

На правах рукописи



БЫЧКОВСКИЙ Владимир Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОЛИАМИДНЫХ
ДЕТАЛЕЙ ЗА СЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАПОЛНЕНИЯ
ИХ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МАСЛОСОДЕРЖАЩЕЙ
ЖИДКОСТЬЮ**

Специальность 2.5.6. Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2024

Работа выполнена
в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего
образования
«Иркутский государственный университет путей сообщения»

- Научный руководитель:** **Филиппенко Николай Григорьевич**,
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Иркутский государственный университет путей
сообщения», доцент кафедры «Автоматизация
производственных процессов» (г. Иркутск)
- Официальные оппоненты:** **Еренков Олег Юрьевич**,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО
«Тихоокеанский государственный университет»,
профессор Высшей школы промышленной
инженерии (г. Хабаровск)
- Сычев Александр Павлович**,
кандидат физико-математических наук, доцент,
ФГБУН «Федеральный исследовательский центр
Южный научный центр Российской академии наук»,
ведущий научный сотрудник лаборатории
транспорта, композиционных материалов и
конструкций (г. Ростов-на-Дону)
- Ведущая организация:** ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского
отделения Российской академии наук» (г. Якутск)

Защита состоится 19 декабря 2024 года в 9⁰⁰ часов на заседании
диссертационного совета 24.2.307.01 в ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» по адресу: 664074, г.
Иркутск, ул. Лермонтова, 83, корпус «К», конференц-зал.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ
ВО «ИРНИТУ» и на официальном сайте университета www.istu.edu.

Автореферат разослан «01» ноября 2024 года.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, подписанные и заверенные печатью
организации, просим выслать по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
ИРНИТУ; ученому секретарю диссертационного совета 24.2.307.01 Вулых Н.В.

E-mail: vulix2011@yandex.ru

Тел./факс: (3952) 40-51-17.

Ученый секретарь диссертационного совета,
к.т.н., доцент



Н.В. Вулых

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

На сегодняшний день существует широкая номенклатура полиамидных изделий, используемых в машиностроении, эксплуатируемых в тяжелых условиях: сухого старта, обедненной или отсутствующей смазки, а также повышенной запыленности и загрязненности.

Чтобы повысить качество полиамидных деталей, применяемых в машиностроительных изделиях, а именно повысить их нагрузочную способность и стойкость к абразивному износу, необходимо решить проблемы технологического обеспечения, что является актуальной задачей.

Исходя из вышеизложенного, к данным деталям предъявляются повышенные требования к их стойкости к абразивному износу при работе под большими нагрузками.

Для повышения качества тяжело нагруженных полиамидных деталей имеются два подхода: первый – это процесс модификации структуры полимера при его производстве;

второй – технологические процессы, позволяющие повысить качество уже готовой полиамидной детали.

При первом подходе возможно проявление некоторых недостатков, связанных с увеличением пластичности и текучести всего объема полиамидной (марки ПАб) детали (ПД). Хотелось бы также отметить, что при сборке и изготовлении изделий из таких материалов создаются сложности с выполнением их неразъемных соединений (сварка, склеивание и т.п.).

Второй подход обладает несомненным достоинством, связанным с возможностью повышения качества поверхностного слоя отдельных поверхностей готовой полиамидной детали. Наиболее перспективным направлением реализации второго подхода является разработка технологических процессов повышения качества поверхностного слоя путем пропитки полиамидных деталей жидким антифрикционным материалом.

При этом существуют проблемы технологического подхода обеспечения повышения качества полиамидных деталей, эксплуатируемых в тяжелых условиях, связанные с отсутствием научно обоснованных технологических процессов маслonaполнения и их режимов и условий обработки, обеспечивающих увеличение износостойкости полиамидных деталей с учетом необходимой глубины пропитки.

Исследования в данной области являются актуальными.

Степень разработанности темы исследования.

В области данной темы проводились исследования различными авторами. Курзина А. М. предлагает применение двухкомпонентной сэндвич-вставки из полиамида и модифицированного полиуретана повышенной плотности. Данное решение обеспечивает значительное снижение коэффициента трения, высокую износостойкость и повышенную жесткость разработанной конструкции вставки. Ярославцев В. М. предлагает метод повышения жесткости деталей из полимерных и композитных материалов с высокой пористостью, конструкций сетчатой структуры, тонкостенных корпусных, сотовых конструкций и т. п. путем пропитки подобных деталей парафином, водой с последующей заморозкой для производства их механической обработки. Буторин Д. В. и Филиппенко Н. Г. предлагают в целях получения полиамидных деталей с повышенной износостойкостью флэш-технология жидкофазного наполнения полиамидов моторными маслами в термовакуумной камере. Liu Li, Liu Jinyang, Yin Shunli

и др. проведены исследования трибологических свойств пропитанных маслом деталей из пористого полиамида, модифицированного редкоземельными соединениями. В работе авторов Петровой П. Н., Федорова А. Л. представлена технология получения износостойких втулок из ПТФЭ путем создания в нем искусственной пористости с последующей пропиткой его моторным маслом.

Необходимо отметить, что представленные авторами результаты относятся к исследованию процесса маслonaполнения материалов с искусственно созданной пористостью, оказывающей отрицательное влияние на прочностные характеристики, и малоприменимы для деталей, эксплуатируемых в тяжелых условиях.

Цель работы: повышение износостойкости полиамидных деталей, работающих в тяжелых условиях, на основе использования технологии маслonaполнения поверхностного слоя детали как финишной операции механической обработки.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Проанализировать современное состояние проблемы технологического обеспечения повышения эксплуатационных характеристик полиамидных деталей, работающих в тяжелых условиях.

2. Определить общие подходы к разработке технологического процесса изготовления деталей из полиамида ПА6 с применением технологии маслonaполнения поверхностного слоя как финишной операции механической обработки, в том числе провести математическое моделирование процесса и экспериментальные исследования с целью определения параметров модели.

3. Сформировать решения по технологическому обеспечению процесса маслonaполнения полиамидных деталей, в том числе:

- разработать технологическое оборудование и оснастку для реализации процесса маслonaполнения и проведения экспериментальных исследований;
- разработать технологический алгоритм обеспечения повышения износостойкости детали из ПА6.

4. Экспериментально подтвердить повышение износостойкости деталей на примере изделий из полиамида марки ПА6 на основе использования разработанной технологии маслonaполнения.

5. Решить задачу определения оптимальных режимов и условий обработки деталей на примере изделий из полиамида марки ПА6.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Предложен новый способ повышения износостойкости полиамидных деталей за счет маслonaполнения их поверхностного слоя.

2. При разработке математической модели маслonaполнения полиамидных деталей впервые использован новый подход к модификации модели плоскопараллельной фильтрации, характеризующийся заменой градиента давления градиентом температуры предварительно нагретой полиамидной детали на основе гидравлического подобия.

3. Разработан новый температурно-динамический способ определения скорости пропитки на основе послыонного контроля динамики изменения температуры в процессе маслonaполнения деталей из полиамидного материала марки ПА6, обеспечивающий определение режимов маслonaполнения.

4. Получены ранее неизвестные зависимости скорости пропитки, скорости абразивного износа и модуля упругости второго рода от вязкости технологической жидкости и температуры детали из полиамида марки ПА6.

Теоретическая значимость работы. Полученные результаты диссертационного исследования позволили установить основные закономерности технологического процесса наполнения полиамидных (ПА6) деталей моторным маслом, в том числе влияние предварительного нагрева детали и вязкости наполнителя на интенсивное испарение гексана из смеси, скорость пропитки, скорость износа и модуль упругости маслonaполненных деталей; влияние глубины маслonaполнения на коэффициент проницаемости и температуры омасленного слоя.

