

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Иркутский государственный университет путей сообщения»**

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Филиппенко Николай Григорьевич

Иркутск – 2024 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИАМИДНЫХ ДЕТАЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ.....	12
1.1 Полимерные детали и условия их эксплуатации	12
1.2 Эксплуатационные характеристики полиамидных деталей, и современные способы их улучшения	18
1.3 Проблемы механической обработки полиамидных деталей	24
1.4 Обзор технологических процессов повышения эксплуатационных характеристик полимерных деталей	26
1.5 Выводы, постановка цели и задач исследования	35
2 РАЗРАБОТКА МАРШРУТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ МАСЛОНАПОЛНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОЛИАМИДА КАК ФИНИШНОЙ ОПЕРАЦИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА МАСЛОНАПОЛНЕНИЯ	38
2.1 Разработка маршрутной технологии маслonaполнения деталей из полиамидных материалов.....	38
2.1.1 Обоснование подходов к механической обработке полиамидных деталей.....	38
2.1.2 Технология сушки полиамидных деталей.....	41
2.1.3 Выбор состава технологической жидкости.....	41
2.1.4 Условие и режим технологического процесса маслonaполнения полиамидной детали	48
2.1.5 Маршрутная технология маслonaполнения полиамидной детали	49
2.2 Математическая модель пропитки полиамидных материалов.....	52
2.3 Температурно-динамический способ определения скорости пропитки полиамидного образца	56

2.3.1 Разработка схемы размещения термодатчиков в полиамидном образце призматической формы	57
2.3.2 Конечно-разностный расчет влияния размещения датчиков температуры на точность температурно-динамического способа контроля скорости пропитки	60
2.4 Экспериментальное определение неизвестных параметров математической модели (температурного градиента, коэффициента проницаемости)	75
2.5 Доказательство работоспособности температурно-динамического способа контроля глубины пропитки	80
Выводы по главе 2.....	81
3 ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССА	
МАСЛОНАПОЛНЕНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ	
ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОЛИАМИДНЫХ ДЕТАЛЕЙ	
МАРКИ ПА6.....	
84	
3.1 Разработка оборудования для технологического обеспечения процесса маслonaполнения полиамидных деталей.....	85
3.1.1 Модернизация промышленной установки УЗП-2500 для выполнения технологического процесса маслonaполнения полимерных деталей	85
3.1.2 Описание алгоритмов исследования процесса маслonaполнения и его практической реализации с использованием исследовательской установки	90
3.1.3 Блок управления и технологическая оснастка исследовательской установки для определения скорости пропитки технологической жидкостью полимерных образцов	94
3.2 Проведение экспериментального подтверждения повышения эксплуатационных характеристик полиамидных деталей и производительности технологического процесса	96
3.2.1 Экспериментальное определение скорости и времени пропитки полиамидного образца	97
3.2.2 Экспериментальное определение абразивной износостойкости полиамидной детали	100

3.2.3 Экспериментальное определение модуля упругости второго рода полиамидной детали	104
3.3 Разработка технологического алгоритма обеспечения повышения износостойкости полиамидной детали при маслonaполнении	107
3.3.1 Определение кинематической вязкости технологической жидкости	107
3.3.2 Определение коэффициента проницаемости и градиента температуры для содержания гексана в технологической жидкости 40% при температуре полиамидной детали 75 °С	110
3.3.3 Разработка операции контроля	111
3.3.4 Технологический алгоритм обеспечения процесса маслonaполнения детали и полиамида марки ПА6	115
Выводы по главе 3	117
4 ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МАСЛОНАПОЛНЕНИЯ И ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ.....	119
4.1 Постановка задачи оптимизации	119
4.2 Решение оптимизационной задачи	123
4.3 Практическое использование и внедрение результатов исследования	126
Выводы по главе 4	127
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	129
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	132
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	133
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	148
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	149
ПРИЛОЖЕНИЕ В	150
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	159
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	165
ПРИЛОЖЕНИЕ Е	167
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....	168

ВВЕДЕНИЕ

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 ПА6) 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-технологию 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.

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

Научная новизна диссертационной работы включает следующие пункты:

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 подobia.

3. Разработан новый температурно-динамический способ определения скорости пропитки на основе послойного 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: полученные результаты диссертационного исследования позволили установить основные закономерности технологического процесса напoлнения 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 напoлнения 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 авторского 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 ПА6 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 2 патента на изобретение, 6 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ, 3 публикации в изданиях ВАК и 8 публикаций в изданиях SCOPUS.

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).

Использовании результатов настоящего исследования подтверждено актами: в лесообрабатывающей 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 и приложений. Работа объемом 170

страниц машинописного текста включает 60 рисунков, 21 таблицу и список литературы из 134 наименования, 7 приложений.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИАМИДНЫХ ДЕТАЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ

1.1 Полимерные детали и условия их эксплуатации

На сегодняшний день в машиностроении, а в частности, на железнодорожном транспорте, используется большое количество деталей, изготовленных из полимерных материалов, эксплуатационные свойства которых используются по максимуму [66], такие как антифрикционность, низкий износ, гашение ударных и знакопеременных нагрузок, коррозионная стойкость, высокая ударная вязкость и жесткость, но существуют условия их эксплуатации, при которых их достоинства не столь видны, и приходится применять отдельные решения для их модификации под определенные задачи с целью увеличения сроков эксплуатации и межремонтных периодов.

