень своей удовлетворенности по пятибалльной шкале. Можно задавать конкретные вопросы, например, «Насколько вы удовлетворены результатом звонка в нашу службу поддержки клиентов?» или «Насколько вы удовлетворены нашим обновленным объектом?».

После проведения опроса необходимо разделить количество людей, которые оценили свою удовлетворенность на 4 или 5 баллов, на общее количество участников опроса. Чтобы получить результат в процентах, необходимо умножить это значение на 100.

##### *Показатель лояльности клиентов (NPS)*

Если рассматривать CSAT и NPS, то в последнем показателе используется несколько иной подход к измерению удовлетворенности клиентов. В рамках этого метода задается всего один вопрос: «Насколько вероятно, что вы порекомендуете нашу компанию коллеге, другу или члену семьи?»

Клиенты, которые ставят 9 или 10 баллов, – «сторонники»; которые ставят 6 или меньше баллов, – «критики». В расчет показателя не берутся клиенты, которые выбрали значение 7 или 8 («пассивные»).

Определяется процент «сторонников» и «критиков» и разница между ними. Вот, что представляет собой NPS.

Полезно сравнивать свой показатель NPS с показателями других компаний в отрасли, поскольку эталонные показатели обслуживания клиентов могут отличаться. Кроме того, следует отслеживать значение показателя NPS в динамике, чтобы не допустить его снижения, особенно если вносятся изменения в продукты, услуги или процессы.

#### *Индекс усилий клиентов (CES)*

Для определения CES, как и CSAT, используются опросы. Тем не менее эти вопросы задаются с целью узнать, насколько клиентам легко или сложно взаимодействовать с компанией.

В целом, если большинство клиентов сообщают о плохом опыте, ставя низкую оценку, то необходимо более углубленно рассмотреть эти случаи, чтобы не допустить увеличения оттока клиентов.

#### *Показатель удержания клиентов*

Поскольку показатель удовлетворенности и показатель лояльности клиентов пропорциональны, необходимо регулярно отслеживать показатель удержания клиентов. Так вы будете знать, сколько клиентов останется у вашей компании и скольких она потеряет.

Если показатель измеряется ежеквартально, необходимо отнять количество клиентов, привлеченных за этот период, от общего количества клиентов. Затем необходимо разделить полученное значение на количество клиентов, которое было в начале квартала, и умножить на 100. Так вы получите показатель удержания клиентов.

Уменьшение этого показателя может указывать на низкую удовлетворенность клиентов. В этом случае вам необходимо сразу же начать искать первопричины и принять меры, чтобы линия тренда пошла вверх.

#### **Как измерить удовлетворенность клиентов с помощью КПЭ?**

Хорошо спланированная стратегия даст вам наиболее точное представление о том, как клиенты относятся к вашей компании. Представленные далее четыре шага помогут вам подготовиться к наиболее осмысленному измерению уровня удовлетворенности клиентов.

#### **Цели и план сбора данных**

Первый шаг – решить, что вы хотите узнать у клиентов. Вас, в первую очередь, интересуют их впечатления от взаимодействия со службой поддержки клиентов? Хотите узнать, что они думают о качестве ваших продуктов? Или же измерить общий уровень удовлетворенности?

Установите цели и определите, какие КПЭ службы поддержки клиентов предоставят вам необходимую информацию и какой метод вы будете использовать для сбора данных.

#### **Основные вопросы для опроса**

Следующий шаг для измерения удовлетворенности клиентов – составить вопросы. От типов задаваемых вопросов будут зависеть методы опроса, среди которых вы будете выбирать. При этом для получения необходимой информации требуется, чтобы вопросы были четкие и краткие.

Учитывайте, что вам необходимо поощрять клиентов к прохождению опроса, чтобы вы получили ответы от достаточного количества представителей клиентской базы. Клиентам легче отвечать на вопросы с оценкой, чем на открытые вопросы. Такие вопросы помогут привлечь к опросу больше респондентов.