Практическая значимость работы. Разработан новый технологический процесс, основанный на использовании пористой структуры полиамидов и применении специальной технологической жидкости пониженной вязкости и предварительного нагрева, позволяющий повысить износостойкость деталей из полиамида марки ПА6 за счет маслonaполнения их поверхностного слоя. Разработан способ определения глубины наполнения по динамике изменения температуры изделий из полиамидов. Разработаны методики расчета: коэффициента проницаемости полиамида на заданной глубине пропитки на основе экспериментальных данных о температурном градиенте охлаждения полиамидной детали; состава технологической жидкости на основе использования различных смазочных масел; режимов и условий технологического процесса маслonaполнения деталей из различных полиамидных материалов. Для проведения экспериментальных исследований и реализации технологического процесса маслonaполнения разработано оборудование. Выполнена оптимизация технологического процесса маслonaполнения, направленная на минимизацию скорости износа полиамидной детали, на основе которой найдены эффективные режимы маслonaполнения, обеспечивающие значительное повышение износостойкости при заданной величине износа.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы исследования: теоретические, автоматизированные экспериментальные, высшей математики, конечных элементов и конечных разностей, для которого выполнялось компьютерное моделирование в программных комплексах SOLIDWORKS Simulation, SOLIDWORKS Flow Simulation, MSC Sinda. Обработка результатов экспериментальных исследований выполнялась с использованием программ PowerGraph и Microsoft Excel. Для реализации программного обеспечения использовался язык C++.

Положения, выносимые на защиту:

1. Новый способ повышения износостойкости полиамидных деталей, заключающийся в маслonaполнении их поверхностного слоя модифицированной жидкостью пониженной вязкости, позволяющий повысить антифрикционные свойства поверхностного слоя готовых полиамидных деталей в рамках их допустимого износа (п. 4 паспорта специальности 2.5.6).

2. Математическая модель процесса маслonaполнения изделий из полиамида марки ПА6, основанная на системе уравнений неразрывности и законе Дарси, отличающаяся использованием температурного градиента, позволяющая определять режимы и условия обработки (п. 3 паспорта специальности 2.5.6).

3. Решение задачи оптимизации технологического процесса маслonaполнения полиамидных деталей, позволяющая определять режимы и условия обработки, обеспечивающие минимальную скорость износа полиамидной детали. Получены результаты решения задачи оптимизации для вязкости технологической жидкости и температуры полиамидной детали (п. 5 паспорта специальности 2.5.6).

4. Новый технологический алгоритм процесса маслonaполнения полиамидной детали, позволяющий определять оптимальные режимы и условия обработки, с целью обеспечения повышения износостойкости детали из ПАБ за минимальное основное время обработки (п. 7 паспорта специальности 2.5.6).

Достоверность. Достоверность научных результатов подтверждается согласованностью теоретических и экспериментальных научных исследований. Для решения поставленных задач исследования корректно применялись положения технологии машиностроения, а также положения основ физической химии, физики фильтрации пористых тел, термодинамики, электродинамики. В том числе корректным использованием методов математической статистики, аппроксимации, численного анализа.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 33 научных работы, из них 3 публикации в рецензируемых журналах из Перечня изданий, рекомендованных ВАК РФ, 8 публикаций в изданиях, индексируемых международной базой данных Scopus и WoS, 2 патента на изобретение, 6 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ, 1 монография.

Апробация работы и реализация результатов диссертации. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях: Десятой всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь» (г. Иркутск, 2024); Международной научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (г. Москва, 2022); Международной научно-практической конференции «Знания, инновации, технологии» (г. Москва, 2019); Международной научно-практической конференции «Научные революции: сущность и роль в развитии науки и техники» (г. Уфа, 2018); VI Международном научно-практическом симпозиуме «Инновации и устойчивость современной железной дороги» (г. Пекин, 2019).

Использование результатов настоящего исследования подтверждено актами: в лесообработывающей компании «АВИЛЕС»; в учебном процессе в федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ИрГУПС).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, выводов, списка литературы из 134 наименований и 7 приложений. Работа объемом 170 страниц машинописного текста включает 60 рисунков, 21 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена степень разработанности и актуальность темы исследований, основанные на изучении проблемы повышения качества полиамидных деталей. В том числе представлены задачи для достижения поставленной цели, указана научная новизна, сформирована теоретическая и практическая значимость работы, выносимые на защиту положения, применяемые методы исследования, достоверность научных результатов и их апробация.

В первой главе проведен анализ современного технологического обеспечения повышения эксплуатационных характеристик полиамидных деталей, эксплуатируемых в тяжелых условиях, сопровождающихся абразивным износом, сухим стартом и повышенными нагрузками.

Проанализированы условия работы полимерных и композиционных деталей тележки модели 18-578 грузовых вагонов, тележек моторных вагонов электропоездов серии ЭР2Р, ЭР2Т, ЭД2Т, применяемых на железнодорожном транспорте, лесопогрузочного оборудования. Больше распространение, как альтернатива металлам, полу-

чили детали из полиамидных материалов, в том числе сепараторы буксовых узлов (ПА64), вкладыши скользунов в моторвагонах (ПА6, «Тверской институт вагоностроения»), износостойких вкладок подпятников (ПА6), втулки подшипников скольжения шарнирного соединения манипуляторов для нижнескладского оборудования (ПА6), работающих в тяжелых условиях и испытывающих абразивный износ вследствие запыления и попадания грязи в зоны трения, а также в условиях отсутствия достаточной смазки («сухой старт»). Выявлено, что основными требованиями, предъявляемыми к таким деталям, являются показатели износостойкости, значения модуля упругости и твердости.

Литературно-патентный анализ показал, что перспективным направлением повышения эксплуатационных характеристик, срока службы и стойкости к абразивному износу деталей из полиамида марки ПА6 является технологический процесс наполнения поверхностного слоя детали маслом в качестве финишной операции технологического процесса механической обработки, что позволит повысить качество поверхностного слоя полиамидной детали.

По итогу проведенного анализа в главе один поставлены задачи для достижения сформированной цели диссертационного исследования.

Во второй главе на основе научно обоснованных технологических решений определены общие подходы к разработке технологического процесса изготовления деталей из полиамида ПА6 с применением технологии маслonaполнения поверхностного слоя как финишной операции, а также представлена математическая модель процесса маслonaполнения. Предложена наиболее эффективная маршрутная технология изготовления детали повышенной износостойкости.

Определена необходимость проведения кондиционирования готовой ПД и ее сушки с целью восстановления эксплуатационных характеристик, снижающихся в процессе хранения, транспортировки и эксплуатации. Для этого применена высокоэффективная автоматизированная высокочастотная сушка, позволяющая выполнить равномерный и быстрый нагрев детали.

В качестве наполнителя была использована технологическая жидкость с пониженной вязкостью (ТЖВП), состоящая из моторного масла М8-В, наиболее широко используемого среди других по параметрам вязкости, и гексана, повышающего способность смачивать и проникать в поверхностный слой ПД.

Для обеспечения стабильных показателей исследования были назначены начальные условия проведения эксперимента согласно ГОСТ 8.395–80: температура 25 ± 2 °С; давление 750 ± 5 мм рт. ст.; влажность $55 \pm 10\%$.

Для обеспечения сохранности гексана в ТЖВП на основании проведенных экспериментальных исследований температуры интенсивного испарения из смеси и расчетов температуры ее кипения, представленных на рисунке 1, определены граничные условия: максимально допустимая температура ПД 91 °С при содержании гексана 20% в ТЖВП; максимальная температура ПД 52 °С для масляного наполнителя с содержанием гексана 60% в ТЖВП.

В главе представлена новая маршрутная технология обработки полиамидной детали, позволяющая повысить антифрикционные характеристики поверхностного слоя детали в рамках ее допустимого износа, представляющая собой перечень операций, показанных на рисунке 1.

Образцы-свидетели совместно с ПД подвергаются обработке в технологических операциях: 015, 025, 030.

Определение условия и режимов технологического процесса проводилось с ис-

пользованием разработанной математической модели, представленной в главе. Она описывает процесс маслonaполнения изделий из полиамидных материалов, относящихся к гидрофильным, впитывающих до 10% (абсорбция полиамидов). Процесс маслonaполнения рассмотрен в виде однонаправленного капиллярного явления. При моделировании выявлена сложность решения системы уравнений неразрывности и закона Дарси, описывающих процесс плоскопараллельной фильтрации, в связи с невозможностью определения разности давления. Основываясь на принципе гидравлического подобия, была проведена корректировка вышеуказанной математической модели путем замены параметра разности давления на показатель разности температур при охлаждении ПД.