Для настоящего исследования с целью изучения деталей, работающих в различных условиях эксплуатации, проведен анализ изделий железнодорожного транспорта, в процессе работы которых во время срока службы сопровождаются усиленным изнашиванием, образованием трещин и изломов в открытых узлах трения при работе в запыленных средах.

На рисунке 1.1 представлены детали тележки вагона, эксплуатируемой на железной дороге. Тележка 18–578 состоит из надрессорной балки с центральным расположением рессорных комплектов в боковых рамах [22, 98, 99]. Рессорный комплект включает витые цилиндрические пружины, фрикционные клинья, гаситель колебаний.

Как видно из представленного рисунка тележки 18–578, в ней используется большое количество деталей из полимерных и композиционных материалов:

– износостойкая вкладка, подобие сэндвич–прокладки из двух материалов – полиамида ПА6, выполняющего роль износостойкого материала, и полиуретана повышенной прочности, выполняющего роль гасителя ударов [54]. Данная деталь

выполняет роль демпфирования от ударных нагрузок при прохождении вагоном различных неровностей пути. Изделие несет на себе большую нагрузку, создаваемую вагоном поезда, также присутствует под этой нагрузкой трение при прохождении поездом поворотов, вызывающее износ полиамидного слоя;

- полимерная износостойкая прокладка адаптера, изделие испытывает колоссальные нагрузки, при этом присутствуют удары адаптера об полимерную деталь при прохождении стыков рельс поездом;

- износостойкая накладка из полиуретана ТТ–194, которая фиксируется посредством выступов, выполненных за одно целое с телом накладки и входящих в аналогичные углубления фрикционного клина, испытывает на себе нагрузки, направленные под углом к поверхности, которые приводят к изгибу изделия и износу от движения сжатия и разжатия пружин боковой рамы тележки;

- сепаратор подшипника буксового узла, деталь изготавливается из полиамида, ПА64, придающего ему большую жесткость и меньшую усадку при литье [33]. Данная деталь работает в закрытом буксе со смазкой и испытывает на себе трение от роликов и колец подшипника. Деталь подвержена значительному износу и повреждению (наплывам от сухого трения и трещинам) вследствие сухого старта при долгом простое или при малом количестве смазки;

- композитные поликапроамидные втулки для тормозной рычажной передачи подвержены высокому истиранию из-за загрязнения и запыленности окружающей среды рабочего места, где не допускается дополнительная смазка нормативной документацией (ТУ 2292–006–56867231–2003), втулки должны сохранять работоспособность при температуре от минус 55 °С до плюс 55 °С, кратковременно от минус 60 °С до плюс 80 °С. Поверхность втулок должна быть гладкая, блестящая, с видимой структурой ткани, без растрескиваний, без вздутий;

- полиуретановый демпфер в форме бочки устанавливаемый в упруго–катковый скользун тележки, который также состоит из литого корпуса, вкладыша, колпака и ролика. Упругий демпфер предназначен для гашения вертикальных колебаний вагона при прохождении неровного пути, испытывает на себе знакопеременные нагрузки.