### **Проведение опроса**

После подготовки плана и опроса для клиентов попросите их пройти опрос.

Создайте для людей удобный способ делиться с вами обратной связью. Например, задавайте всего один-два вопроса при оформлении заказа. Для приглашения клиентов к участию можно использовать всплывающее сообщение в приложении для контактного центра или на веб-сайте.

Указание QR-кода или ссылки на онлайн-опрос в квитанции или сообщении электронной почты – тоже эффективный способ для вашей компании. Кроме того, можно увеличить количество участников с помощью поощрения, например, скидки на будущую покупку или подарочной карты.

### **Анализ данных и использование их для принятия решений**

После получения ответов на опрос выделите время на то, чтобы проанализировать данные. Кроме того, если вы обнаружите, что на том или ином этапе цикла взаимодействия с клиентами у клиентов наблюдается низкий уровень удовлетворенности, примите меры для его повышения.

UDC 631.15

## **ERP NEXT: REVOLUTIONIZING MANUFACTURING MANAGEMENT IN FACTORIES**

**M. A. M. K. AL-Aimiri<sup>1</sup>, M. F. S. H. AL-Kamali<sup>2,3</sup>**

*<sup>1</sup>Lovely Professional University, the Republic of India*

*<sup>2</sup>Scientific Association for Research and Innovations, Taiz, the Republic of Yemen*

*<sup>3</sup>Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

In the fast-paced world of manufacturing, efficient management of operations is vital for success. To streamline processes, improve productivity, and enhance overall performance, factories are turning to comprehensive software solutions. One such solution is ERP NEXT, a powerful Enterprise Resource Planning (ERP) program that caters to the specific needs of manufacturing facilities. ERP NEXT provides a centralized platform that integrates various functions within a factory, including production planning, inventory management, procurement, quality control, and financials. This integration eliminates data silos, enables real-time collaboration, and facilitates seamless communication between different departments. With all essential information accessible from a single system, decision-making becomes more informed and efficient. ERP NEXT it is an alternative to SAP and an ERP solution that is entirely free. It is inexpensive, well-maintained, versatile, easy to use, and actively maintained. ERP NEXT is a dependable, dependable, and extremely adjustable system. For small and medium-sized businesses, it works best (fig. 1). Businesses in the manufacturing, retail, distribution, healthcare, education, non-profit, and agricultural sectors are best suited for ERP NEXT. Accounting, warehouse management, CRM, sales, purchase, HRMS, project management, support, asset management, quality control, manufacturing, website management, ERP NEXT setup and many more business unit management functions are supported by ERP NEXT (fig. 2). Web-based ERP ERP NEXT comes with pre-installed mobile applications for Android and iPhone. You can run your business on the go with the help of the mobile app. Integrations with Google, Slack, Dropbox, PayPal, Stripe, WooCommerce, Shopify and many more platforms are supported by ERP NEXT. JavaScript, MariaDB, and Python are the foundations of ERP NEXT. This free ERP solution is available under the GPL-3.0 license.