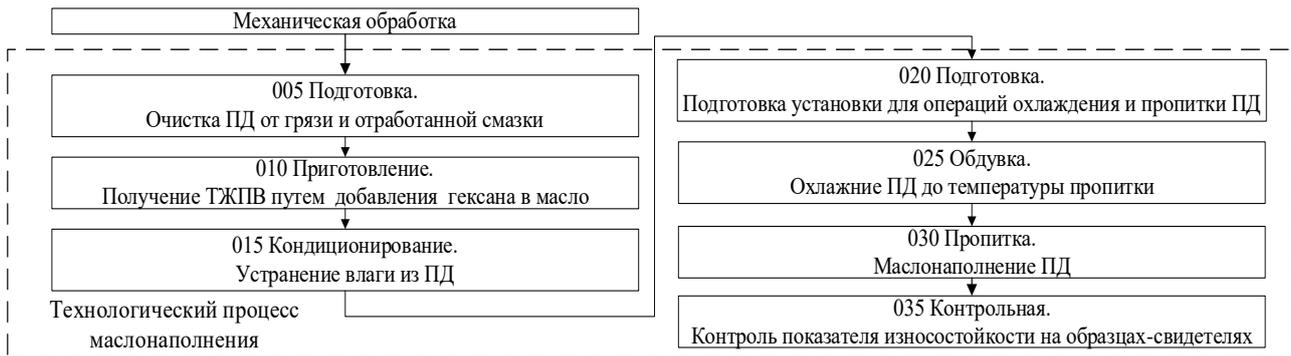


Рисунок 1 – Маршрут технологического процесса маслonaполнения

Получена система уравнений, описывающая поведение условного, полностью пропитанного ТЖПВ полиамидного образца с толщиной равной глубине пропитки (1), представленной на рисунке 2.

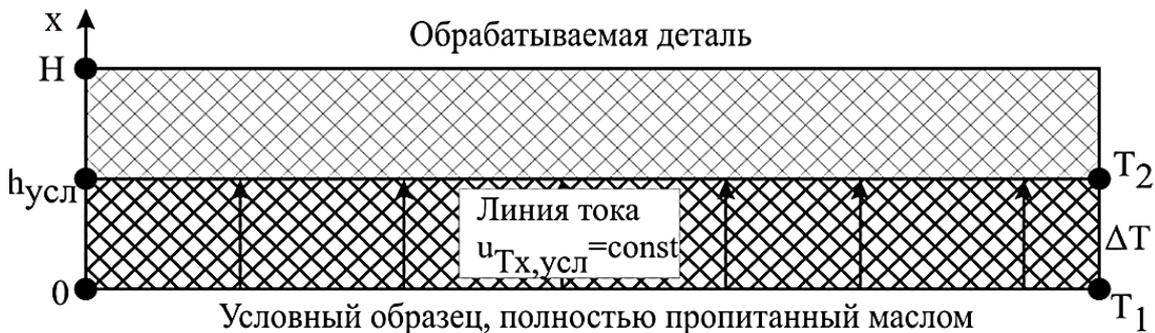


Рисунок 2 – Условный полиамидный образец для математического моделирования

$$\begin{cases} \frac{\partial u_{T_x, усл.}}{\partial x} = 0 \\ u_{T_x, усл.} = -\frac{k_{T_x, усл.}}{\mu} \frac{\partial T_{усл.}(x)}{\partial x}, \end{cases} \quad (1)$$

Начальные условия: температура ПД и вязкость ТЖПВ оптимальные; температура ТЖПВ, 25 ± 2 °С и влажность окружающей среды $55 \pm 10\%$ по ГОСТ 8.395-80.

Граничные условия: при $x=0$: $T_{усл.}(x)=T_1=const$; при $x=h_{усл.}$: $T_{усл.}(x)=T_2=const$; $T_2 > T_1$; условие сохранения потока массы на границе пористой среды и жидкости: $\rho \cdot u_{T_x, усл.} = 0$.

Допущения: боковые границы области непроницаемые; массовые силы отсутствуют; изменение температуры по координате x подчиняется линейному закону.

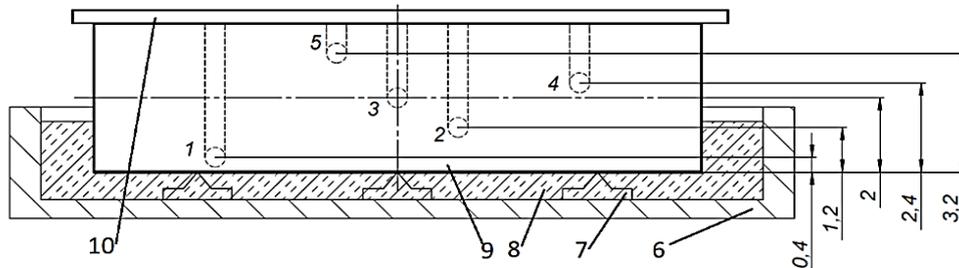
Для разных глубин пропитки средняя скорость $u_{T_x, усл.} = const$. Коэффициент про-

ницаемости пористой среды $k_{Тх,усл.}$, перепад температуры ΔT будут иметь различные значения.

Для определения градиента температуры ΔT и коэффициента $k_{Тх,усл.}$ проницаемости, являющихся параметрами математической модели, разработано устройство контроля температуры и скорости маслonaполнения (рисунок 3).

Для данного устройства был предложен температурно-динамический способ контроля температуры и скорости маслonaполнения, основанный на математических расчетах с использованием программных комплексов SOLIDWORKS Simulation и MSC Sinda, позволяющих определить расположение, размер (не более 2,2 мм) и количество (5 ед.) необходимых термодатчиков, что позволило достичь удовлетворительной погрешности измерения 0,57%.

После чего был проведен натурный эксперимент с использованием полиамидного образца (ПА6) размерами 4x50x50 мм и рабочей жидкости (РЖ) в составе 20% гексана и 80% масла М8-В. Схема устройства маслonaполнения с указанием координат расположения термодатчиков представлена на рисунке 3.



1...5 – термодатчики; 6 – ванна; 7 – опоры; 8 – наполнитель; 9 – полиамидный образец; 10 – теплоизолятор

Рисунок 3 – Схема устройства маслonaполнения

Определение моментов достижения РЖ заданной глубины производилось по изменению скорости падения температуры (моменты соответствуют первой точке минимума функции $V_T=f(\tau)$, где τ – время, V_T – скорость падения температуры), возникающей из-за проникновения жидкости в полиамидный образец, отличающийся своей температурой нагрева. Обработка данных производилась в ПО PowerGraph.

Полученные зависимости температурного градиента ΔT от координаты x в моменты достижения РЖ термодатчиков представлены на рисунке 4.

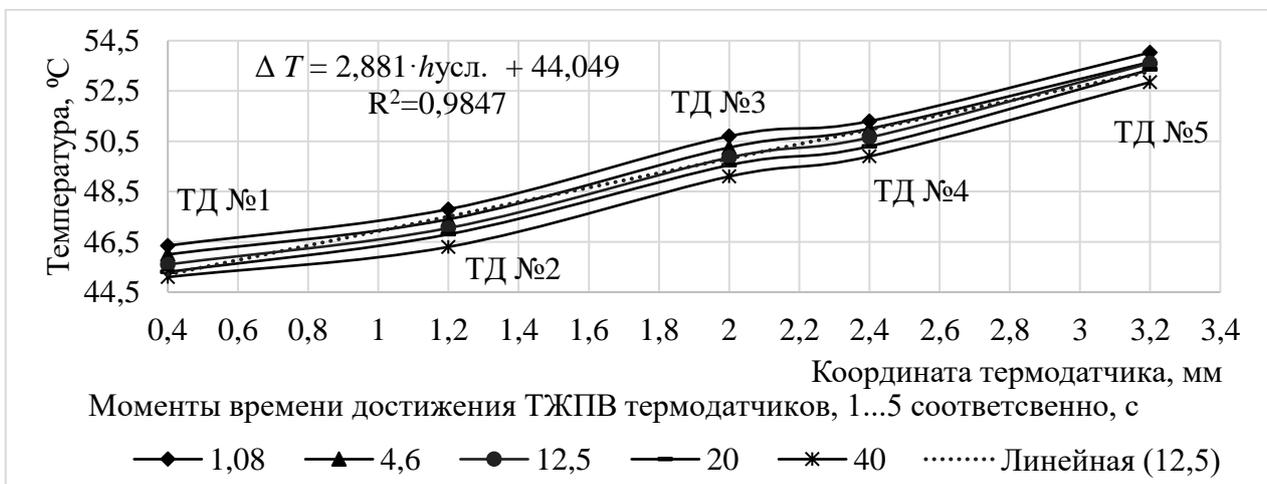


Рисунок 4 – Графики изменения температуры образца в моменты достижения ТЖПВ каждого термодатчика по координатам их расположения

Анализ данных (рисунок 4) подтверждает принятые граничные условия математической модели. Так как температуры на границе раздела жидкость-пористая среда и на толщине условного образца, $h_{\text{усл.}}$, меняются в узком диапазоне (отклонение $\pm 1\%$), они приняты постоянными во времени. Доказано, что изменение температуры от координаты x в различные моменты времени также подчиняется линейному закону.