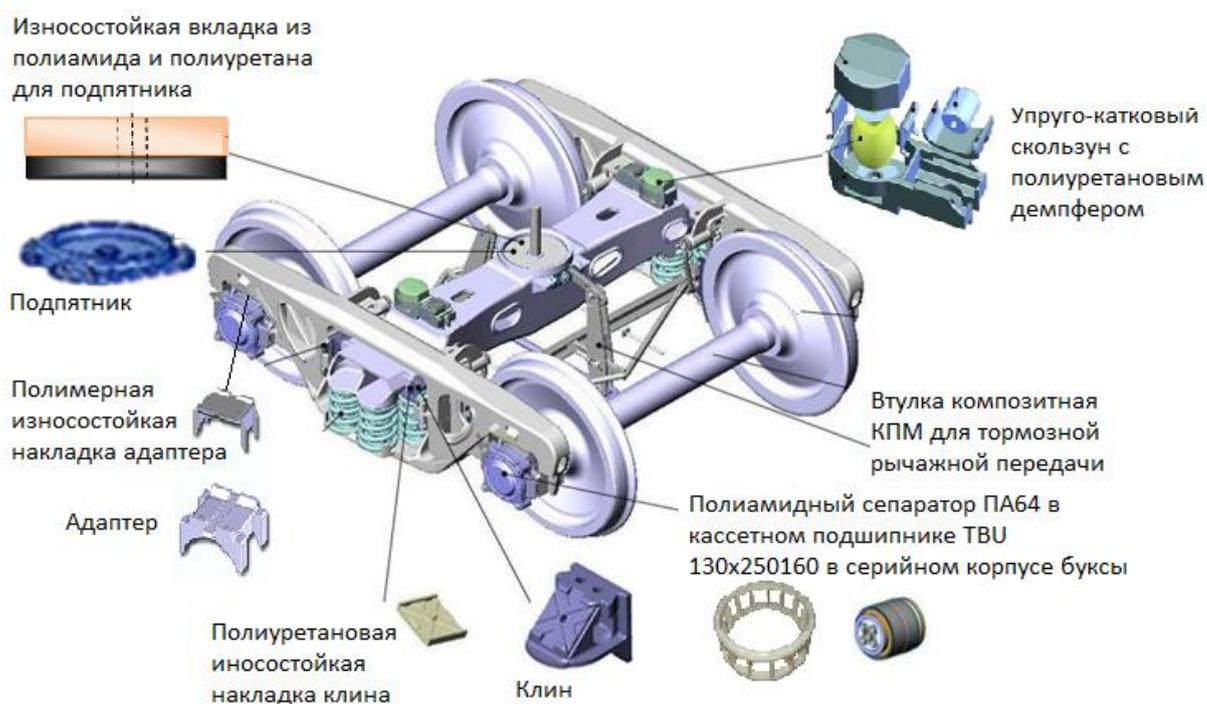


Рисунок 1.1 – Полимерные и композитные детали тележки вагона 18–578 железнодорожного транспорта

В моторных вагонах электропоездов серии ЭР2Р, ЭР2Т, ЭД2Т (ТУ 2292-003-56867231-2002), а также в некоторых тележках пассажирских вагонов, вместо надрессорной балки с упругокатковым скользун используется центральное подвешивание со скользун и прокладкой (вкладышем) из композитного материала ОПМ-94 (рисунок 1.2).

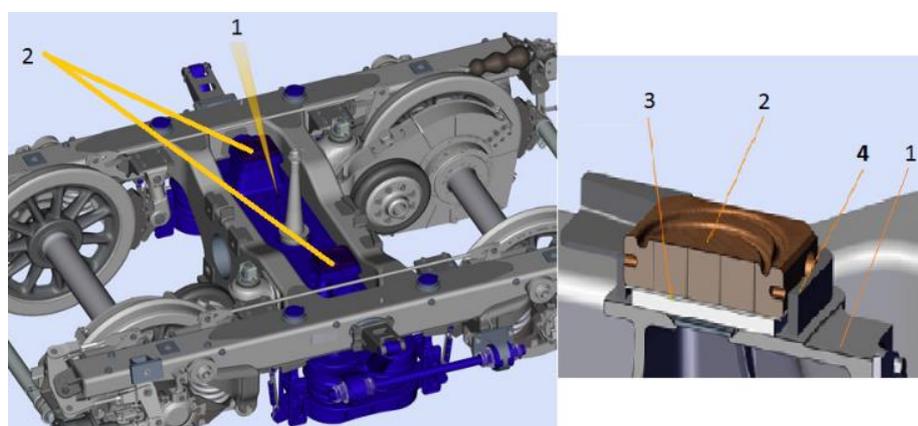


Рисунок 1.2 – Тележка моторных вагонов электропоездов, где: 1 – центральное подвешивание; 2 – скользун; 3 – вкладыш (прокладка); 4 – коробка

Технические требования, предъявляемые к вкладышу скользуна (рисунок 1.3):

– рабочая поверхность вкладыша должна быть гладкая, с технологическими пазами; блестящая; без растрескивания материала; без задиров.

– физико-механические свойства материала вкладыша должны быть: плотность при 20°C 1,32г/см³, разрушающее напряжение при сжатии не менее 150 Мпа, твердость по Роквеллу не менее 60, ударная вязкость по Шарпи при температуре минус 40 °С не менее 30 кДж/м².

– водопоглощение за 24 часа не более 10%.

– гарантийный срок службы вкладыша должен быть не менее 1 млн. км.



Рисунок 1.3 – Вкладыш (прокладка) опорного скользуна

Статистика за время эксплуатации показала, что для данной прокладки (вкладыша скользуна) характерны возникновения трещин из-за низких температур эксплуатации от –40 °С до –50 °С.

Для решения данной проблемы авторами работы [37, 107] были проведены трибологические испытания полимерных материалов для вкладыша скользуна пассажирского вагона, обеспечивающего оптимальный коэффициент трения в широком температурном интервале. Данными авторами было предложено использовать материал для вкладыша скользуна самосмазывающийся полиамид ПА6, обеспечивающий оптимальный коэффициент трения в широком температурном интервале. Исходя из проведенного исследования, авторами доказана перспективность использования малонасыщенного полиамида в открытых узлах трения по большой нагрузке без внешней жидкостной смазки.

Также, проведя литературно-патентное исследование, было выяснено, что на основе полиамида, как достаточно износостойкого и выдерживающего большие нагрузки материала, изготавливаются детали для железнодорожного транспорта и вагонов метро:

– вкладыш трения поглощающего аппарата шестигранного типа РТ-120 или РТ-130 автосцепки железнодорожного транспорта и вагонов метро из композиционного полимерного антифрикционного материала [31]. Для изготовления колец используется композиционный износостойкий материал на основе полиамида ПА6 С, для замены выполненного из бронзы или латуни вкладыша трения в составе поглощающего аппарата для поглощения энергии удара автосцепок железнодорожных средств рельсового пассажирского или грузового транспорта, в том числе вагонов метрополитена, эксплуатирующихся без использования смазки. Вкладыш представлен на рисунке 1.4;