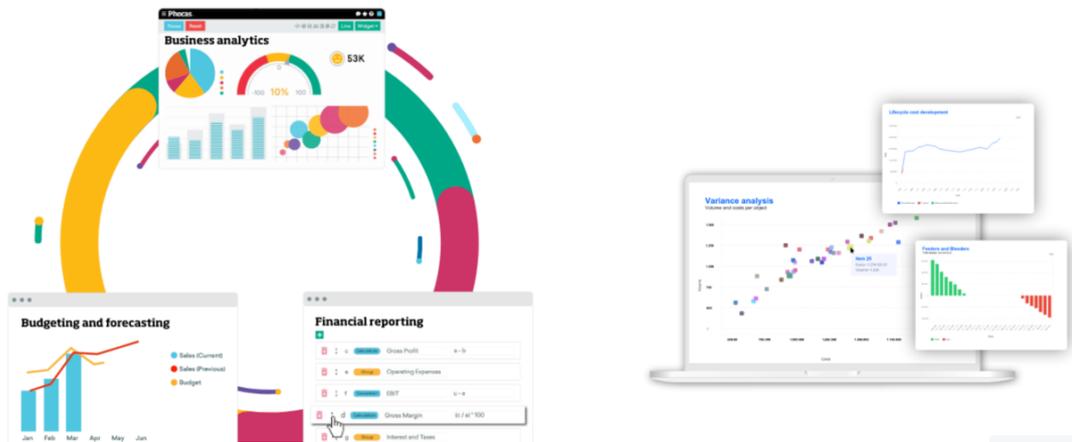


Fig. 1. Screenshot of ERPNext, a free business program utilized by small and medium-sized companies



Fig. 2. ERPNEXT oman modules

One of the primary advantages of ERPNEXT in manufacturing management is its robust production planning and scheduling capabilities. The program allows factories to create accurate production plans based on demand forecasts, available resources, and production capacities. Efficient scheduling ensures optimal utilization of machines, labor, and materials. ERPNEXT also provides visibility into the production process, enabling managers to track progress, identify bottlenecks, and make necessary adjustments to meet deadlines.

Inventory management is a critical aspect of manufacturing operations. ERPNEXT offers comprehensive inventory control features, including real-time stock tracking, automated replenishment, and demand forecasting. By maintaining optimal inventory levels, factories can avoid stockouts, reduce carrying costs, and improve overall supply chain efficiency. Additionally, the program supports barcode scanning and batch tracking, enabling accurate traceability and efficient material handling.

Maintaining high-quality standards is paramount in manufacturing. ERPNEXT provides robust quality control functionalities, allowing factories to define quality parameters, conduct inspections, and track defects. With real-time monitoring and automated alerts, potential quality issues can be detected early, minimizing the risk of defective products reaching customers. Furthermore, ERPNEXT's traceability features enable factories to track raw materials, components, and finished goods throughout the production process, ensuring compliance with quality standards and regulatory requirements.

ERPNEXT streamlines supplier management and procurement processes, facilitating efficient collaboration with vendors. The program enables factories to manage supplier information, track performance, and negotiate favorable terms. With integrated purchase order management, factories can automate procurement workflows, generate purchase orders based on demand, and streamline the procurement cycle. This results in reduced lead times, improved cost control, and enhanced supplier relationships.

ERPNEXT offers powerful analytics and reporting capabilities, providing factories with valuable insights into their operations. The program generates customizable reports, dashboards, and visualizations, allowing managers to monitor key performance indicators (KPIs), identify trends, and make data-driven decisions. Real-time analytics enable proactive problem-solving, process optimization, and continuous improvement.

In the dynamic world of manufacturing, efficient management of operations is essential for competitiveness and growth. ERPNEXT emerges as a game-changer, revolutionizing manufacturing management in factories. By providing a centralized platform, efficient production planning, effective inventory management, quality control, streamlined procurement, and real-time analytics, ERPNEXT empowers factories to optimize their processes, enhance productivity, and achieve better overall performance. Embracing ERPNEXT as a comprehensive solution enables factories to stay ahead in a rapidly evolving manufacturing landscape, delivering superior products and meeting the demands of the market with confidence.

#### References

1. ERPNEXT Oman provides customizable enterprise resource planning Software for almost everything you need for your business. – Mode of access: <https://erpnextoman.com/>. – Date of access: 15.12.2023.

UDC 631.15

**STREAMLINING FACTORY OPERATIONS: DESIGNING AN EFFECTIVE MANUFACTURING MANAGEMENT PROGRAM****M. A. M. K. AL-Aimiri<sup>1</sup>, M. F. S. H. AL-Kamali<sup>2,3</sup>**<sup>1</sup>*Lovely Professional University, the Republic of India*<sup>2</sup>*Scientific Association for Research and Innovations, Taiz, the Republic of Yemen*<sup>3</sup>*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

In today's highly competitive manufacturing landscape, efficient and effective management of factory operations is crucial for success. One way to achieve this is by designing a comprehensive manufacturing management program tailored to the specific needs of a factory. Such a program integrates various elements of production, quality control, inventory management, and resource optimization to streamline processes, improve productivity, reduce costs, and enhance overall performance.