Кроме этого, выявлено, что для процесса маслonaполнения ПД число Рейнольдса непостоянно, оно зависит от средней скорости пропитки, которая уменьшается с увеличением глубины пропитки.

Представленные на рисунке 4 экспериментальные данные позволили определить коэффициент проницаемости k_T (2) из системы уравнений (1)

$$k_{T_{\text{х усл.}}} = 0,0531h_{\text{усл.}}^3 - 4 \cdot 10^{-4}h_{\text{усл.}}^2 + 7 \cdot 10^{-7}h_{\text{усл.}} - 3 \cdot 10^{-11}. \quad (2)$$

Достоверность аппроксимации составила 0,9998.

Для доказательства работоспособности температурно-динамического способа контроля глубины пропитки были проведены дополнительные экспериментальные исследования с использованием контрастных материалов. В ТЖПВ добавлен синтетический анилиновый краситель трифенилметанового ряда. Определение глубины пропитки проводилось методом оптической микроскопии с использованием микроскопа модели Olympus GX41F с увеличением 100 раз, в поляризованном свете.

Выявлена неравномерность распределения ТЖПВ по линии, характеризующей глубину пропитки, отклонение составило 0,47%. Отклонение расчетной глубины пропитки от экспериментально полученной не превышает 5,74%, что подтверждает адекватность разработанной математической модели.

На основании приведенных результатов теоретических и экспериментальных исследований предложен новый способ повышения износостойкости полиамидных деталей, заключающийся в маслonaполнении их поверхностного слоя модифицированной жидкостью пониженной вязкости.

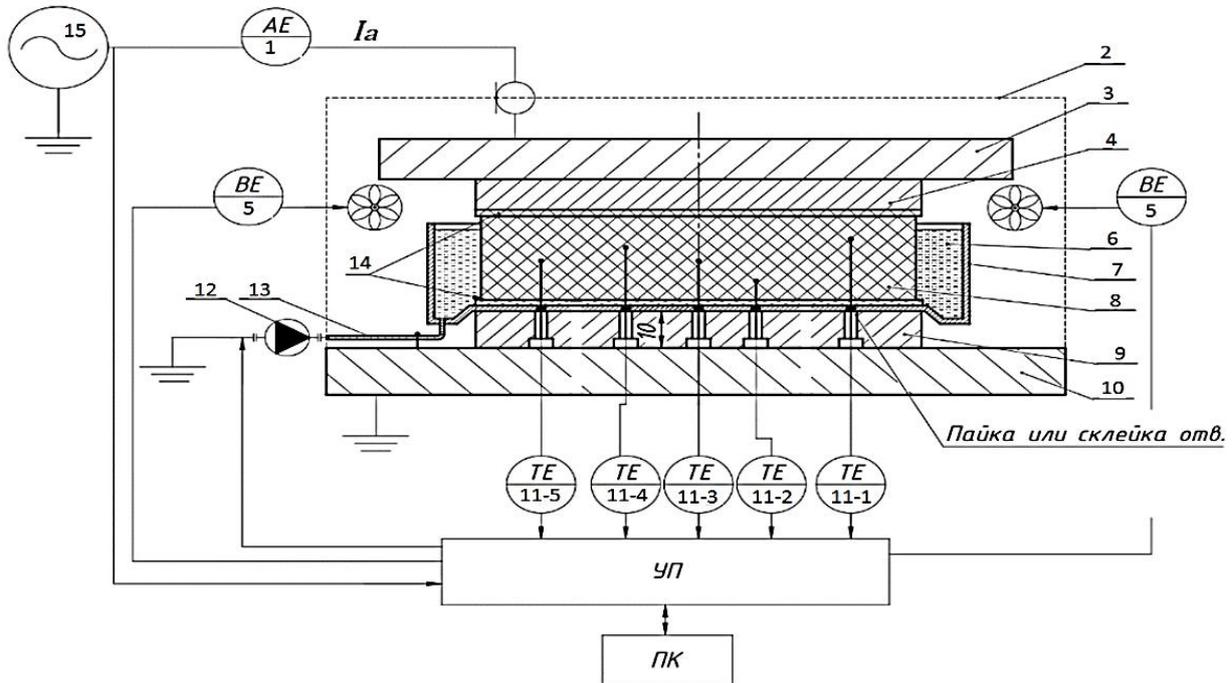
В третьей главе представлено сформированное технологическое обеспечение процесса маслonaполнения с целью повышения износостойкости деталей из полиамида марки ПА6, в том числе:

- выполнена разработка автоматизированной экспериментально-исследовательской установки, основанной на модернизации промышленной установки УЗП-2500, для данного оборудования разработана технологическая оснастка – ванна-электрод (рисунок 5). Оборудование применялось для определения коэффициента проницаемости k_T и градиента температуры ΔT при пропитке образцов из полиамидных материалов, а также для выполнения технологического процесса маслonaполнения полиамидных деталей на заданную глубину пропитки.

- с помощью экспериментальных исследований определены взаимосвязанные зависимости условия содержания гексана в ТЖПВ, режимов пропитки (температуры ПД и времени процесса маслonaполнения), глубины и скорости маслonaполнения (рисунок 6). Анализ результатов исследований показал, что наибольшей скорости пропитки соответствуют 60%-ое содержание гексана в ТЖВП и температуры ПД 35 °С и 50 °С. Выявлено, что по мере увеличения глубины пропитки ее скорость снижается. Превалирующее воздействие на скорость маслonaполнения оказывает содержание гексана в ТЖПВ.

Экспериментально подтверждено повышение износостойкости ПД при исследовании абразивного износа маслonaполненных образцов размерами 4xØ50 мм из ПА6. Скорость абразивного износа определялась по ГОСТ- 11012 – 2017 (рисунок 7)

для маслonaполненных и эталонных (ненаполненных) образцов. Абразивный износ образцов позволил определить условия и режимы обработки маслonaполнения, для которых время достижения износа до 1 мм было максимальным: 20%, 50 °С; 40%, 75 °С; 60%, 35 °С.