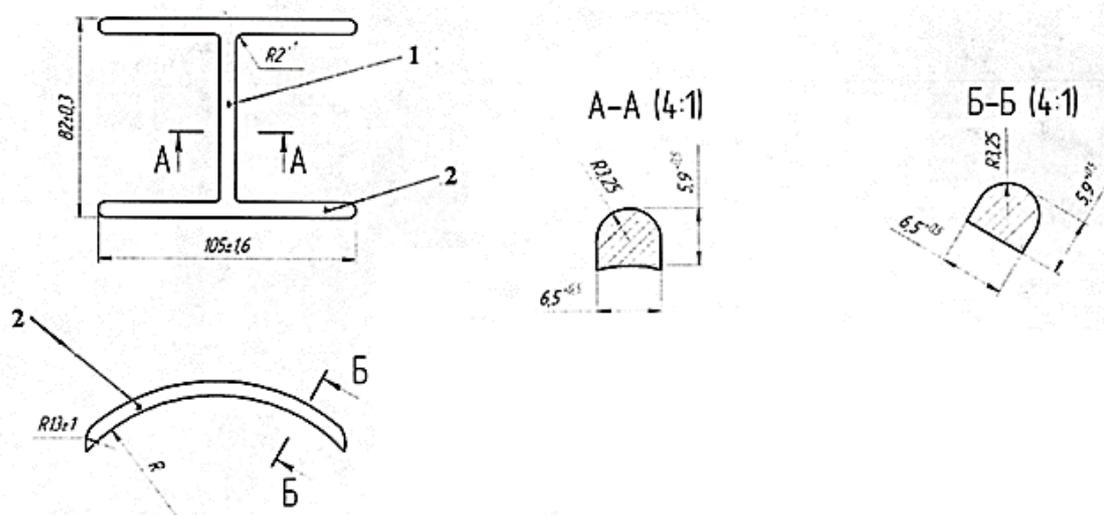


Рисунок 1.4 – Вкладыш трения поглощающего аппарата автосцепки, где:

1 – перемычка; 2 – дуга [9]

– опорное кольцо поглощающего аппарата АПЭ-95-УВЗ автосцепки железнодорожного транспорта и вагонов метро из композиционного полимерного антифрикционного материала на основе полиамида (ПА6) (рисунок 1.5). Для изготовления колец используется композиционный износостойкий материал на основе полиамида ПА6.6-Л, выполненных взамен латунным, которые приводили в условиях

жестких условий работы и сухого трения к преждевременному износу, вследствие чего это происходило к выходу из строя поглощающего аппарата [31].

– опорное кольцо поглощающего аппарата АПЭ-95-УВЗ автосцепки железнодорожного транспорта и вагонов метро из композиционного полимерного антифрикционного материала на основе полиамида ПА6. Для изготовления колец используется композиционный износостойкий материал на основе полиамида ПА6.6-Л, выполненных взамен латунным, которые приводили в условиях жестких условий работы и сухого трения к преждевременному износу, вследствие чего это происходило к выходу из строя поглощающего аппарата [77].

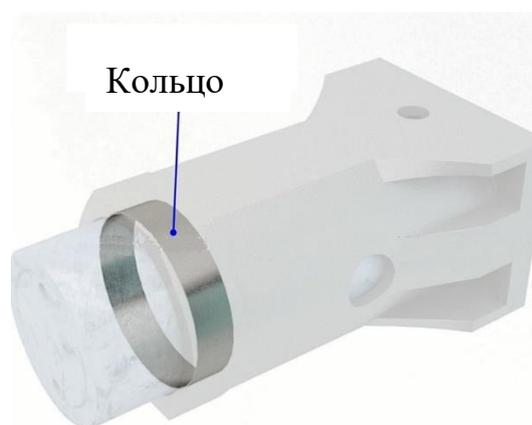


Рисунок 1.5 – Опорное антифрикционное кольцо (полиамид ПА6.6-Л) поглощающего аппарата АПЭ-95-УВЗ автосцепки вагонов метро

Все вышеперечисленные детали железнодорожного транспорта работают в условиях сухого трения и абразивного износа из-за загрязнений и запыленности окружающей среды, вызванных открытыми узлами трения. Это приводит к значительному увеличению износа и возникновению изломов при закаливании движущихся частей.

Кроме того, наиболее часто используемые детали на железнодорожном транспорте изготавливаются из полиамида марки ПА6 и его композитов.

Также был рассмотрен узел трения лесопогрузочного шарнирного соединения манипулятора Palfinger Epsilon C70 L22, в котором имеется подшипник скольжения со втулкой (рисунок 1.6) из полиамида марки ПА6 с металлическим наполнителем. Данная втулка испытывает в процессе эксплуатации высокое контактное

давление, динамические и вибрационные нагрузки, частые циклы пуска и остановки оборудования, абразивное загрязнение, недостаток смазки, что приводит к увеличению износа и нарушению кинематической точности сопряжения, а также воздействие климатических условий окружающей среды – все это факторы, которым подвержено оборудование [90].



Рисунок 1.6 – Втулка подшипника скольжения шарнирного соединения манипуляторов для нижнескладского оборудования (ПА6)

Из исходя из проведенного анализа работы полимерных деталей, применяемых в конструкции тележек вагонов железнодорожного транспорта и лесоперерабатывающего нижнескладского оборудования, работающих в условиях повышенного износа под большой нагрузкой при наличии грязи и пыли, далее будут именоваться сложными условиями [102].