The first step in designing a manufacturing management program is to assess the current state of operations. This involves conducting a thorough analysis of the existing processes, workflows, and systems in place. It is essential to identify bottlenecks, inefficiencies, and areas for improvement. This assessment can be done through process mapping, data analysis, and input from key stakeholders, including production managers, operators, and maintenance personnel.

Once the current operations are assessed, it is important to define clear objectives for the manufacturing management program. These objectives should align with the overall business goals and address the identified areas for improvement. Additionally, establishing Key Performance Indicators (KPIs) is crucial for measuring the success of the program. KPIs may include metrics such as production cycle time, on-time delivery, inventory turnover, and quality defect rates.

A Manufacturing Execution System (MES) is a software platform that bridges the gap between the shop floor and the enterprise resource planning (ERP) system. It enables real-time monitoring, control, and coordination of manufacturing operations. Selecting an appropriate MES that aligns with the factory's requirements is a critical decision in designing the manufacturing management program. The MES should have features such as production scheduling, machine monitoring, quality control, and data analytics.

Incorporating lean manufacturing principles is essential for optimizing factory operations. This approach focuses on eliminating waste, reducing variation, and improving overall efficiency. Techniques such as value stream mapping, 5S methodology, standardized work procedures, and continuous improvement initiatives should be integrated into the manufacturing management program. Lean principles promote a culture of continuous improvement and waste reduction, leading to enhanced productivity and quality.

Automation and digital technologies play a significant role in modern manufacturing management. Integrating these technologies into the program can improve accuracy, speed, and reliability. Examples include the use of robotics and cobots (collaborative robots) for repetitive tasks, IoT (Internet of Things) sensors for real-time data collection, and data analytics platforms for performance monitoring and predictive maintenance. These technologies enhance efficiency, reduce errors, and provide valuable insights for decision-making.

An effective manufacturing management program requires a skilled and knowledgeable workforce. Providing training and development opportunities for employees is essential for successful implementation. Training should focus not only on technical skills but also on understanding the program's objectives, processes, and expectations. Engaging em-

ployees in the program's design and implementation fosters a sense of ownership and commitment, leading to better adoption and results.

Designing a program for manufacturing management in factories is a strategic endeavor that requires careful analysis, planning, and implementation. By assessing current operations, defining objectives and KPIs, selecting an appropriate MES, implementing lean principles, utilizing automation and digital technologies, and investing in workforce development, factories can optimize their operations, improve efficiency, and achieve better overall performance. A well-designed manufacturing management program empowers organizations to stay competitive, adapt to changing market demands, and drive continuous improvement in their manufacturing processes.

#### References

1. From Forecasting to Execution: How to Streamline Your Manufacturing Production Planning Process. – Mode of access: <https://www.deskera.com/blog/streamline-manufacturing-production-planning/>. – Date of access: 03.12.2023.
2. Ways to Streamline Your Manufacturing Operations. – Mode of access: <https://asti.com/blog/7-ways-to-streamline-your-manufacturing-operations/>. – Date of access: 23.08.2023.

Научное издание

# ИННОВАЦИОННОЕ СТАНКОСТРОЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИИ И ИНСТРУМЕНТ

МАТЕРИАЛЫ

I Международной научно-практической  
конференции

**Гомель, 30 ноября 2023 года**

Ответственный за выпуск Н. Г. Мансурова

Редактор *О. С. Ковалёва*

Компьютерная верстка *Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 15.04.24.

Формат 60x84/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 12,55. Уч.-изд. л. 9,94.

Тираж 50 экз. Заказ № 236/3.

Издатель и полиграфическое исполнение

Гомельский государственный

технический университет имени П. О. Сухого.

Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя

печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.

пр. Октября, 48, 246746, г. Гомель