1 – амперметр; 2 – защитный экран; 3 – высокопотенциальный электрод;
4 – высокопотенциальная плита; 5 – вентилятор; 6 – масло; 7 – ванна;
8 – обрабатываемое изделие (ПД); 9 – низкопотенциальная опорная плита;
10 – заземленный электрод; 11-1...11-5 термодатчик для контроля температуры ПД;
12 – насос; 13 – трубка для наполнителя (масла); 14 – изолятор; 15 – ВЧ-генератор
Рисунок 5 – Схема экспериментально-исследовательской установки для маслonaполнения

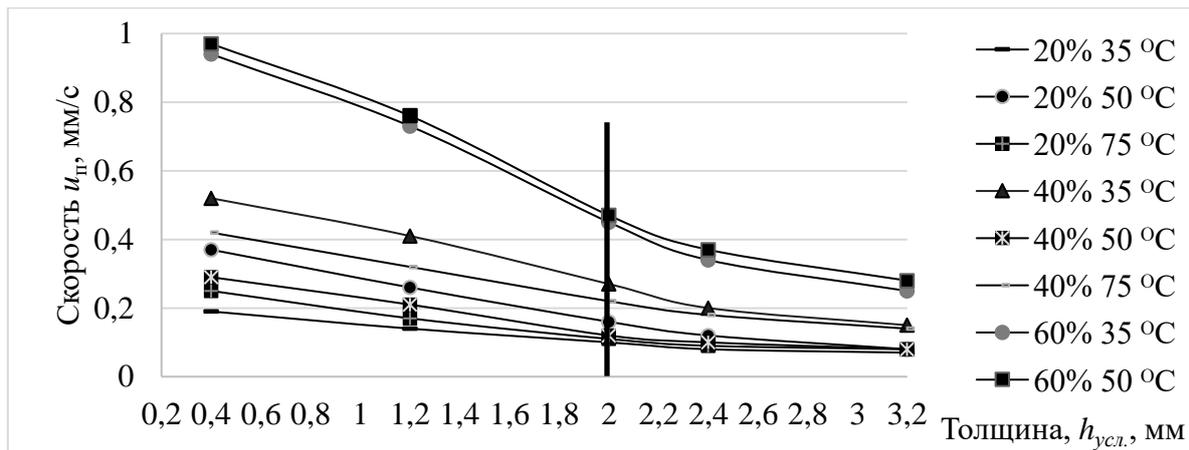


Рисунок 6 – Зависимость скорости пропитки от температуры полиамидного образца и содержания гексана в смеси

Полученные данные позволили определить зависимость скорости абразивного износа (рисунок 8) от содержания гексана в ТЖВП. Исходя из полученных данных, были выявлены режимы (75 °С) и условия (40% гексана в ТЖВП), позволившие увеличить износостойкость ПД на 54,5%.

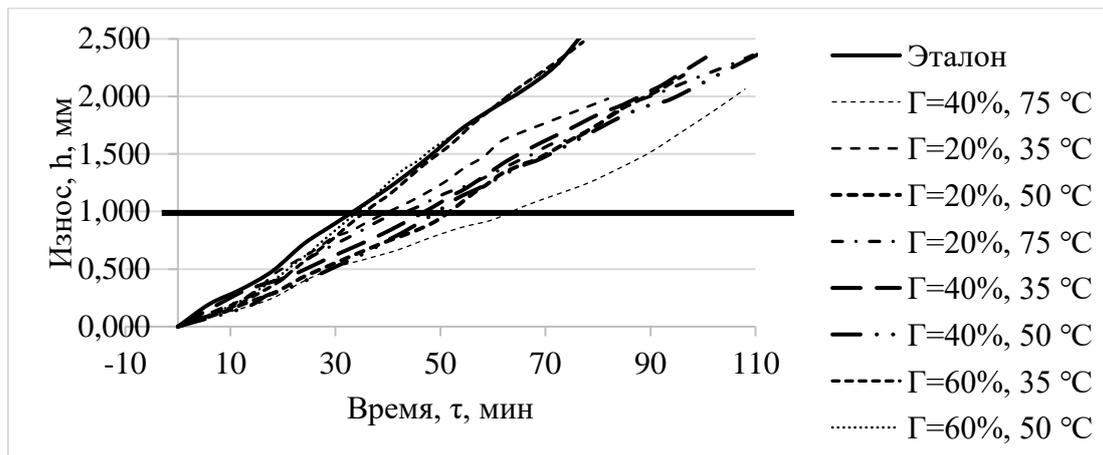


Рисунок 7 – Зависимость абразивного износа от условий и режимов технологического процесса маслonaполнения

Для исследования механических свойств маслonaполненных ПД выполнено исследование модуля упругости второго рода G полиамидных образцов различного состояния по ГОСТ 9550 – 81 (рисунок 9). Было выявлено снижение модуля упругости второго рода на 23,2%, что необходимо учитывать в инженерных расчетах при эксплуатации узлов трения.

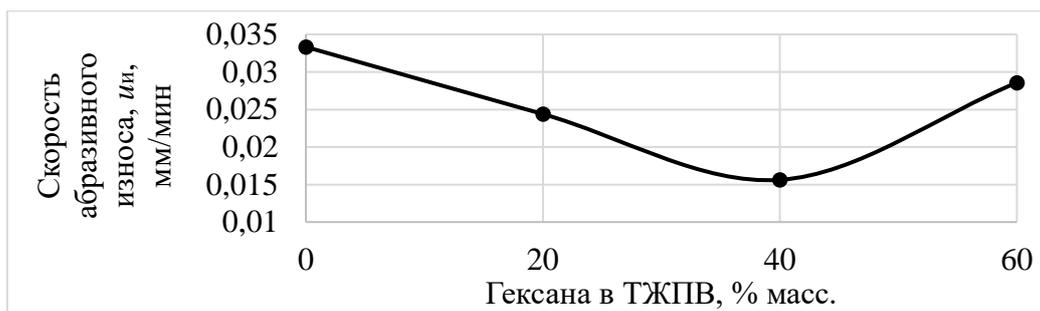


Рисунок 8 – Скорость абразивного износа по ГОСТ 11012 – 2017 от содержания гексана в масляном наполнителе



Рисунок 9 – Модуль упругости второго рода по ГОСТ 9550 – 81 полиамидных образцов различного состояния

На основе принятых научно-обоснованных технологических решений был разработан технологический алгоритм процесса маслonaполнения полиамидной детали ТЖПВ, в основе которой могут лежать различные смазочные масла (рисунок 10). Алгоритм определяет порядок выполнения операций технологического процесса и проведения необходимых расчетов по: определению кинематической вязкости и содержания компонентов ТЖПВ на основе выбранного масла с использованием диаграммы

Молина-Гурвича, по параметрам не совпадающего с М8-В; определению глубины пропитки $h_{\text{проп}}$ с учетом коэффициента запаса K_3 и допустимого износа $h_{\text{изн}}$; определения ΔT , k_T для рассчитанной глубины пропитки $h_{\text{проп}}$; определению динамической вязкости μ_T , скорости пропитки u_T , усл и длительности основной операции технологического процесса $\tau_{\text{проп}}$.