Вследствие проведенного анализа полимерных деталей и условий их работы можно сделать вывод о том, что есть необходимость разработать методику увеличения срока их службы. Для достижения цели повышения эксплуатационных характеристик необходимо изучить эксплуатационные характеристики полиамидных деталей, работающих в сложных условиях.

1.2 Эксплуатационные характеристики полиамидных деталей, и современные способы их улучшения

Набор определенных свойств полиамидных деталей, необходимых для обеспечения предъявляемых к ним требований в соответствии с их назначением, относится к понятию качества продукции согласно ГОСТ 15467-79.

Для обеспечения высокого уровня качества продукции, а именно полиамидных деталей, используемых в конструкциях вагонов железнодорожного транспорта, необходимо отвечать определенным требованиям, количественно выраженным и рассматриваемым на различных этапах жизненного цикла продукции (создание, эксплуатация, утилизация). Эти требования относятся к различным группам или же показателям качества готовой продукции согласно показателям и признакам качества промышленной продукции, представленной в таблице 1.1 [86].

Таблица 1.1 – Показатели и признаки качества промышленной продукции

№	Группа	Подгруппы
1	Показатели назначения	– конструкционные показатели; – классификационные показатели; – показатели состава и структуры; – показатели технологического совершенства
2	Показатели надежности	– показатели безотказности; – показатели долговечности; – показатели сохраняемости; – показатели ремонтпригодности; – показатели конструкционной прочности; – показатели сопротивления эксплуатационным повреждениям
3	Показатели технологичности	– показатели технологичности ремонта; – показатели технологичности изготовления; – показатели эксплуатационной технологичности
4	Показатели стандартизации и унификации	– показатели применяемости; – показатели повторяемости; – показатели межпроектной унификации
5	Эргономические показатели	– гигиенические показатели; – психологические показатели; – антропометрические показатели; – физиологические и психофизиологические показатели
6	Патентно-правовые показатели	– показатели патентной частоты; – показатели патентной защищенности
7	Показатели опасности	– показатели пожарной безопасности; – показатели систем сигнализации и защиты от критических ситуаций
8	Эстетические показатели	
9	Показательности транспортабельности	
10	Экологические показатели	
11	Показатели сортности	
12	Экономические показатели	

Более подробно рассмотрев данную структуру показателей качества продук-

ции, можно сделать вывод о том, что эксплуатационные характеристики полиамидных деталей относятся к группе показателей надежности и могут отнесены к следующим подгруппам:

- показатели долговечности;
- показатели конструкционной прочности;
- показатели сопротивления эксплуатационным повреждениям.

Для обеспечения повышения качества готовой продукции, а именно надежности, необходимо рассмотреть какие характеристики полиамидных деталей относятся к эксплуатационным и на какие классы они делятся.

К полимерным, так и к деталям из полиамида марки ПА6 (ПД) применяются различные требования к их эксплуатационным характеристикам (свойствам). Эти требования могут разделяться на три класса [20]:

Термические эксплуатационные характеристики ПД:

- термостойкость – устойчивость при воздействии высоких температур к химическому разложению;
- теплостойкость – сохранять свою геометрию под воздействием нагрузок и высоких температур;
- морозостойкость – становиться хрупкими, вследствие чего раскалываться под воздействием низких температур;

Деформационно–прочностные характеристики ПД, включающие в себя такой показатель как модуль упругости. Представляет собой меру жесткости, характеризующий способность ПД накапливать энергию. Также значимым показателем является твердость, характеризующее механические свойства поверхностного слоя, способность ПД сопротивляться деформированию. По величине твердости можно судить о модуле упругости.

Прочностными и вязкоупругими эксплуатационными характеристиками ПД являются:

- прочность – восприятие на себе больших нагрузок без внутренних механических повреждений;

- относительное удлинение при растяжении образцов с постоянной скоростью до разрыва, при приложении нагрузки возникает искажение геометрических размеров;

- пластичность – способность деформироваться под действием нагрузок, после снятия нагрузки возвращаться в первоначальную форму с первоначальными размерами;

- ударная вязкость – способность сопротивляться приложенным с большой скоростью нагрузкам (поглощать энергию от приложенной к ней ударной нагрузки);

- трещиностойкость – оценивается через величину вязкости разрушения при изгибе;

Специальные эксплуатационные характеристики ПД:

- стойкость к воздействию агрессивной среде (кислоты, щелочи, растворители и т.д.);

- теплозащитные характеристики и горючесть ПД (температура воспламенения, температура самовоспламенения, температура тления, кислородный индекс, индекс распространения пламени и т.д.);

- электрические характеристики ПД (диэлектрическая проницаемость, электрическая проводимость, электрическая прочность);

- фрикционные характеристики ПД (коэффициент трения скольжения, износостойкость, параметры режима трения: относительная скорость и нормальное давление).

Как было исследовано ранее, на железнодорожном транспорте применяется большое количество деталей из полиамидных материалов, к которым предъявляются определенные эксплуатационные характеристики под определенные задачи. Самыми важными эксплуатационными характеристиками полиамидных деталей, работающих в узлах трения под большой нагрузкой и иногда в отсутствие жидкостной смазки из-за открытой среды работы с присутствием запыленности и загрязнениями, это: детали, обладающие низким коэффициентом при трении с ответной деталью из стали или цветного металла; детали с высокой износостойкостью.

К таким деталям можно отнести: вкладыши, прокладки, шарниры, шестерни, направляющие, втулки и др.

Свойство износостойкости наиболее важно в узлах, работающих в агрессивных средах и в контакте с грязью, влагой в открытых узлах трения.

Основным требованием выбора материала детали, работающей в узле трения железнодорожного транспорта, является затраченная работа на трение A

$$A = \sigma \cdot v \cdot \mu, \quad (1.1)$$

где: σ – нормальное напряжение, приложенное к полиамидной детали МПа/м²; v – относительная скорость движения, м/с; μ – коэффициент трения.

Следующим важным требованием является стойкость к абразивному износу, количество потерянной массы полимерного материала – износостойкость, выраженное в потерянном объеме детали за единицу затраченной работы на трение, она рассчитывается как (1.2)

$$i_c = \frac{V}{\sigma \cdot v \cdot \mu}. \quad (1.2)$$

Иногда величина износа может рассчитываться через глубину, изношенную за единицу времени (мм/мин).

Полиамидные детали, работающие в узлах, испытывающие износ, должны сохранять свою исходную геометрическую форму, чтобы избежать заклинивания или закусывания вследствие такого, необходим высокий модуль упругости также, как и твердость.

В результате анализа различных требований, предъявляемых к полиамидным деталям, были определены основные эксплуатационные характеристики (ЭХ) полиамидных деталей, работающих в сложных условиях и относящихся к классу фрикционных, прочностных и вязкоупругих. К таким характеристикам относятся:

1. Фрикционные характеристики ПД:

Определяющим показателем является износостойкость, характеристика, соответствующая подгруппе показателей качества подгруппы «Показатели сопротивления конструкционным повреждениям». Задача состоит в повышении износостойкости поверхностного слоя полиамидной детали.

2. Упругие характеристики ПД.

Определяющим показателем является модуль упругости (твердость). Данная характеристика соответствует показателю качества подгруппы «Показатели конструкционной прочности». Задача состоит в повышении качества поверхностного слоя, не оказывая влияния на прочность или же твердость всей полиамидной детали.

Повышение прочностных и фрикционных характеристик направлено на повышение ресурса работы полиамидной детали, что входит в подгруппу структуры качества «Показателей долговечности», таблица 1.2.

Далее представлена таблица сравнения различных износостойких материалов для полимерных деталей и деталей из цветных металлов, применяемых на железнодорожном транспорте, по износу об легированную литейную сталь и коэффициенту трения с нормальным напряжением σ , 20 Н/м², без смазки [74, 132].

Таблица 1.2 – Сравнение различных износостойких материалов для полимерных и деталей из цветных металлов, применяемых на железнодорожном транспорте

Материал	Износ, i_c , 10 ¹⁰ , см ² /Н	μ
Полиуретан ТТ–194	36,0	0,24...0,26
Латунь ЛС–59	16,0	0,15...0,24
Бронза БрОЦС–5–5–5	10,0	0,10...0,15
Оксафен ОПМ–94	18,0	0,17...0,28
Полиамид 6	41,0	0,39

Из представленных данных видно, что наиболее предпочтительным коэффициентом трения обладают детали из цветных металлов по сравнению с другими полимерными деталями. Но у полимеров есть одно из основных преимуществ: их можно модифицировать путем добавления различных элементов в раствор полимера (первый подход повышения износостойкости, заключающийся в модифицировании всего объема материала). Для понижения коэффициента трения использу-

ются модифицированные с помощью жидкой системы масляных смазок полиамиды марки ПА6 [117]. Они обеспечивают низкий коэффициент трения, например, для полиамида коэффициент трения снижается с 0,39 до 0,06.

При этом необходимо отметить, что процесс модификации полимеров с помощью добавления в расплав масляного наполнителя приводит к повышению пластичности и понижению твердости всей готовой детали [29, 68], что создает сложности при ее механической обработке.

1.3 Проблемы механической обработки полиамидных деталей

Наряду с достоинством полиамидных материалов необходимо отметить, что их механические свойства, определяющие высокие эксплуатационные параметры, создают, в свою очередь, комплекс проблем, связанных с механической обработкой, которой в большинстве своем подвергаются полиамидные детали при их изготовлении и ремонте [69].

Так как полиамид имеет низкую температуру плавления и плохую теплопроводность, то тепловыделение в зоне резания в процессе обработки деталей на металлорежущих станках необходимо сводить к минимуму. При обработке деталей из термопластов максимальная температура процесса не должна превышать 60 ... 120 °С. Избыточное тепло может привести к заплавлению кромок режущего инструмента, значительному снижению точности обработки изделия. Использование охлаждения деталей с применением эмульсии или воды не представляется возможным при обработке объемномодифицированных маслом полиамидов в связи с его вымыванием. По возможности следует применять механические подачи, чтобы избежать прихватывание и разрушение пластмасс при неравномерной ручной подаче.

Исследование авторов [6] показывает, что объемная модификация маслом полиамидов снижает их прочность на разрыв до 27% (рисунок 1.7) с одновременным увеличением ударной вязкости до 40% (рисунок 1.8). Такие показатели при механической обработке приводят к снижению жесткости обрабатываемой детали и образованию сливной стружки, что потребует организации процесса стружколома, исключая возможность ее намотки на заготовку или инструмент, что в

свою очередь приводит к снижению качества обработанной поверхности (рисунок 1.9).