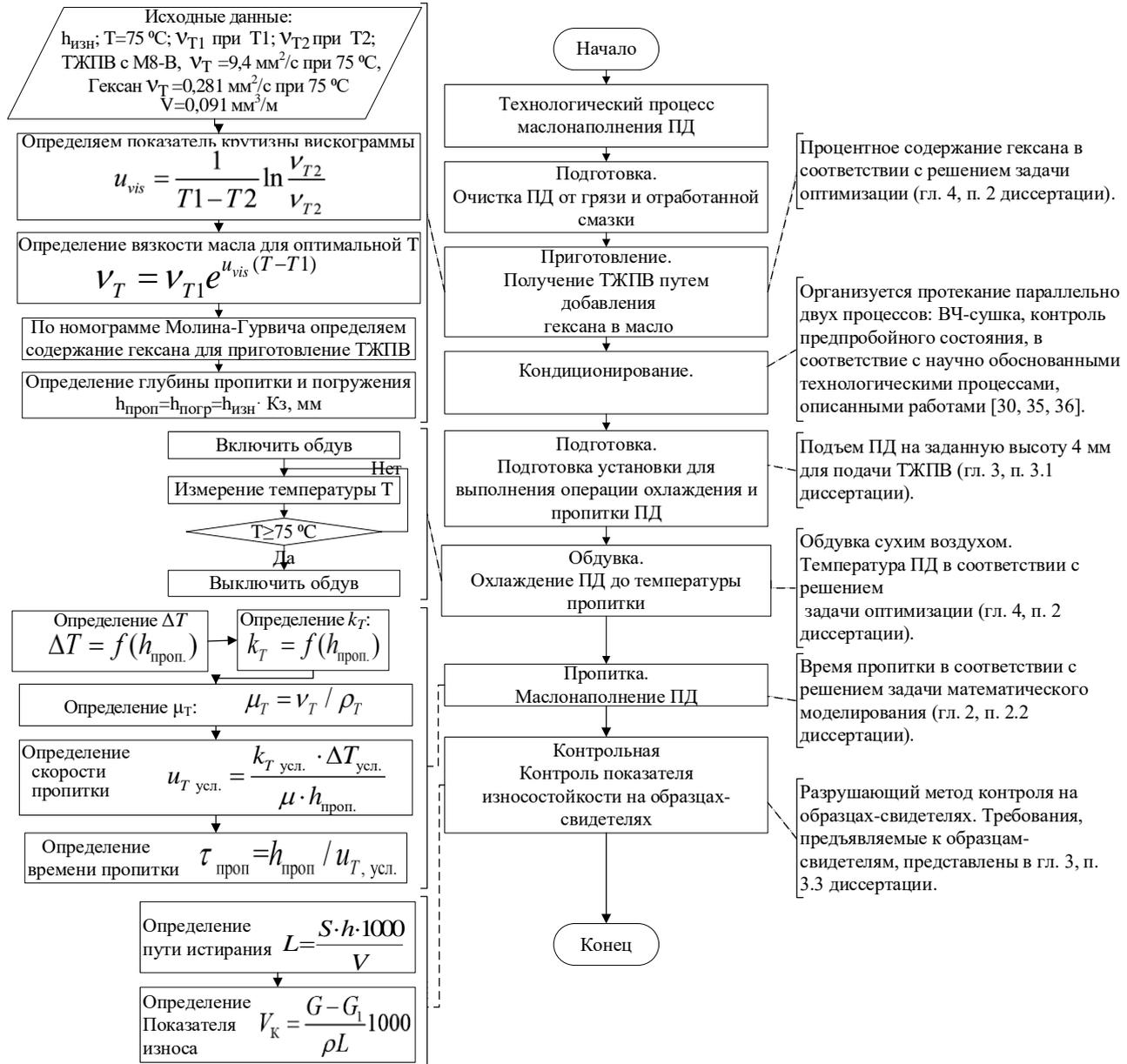


Рисунок 10 – Технологический алгоритм процесса маслonaполнения полиамидной детали

На примере изделий из ПА6, для определения времени пропитки ПД при заданных режимах и условиях маслonaполнения, позволяющих достичь минимальную скорость абразивного износа, были определены зависимости температурного градиента ΔT , $^\circ\text{C}$ (5) и коэффициента проницаемости k_T , $\text{м}^2 \text{Па}/^\circ\text{C}$ (6) от глубины наполнения ТЖПВ $h_{\text{проп}}$.

$$\Delta T = 2902,4 \cdot h_{\text{проп}} + 44,21 \quad (\text{достоверность аппроксимации } R^2 = 0,9837). \quad (5)$$

$$k_T = 6,287 \cdot 10^{-3} h_{\text{проп}}^3 - 4,531 \cdot 10^{-5} h_{\text{проп}}^2 + 1,029 \cdot 10^{-7} h_{\text{проп}} - 5 \cdot 10^{-12}. \quad (6)$$

Достоверность аппроксимации $R^2 = 0,9993$.

Представленные параметры математической модели пропитки соответствуют

маслонаполнению ПД с температурой нагрева 75 °С технологической жидкостью с 40% гексана.

Детально разработана операция контроля качества маслонаполнения на основе анализа показателя износа V_k . Контроль качества наполнения производится с использованием образцов-свидетелей в соответствии с ГОСТ 11012 – 2017 «Испытание на абразивный износ пластмасс». Используются образцы-свидетели в форме параллелепипеда (50x50x15 мм) или цилиндра (Ø50x15 мм), выбираемые в зависимости от формы обрабатываемой детали. Результатом выполнения операции контроля является показатель абразивного износа V_k – показатель истирания, мм³/м. Показатель определяется на основе предварительно вычисленного пути трения L , м, зависящего от глубины пропитки $h_{\text{проп.}}$, мм. Показатель истирания, соответствующий пути истирания L , м, должен иметь значение, не превышающее $V=0,091$ мм³/м более чем на 10%.

На основании приведенных результатов теоретических и экспериментальных исследований можно говорить о разработанном новом технологическом процессе маслонаполнения полиамидных деталей, позволяющем увеличить их износостойкость.

В четвертой главе выполнена оптимизация технологического процесса маслонаполнения и описано внедрение результатов исследования, в том числе:

- выполнена постановка задачи оптимизации технологического процесса маслонаполнения. Для этого сформирована целевая функция (7), в которой параметром является качество ПД, критерием оценивания которого является износостойкость.

$$F(u_{\text{и}}) = u_{\text{и}}(T_{\text{ПД}}, \mu) \rightarrow \min, \quad (7)$$

где $u_{\text{и}}$ – скорость износа (параметр оптимизации).

Область определения целевой функции: 35 °С < $T_{\text{ПД}}$ < 75 °С; $\mu_{\text{гекс.20\%}} < \mu < \mu_{\text{гекс.60\%}}$, где $T_{\text{ПД}}$ – температура полиамидной детали - режим; $\mu_{\text{гекс.20\%}}$, $\mu_{\text{гекс.60\%}}$ – вязкость ТЖПВ при концентрации гексана в ней – условие, при 20% и 60% соответственно;

- получены экспериментальные зависимости абразивного износа до глубины 1 мм (рисунок 11, а) и скорости пропитки до ее глубины, равной 2 мм (рисунок 11, б), от условий и режимов технологического процесса маслонаполнения полиамидных изделий.

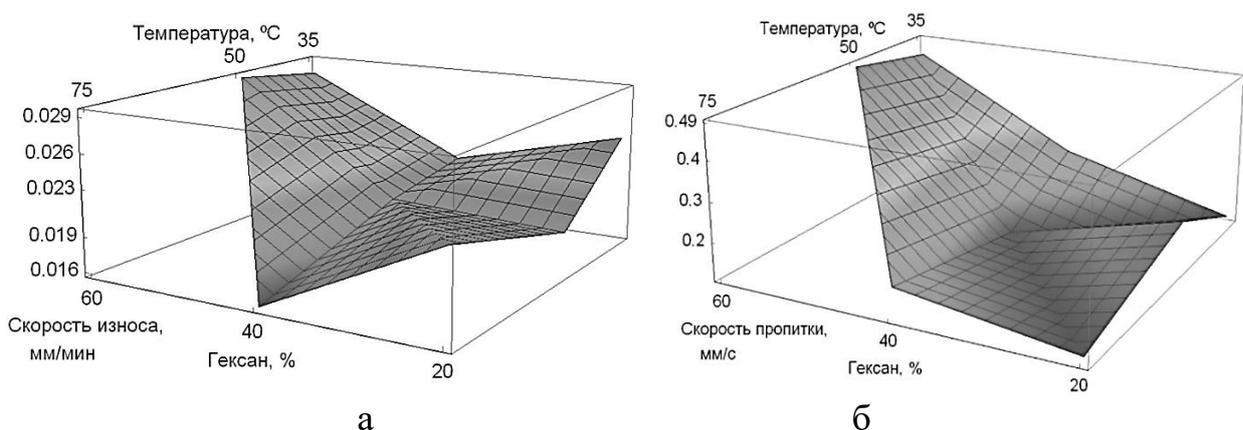


Рисунок 11 – Зависимости абразивного износа по ГОСТ 11012 – 2017 (а) и скорости пропитки (б) от условий и режимов технологического процесса маслонаполнения полиамидных изделий

Решение оптимизационной задачи осуществлялось графическим методом, в котором используется визуализация функции (7) для определения её минимума. В данном случае функция двух переменных (температура ПД, содержание гексана в

ТЖВП) представлена в виде трехмерного графика (рисунок 11 (а)).

Анализ по представленной на рисунке 11 (а) зависимости показал, что максимальное снижение скорости абразивного износа (0,16 мм/мин) достигается при температуре полиамидной детали 75 °С и содержании гексана в ТЖПВ 40%. При данных оптимальных параметрах можно построить зависимость $u_{п}(T_{ПД}, \mu)$ для любой глубины пропитки $h_{проп}$, основываясь на экспериментальных данных, представленных на рисунке 6 (пример для $h_{проп}=2$ мм см. рисунок 11 (б)). Используя данную зависимость определяется скорость пропитки ($u_{п}=0,22$ мм/с) и основное время операции маслonaполнения ($t_o=h_{проп}/u_{п}=9,1$ с).

Таким образом принято оптимальными режим и условие процесса маслonaполнения, которыми являются: $T_{ПД}=75$ °С, содержание гексана в ТЖПВ – 40% при кинематической вязкости ТЖПВ – 9,4 мм²/с.

Результаты решения оптимизационной задачи, сформированные научно обоснованные технические и технологические решения были использованы:

- лесообрабатывающей компанией «АВИЛЕС» для повышения износостойкости готовых полиамидных втулок подшипника скольжения шарнирных соединений манипуляторов Palfinger Epsilon C70 L22, Palfinger Epsilon M100 L80. Выполненное внедрение новой технологии позволило сократить затраты на обслуживание и ремонт оборудования на 321 539 руб.;

- ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения» в учебном процессе при изучении дисциплин по программам бакалавриата и специалитета: «Современное материаловедение и термическая обработка», «Технологии обработки полимеров и композитов», «Процессы механической и физико-технической обработки».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По достижению поставленной цели настоящего диссертационного исследования, было достигнуто повышение износостойкости полиамидных деталей, работающих в тяжелых условиях, что позволило внести значительный вклад в отрасль машиностроения. В том числе:

1. Проведен анализ современного состояния и существующих проблем технологического обеспечения повышения эксплуатационных характеристик полиамидных деталей, работающих в тяжелых условиях, позволивший выдвинуть гипотезу о перспективности разработки новой технологии изготовления полиамидных деталей с применением процесса маслonaполнения как финишной операции механической обработки.

2. На основании приведенных результатов теоретических и экспериментальных исследований предложен новый способ повышения износостойкости полиамидных деталей, заключающийся в маслonaполнении их поверхностного слоя модифицированной жидкостью пониженной вязкости. Определены допустимые пределы выбора температурного режима (35...75 °С) и содержания гексана в наполнителе (20...60%).

3. Разработана математическая модель, описывающая процесс маслonaполнения изделий из полиамидных материалов специальной технологической жидкостью с пониженной вязкостью, позволяющей определять скорость и время пропитки на основе анализа градиента температуры по глубине наполнения.

4. Разработан температурно-динамический способ определения скорости про-

питки на основе послойного контроля динамики изменения температуры в процессе маслonaполнения деталей из полиамидного материала марки ПА6. Погрешность измерения применяемого способа составила $\approx 0,6\%$.

5. С целью определения параметров математической модели для определения времени пропитки на основе натурального эксперимента определены зависимости температурного градиента ΔT и коэффициента проницаемости k_T от глубины пропитки технологической жидкостью, содержащей 20% и 40% гексана, при температуре полиамидной детали 50 °С и 75 °С соответственно. Температурный градиент ΔT и коэффициент проницаемости k_T изменяются по толщине пропитки, описываемые полиномами первого и третьего порядка соответственно.

6. Сформированы научно обоснованные решения по технологическому обеспечению процесса маслonaполнения полиамидных деталей:

- разработано технологическое оборудование и оснастка на основе использования модернизированной промышленной установки УЗП–2500, позволяющие получать новые научные знания при исследовании параметров входящих в математическую модель процесса пропитки различных образцов из полиамидных материалов, а также производить пропитку готовых полиамидных деталей;

- определены зависимости скорости пропитки, скорости абразивного износа и модуля упругости второго рода от вязкости технологической жидкости и температуры детали из ПА6, для наполняемого поверхностного слоя;

- разработан технологический алгоритм маслonaполнения полиамидной детали технологической жидкостью пониженной вязкости, в основе которой могут лежать различные смазочные масла;

- решена задача оптимизации технологического процесса маслonaполнения в соответствии с целевой функцией, направленной на обеспечение максимальной износостойкости в рамках допустимого износа полиамидной детали. Достигнуто максимальное снижение скорости абразивного износа ПД на 54,5% при пропитке технологической жидкостью с вязкостью $\nu T = 9,4 \text{ мм}^2/\text{с}$ и температуре полиамидной детали 75 °С (испытания по ГОСТ 11012 – 2017).

7. Разработан новый технологический процесс маслonaполнения полиамидных деталей с использованием ВЧ–нагрева при кондиционировании обрабатываемой детали с последующим ее наполнением модифицированной антифрикционной жидкостью пониженной вязкости при оптимальном режиме – температура полиамидной детали 75 °С и оптимальном условии – содержание гексана в наполнителе 40%. Данный процесс позволяет повысить антифрикционные свойства поверхностного слоя детали в рамках ее допустимого износа на $\approx 55\%$.

8. Результаты диссертационной работы использованы: лесообрабатывающей компанией «АВИЛЕС» для модернизации готовых полиамидных втулок; ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения» в учебном процессе дисциплин.

Перспективы дальнейшей разработки темы: совершенствование технологического процесса изготовления полиамидной детали путем добавления операции «оплавление» поверхностей полиамидной детали, подвергнутых маслonaполнению, для обеспечения сохранности наполнителя в ее поверхностном слое при транспорти-

ровке и хранении; формирование технологического справочника для определения режимов процесса маслonaполнения различных полимерных и композиционных материалов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Бычковский, В. С.** Технологический процесс исследования маслonaполнения деталей из полиамидных материалов / **В. С. Бычковский** // *iPolytech Journal*. – 2023. – № 3. – С. 472-481.
2. **Бычковский, В. С.** Математическое моделирование технологического процесса пропитки полиамидных деталей маслом / **В. С. Бычковский** // *Системы. Методы. Технологии*. – 2023. – № 4. – С. 32-37.
3. **Бычковский, В. С.** Условия и режимы обработки технологического процесса маслonaполнения полимерных деталей / **В. С. Бычковский** // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. – 2023. – № 11. – С. 39-48.

В изданиях, индексируемых в международных цитатно-аналитических базах данных WoS и Scopus:

4. Bakanin, D. Development and automation of the device for determination of thermophysical properties of polymers and composites / D. Bakanin, **V. Bychkovsky**, N. Filippenko, D. Butorin, A. Kuraitis // *International scientific conference energy management of municipal facilities and sustainable energy technologies*. – 2020. – P. 731-740.
5. Gramakov, D. Assessment of quality of products from polymer materials for machine-building purposes / D. Gramakov, N. Filippenko, A. Larchenko, A. Livshits, **V. Bychkovsky**, D. Bakanin // *Journal of physics: conference series 2020. International scientific conference energy management of municipal facilities and sustainable energy technologies*. – 2020. – P. 12-52.
6. Butorin, D. V. Mathematical modeling of electrothermal processes using the example of high-frequency welding of a batch of symmetric polymer workpieces / D. V. Butorin, N. G. Filippenko, D. Bakanin, **V. S. Bychkovsky**, A. Livshits, A. Larchenko // *Journal of physics: conference series 2020. International scientific conference energy management of municipal facilities and sustainable energy technologies*. – 2020. – P. 107-122.
7. **Bychkovsky, V.** Contact method of volume control of temperature of a polymer sample at high-frequency heating / **V. Bychkovsky**, N. Filippenko, D. Bakanin, D. Butorin, A. Kuraitis, A. Larchenko // *Journal of Physics: Conference Series 2020. International scientific conference energy management of municipal facilities and sustainable energy technologies*. – 2020. – P. 416-424.
8. Butorin, D. Investigations of mechanical, physical and technical processes in oil-filling of products made of polymeric and composite materials / D. Butorin, **V. Bychkovsky**, N. Filippenko, A. Livshits, S. Kargapol'tsev // *VI International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway: conference proceedings, Irkutsk*. – 2018. – P. 447-451.
9. Chumbadze, T. Research aspects of modeling and automated process control photopolymerization / T. Chumbadze, N. Filippenko, E. Farzaliev, A. Livshits, **V. Bychkovsky** // *Journal of physics: conference series, Krasnoyarsk, Russia*. – 2021. – Vol. 2094. – P. 52071.
10. Filippenko, N. Automated control of the production process of antifriction polymer materials / N. Filippenko, **V. Bychkovsky**, D. Bakanin, A. Livshits, T. Chumbadze // *Journal of physics: conference series, Krasnoyarsk, Russia*. – 2021. – Vol. 2094. – P. 52072.
11. Filippenko, N. Computer-aided study of the process of impregnation of elastomeric materials

with liquid hydrocarbons / N. Filippenko, A. Livshits, T. Chumbadze, **V. Bychkovsky**, D. Butorin // Proceedings II International Scientific Conference on Advances in Science, Engineering and Digital Education (ASEDU-II-2021). Conference Proceedings. Krasnoyarsk. – 2022. – P. 60015.