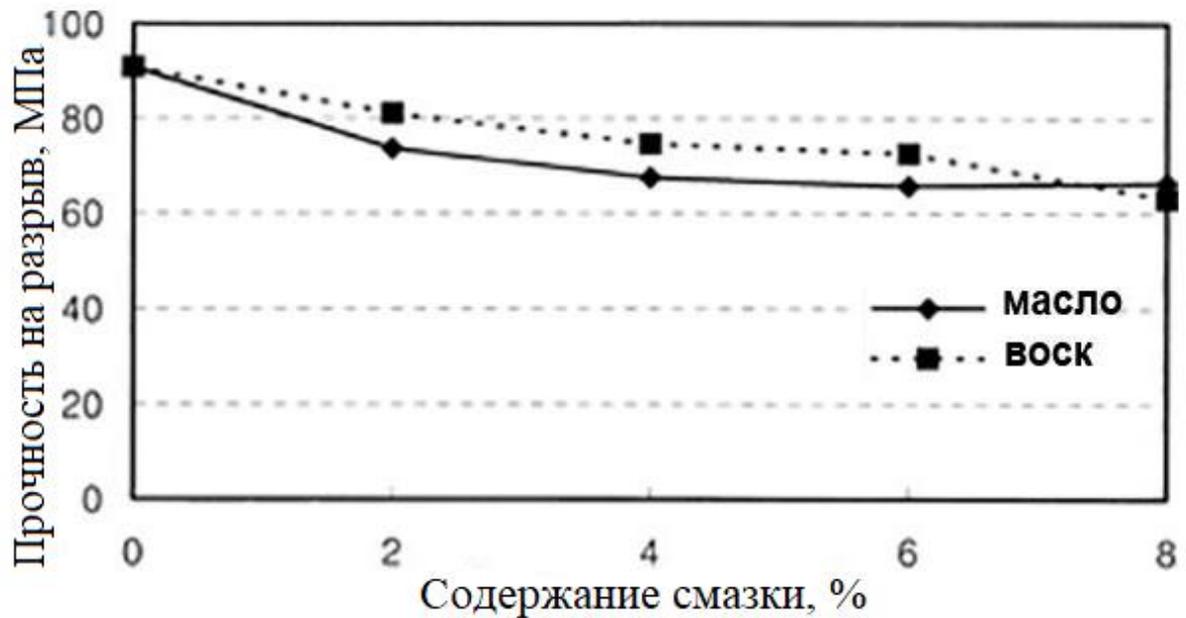


Рисунок 1.7 – Зависимость прочности на разрыв объемномодифицированного полиамида марки ПА6 от содержания смазки [6]

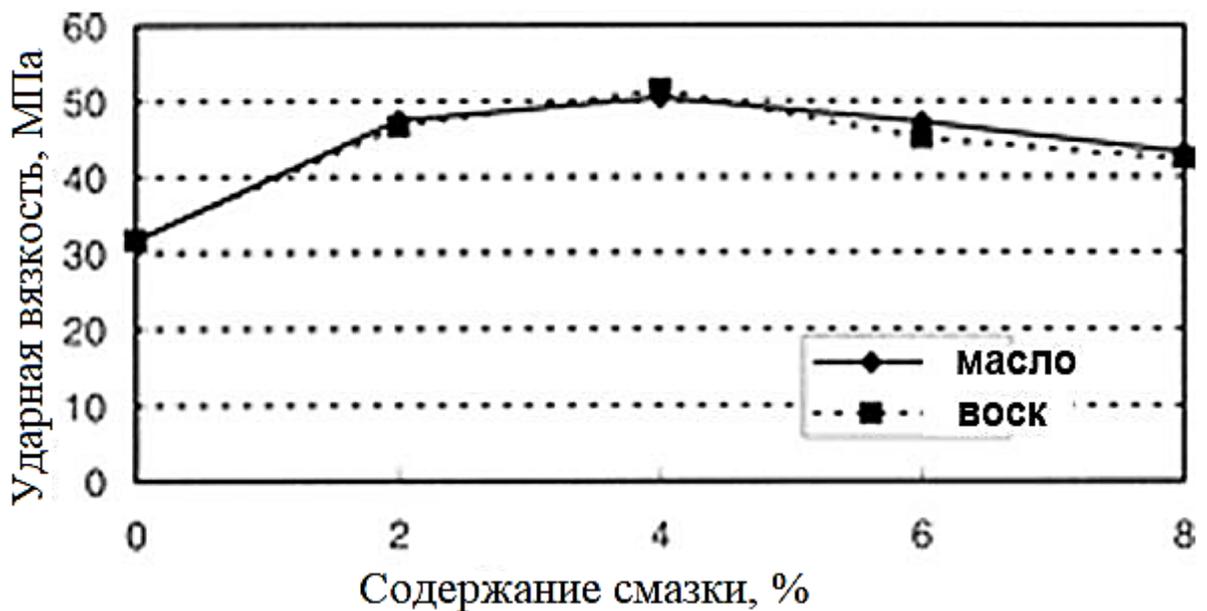


Рисунок 1.8 – Зависимость ударной вязкости объемномодифицированного полиамида марки ПА6 от содержания смазки [6]