Патенты и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018663940, Российская Федерация. Программный модуль обеспечения автоматизированного проведения экспериментов по определению теплофизических свойств и фазовых превращений в полимерных и композитных материалах : № 2018660862: заявл. 09.10.2018: опубл. 07.11.2018 / Д. В. Баканин, Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц, Д. В. Буторин, **В. С. Бычковский**, А. С. Курайтис ; заявитель ФГБОУ ВО ИрГУПС.

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019665505, Российская Федерация. Программный модуль управления автоматизированной системой научных исследований при изучении электрофизических параметров полимеров и композитов : № 2019664188: заявл. 11.11.2019: опубл. 25.11.2019 / Д. В. Баканин, Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц, Д. В. Буторин, **В. С. Бычковский**, А. С. Курайтис ; заявитель ФГБОУ ВО ИрГУПС.

14. Пат. № 2717804, Российской Федерации, В29С 65/04, F26В 7/00, F26В 19/00, H05В 6/46. Способ высокочастотной обработки конструктивно-сложных изделий из полимерных материалов / Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц, С. К. Каргапольцев, Д. В. Баканин, **В. С. Бычковский**, А. С. Курайтис ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ИрГУПС. № заявки 2019117685: заявл. 05.06.2019: опубл. 25.03.2020.

15. Пат. № 2731272, Российской Федерации, G01N 33/44, G01N 15/00. Автоматизированная система исследования полимерных и композиционных материалов / Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц, Д. В. Буторин, С. К. Каргапольцев, **В. С. Бычковский**, Э. Ф. Фарзалиев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ИрГУПС. № заявки 2019145244, заявл. 25.12.2019: опубл. 01.09.2020.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021668392, Российская Федерация. Программный модуль обеспечения автоматизированного процесса исследования вакуумного наполнения углеводородами эластомерных композитных материалов : № 2021667777: заявл. 08.11.2021: опубл. 15.11.2021 / Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц, Т. Т. Чумбадзе, **В. С. Бычковский** ; заявитель ФГБОУ ВО ИрГУПС.

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021668394, Российская Федерация. Программный модуль обеспечения автоматизированного процесса научного исследования процесса агрегатных превращений и деструкции полимерных материалов : № 2021667811: заявл. 08.11.2021: опубл. 15.11.2021 / Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц, Д. В. Баканин, **В. С. Бычковский**; заявитель ФГБОУ ВО ИрГУПС.

18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023660267, Российская Федерация. Программный модуль автоматизированной системы управления технологическим процессом контроля пропитки полимерных материалов Ver.1.2 : № 2023619348: заявл. 11.05.2023: опубл. 18.05.2023 / Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц, **В. С. Бычковский**; заявитель ФГБОУ ВО ИрГУПС.

19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024611775, Российская Федерация. Программный модуль автоматизированной системы управления технологическим процессом контроля уровня антифрикционной жидкости при пропитке полимерных материалов : № 2024610394: заявл. 10.01.2024: опубл. 24.01.2024 / Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц, **В. С. Бычковский** ; заявитель ФГБОУ ВО ИрГУПС.

Монография

20. Филиппенко, Н. Г. Высокочастотная электротермия полимеров и композитов: технологические процессы и автоматизированное управление ими: монография / Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц, С. К. Каргапольцев, Д. В. Буторин, С. И. Попов, **В. С. Бычковский**, Д. В. Баканин. – Иркутск : Иркутский государственный университет путей сообщения, 2019. – 272 с.

В других изданиях:

21. Bakanin, D. V. Use of high frequency heating in sandwich panels manufacturing with silicon-containing production wastes insulant / D. V. Bakanin, S. N. Filatova, **V. S. Bychkovsky**, S. V. Chipizubova, A. A. Gadzhieva // ISMR 2018-Innovation and sustainability of modern railway. – 2018. – Vol. 6 – P. 383-386.

22. **Bychkovsky, V. S.** Volume temperature control at automated high-frequency processing of polymer and composite materials / **V. S. Bychkovsky**, D. V. Butorin, D.V. Bakanin, N. G. Filippenko, A.V. Livshits // Siberian Journal of Science and Technology. – 2020. – Vol. 21. – P. 155-162.

23. **Бычковский, В. С.** Исследование изменения температуры полимерного образца при высокочастотном разогреве в зависимости от изменения объема тела и влияния конвекции / **В. С. Бычковский**, Н. Г. Филиппенко, Д. В. Баканин, А. С. Курайтис // Молодая наука Сибири. – Иркутск: ИрГУПС. – 2018. – №1(1). – С. 56-63.

24. Баканин, Д. В. Технология импульсной высокочастотной обработки полимерных материалов, автоматизация процесса / Д. В. Баканин, Н. Г. Филиппенко, **В. С. Бычковский**, А. Г. Ларченко // Молодая наука Сибири. – 2019. – № 4(6). – С. 24-30.

25. Филиппенко, Н. Г. Алгоритм заполнения смазкой кассетных подшипников буксовых узлов, эксплуатируемых в условиях Сибири и Дальнего Востока / Н.Г. Филиппенко, Д. В. Баканин, **В. С. Бычковский**, А. С. Курайтис // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – №3(63). – С. 180-187.

26. Бычковский, В. С. Термовакuumное нанесение самосмазывающихся покрытий полимерных материалов узлов трения машин и механизмов транспортного машиностроения / **В. С. Бычковский**, Н. Г. Филиппенко, С. И. Попов, А. С. Попов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – № 2(58). – С. 58-64.

27. Филиппенко, Н. Г. Автоматизированная система регулирования температуры с учетом прогнозируемых изменений метеоусловий / Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц, **В. С. Бычковский**, Э. Ф. Фарзалиев // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2021. № 1(42). – С. 73-79.

28. **Бычковский, В. С.** Исследование автоматизированного процесса высокочастотного маслonaполнения полимерного материала ПА6 моторным маслом М-8В в целях повышения эксплуатационных свойств деталей, применяемых на транспорте / **В. С. Бычковский**, Н. Г. Филиппенко, Д. В. Баканин, А. С. Курайтис // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 4(68). – С. 49-58.

29. **Бычковский, В. С.** Автоматизированный способ контроля наполнения маслом полимерных и композиционных материалов / **В. С. Бычковский**, Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц, Д. В. Баканин, Э. Ф. О. Фарзалиев // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2021. – № 4(45). – С. 9-16.

30. Фарзалиев, Э. Ф. Алгоритм системы автоматизированных научных исследований процесса сушки многокомпонентных полимеров / Э. Ф. Фарзалиев, **В. С. Бычковский**, Н. Г. Филиппенко, Д. В. Баканин, Э. Ф. О. Фарзалиев // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2021. – № 4(45). – С. 17-22.

31. **Бычковский, В. С.** Сравнительный анализ физико-эксплуатационных характеристик полимерных образцов, наполненных маслом / **В. С. Бычковский**, Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц, Д. В. Баканин, Э. Ф. О. Фарзалиев // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2022. – № 2(47). – С. 91-96.

32. **Бычковский, В. С.** Разработка алгоритма управления технологическим процессом маслonaполнения полимеров и композитов на заданную глубину / **В. С. Бычковский**, А. В. Лившиц // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2022. – № 3(48). – С. 63-68.

33. Филиппенко, Н. Г. Автоматизированная система контроля агрегатных и фазовых изменений в полимерных материалах / Н. Г. Филиппенко, Д. В. Баканин, **В. С. Бычковский** // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. – 2022. – № 2. – С. 19-33.

Подписано в печать 16.10.2024. Формат 60 x 90 / 16.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,15.
Тираж 100 экз. Зак. 3731

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения»
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15