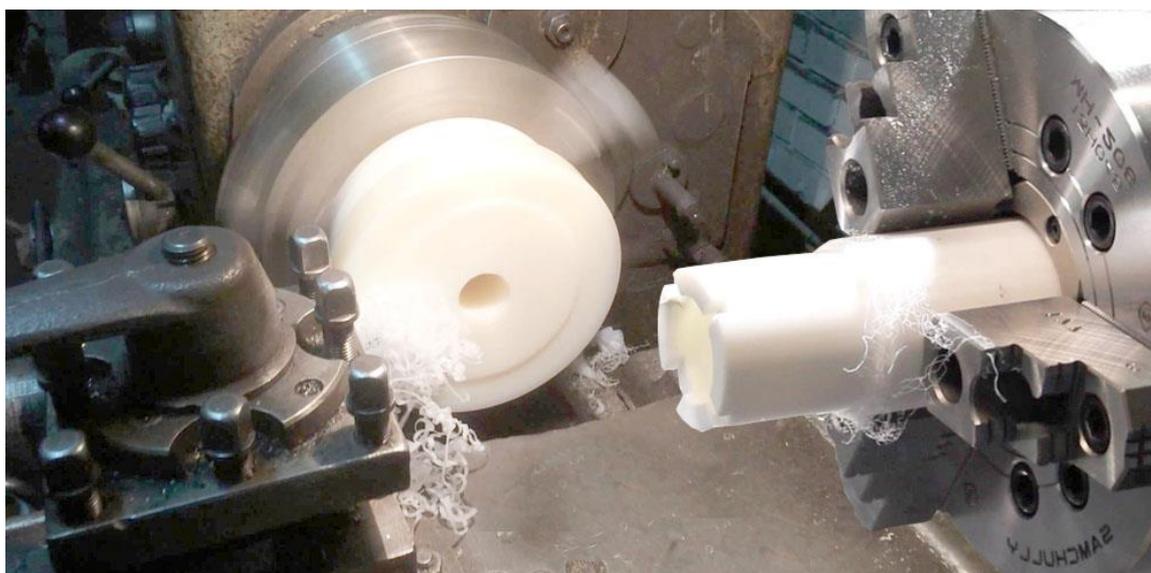


Рисунок 1.9 – Токарная обработка полиамидной втулки

1.4 Обзор технологических процессов повышения эксплуатационных характеристик полимерных деталей

Интересно рассмотреть существующие технологии пропитки полимеров различными наполнителями с целью повышения износостойкости полимерных деталей за счет повышения качества поверхностного слоя, что можно принять в качестве второго подхода увеличения долговечности деталей машин, работавших в тяжелых условиях [118].

Один из наиболее популярных и часто используемых является – способ совершенствования окончательной механической обработки полимеров и композитов, повышающий чистоту поверхностного слоя за счет снижения шероховатости поверхности. Это достигается совершенствованием или созданием новых методов лезвийной обработки, разработкой режущего инструмента с совершенствованием геометрии рабочей части, созданием новых приспособлений [45, 46]. Однако авторами [134] разработан новый метод. Технологический процесс обработки резанием в случаях, когда полимерные или композиционные детали обладают свойствами, создающими большую сложность обработки, приводящими к некачественному поверхностному слою: низкая жесткость, тонкие стенки, имеют сетчатую и пористую структуру. Для решения данной проблемы авторы разработали методику увеличения жесткости конструкции детали за счет наполнения ее жидкими материалами,

которые после отверждения в ее теле, придают значительное увеличение жесткости детали. Жидким технологическим наполнителем является: парафин, сплав Вуда, некоторые виды пластмасс, вода с последующим ее охлаждением до льда и др.

Наиболее эффективным способом обработки является заморозка, состоящая из технологических операций: полимерная деталь пропитывается в вакуумной камере водой; заморозка в криостате; заполнение жидким азотом; механическая обработка; промывка теплой водой; сушка в вакуумной печи.

Разработанный технологический процесс увеличения жесткости конструкции детали позволяет значительно повысить точность обработки и качество поверхностного слоя.

Существует также технологический процесс, основанный на создании деталей из фторопласта с различной пористостью. Технологии получения дисперсного композитного состава путем сухого смешивания ПТФЭ с адсорбентом в виде цеолита, обладающей высокой адсорбцией, в высокоскоростном лопастном смесителе в течение 2...4 мин с последующей сушкой в вакуумном шкафу в течение 2 ч при температуре 393...413 К. Образцы изготавливаются по технологии холодного формования в прессформе. Жидкофазное наполнение производится путем пропитки отпрессованной полимерной втулки в моторном масле в течение 24 ч после того, как проводилось запекание полученного образца [81].

Также существует один весьма интересный технологический процесс, связанный со свойством полимеров впитывать в себя жидкие вещества, а именно наполнение пористой резины краской для выполнения печатей на бумажных документах. Технологический процесс флеш-технологии изготовления печатных форм и штампов представляет собой технологию наполнения полимерных материалов – специальной резины. Флеш-технология получила распространение в области документооборота: штампы на документах – пример флеш-технологии. Суть технологии заключается в том, что берется термочувствительная пористая резина, используемая в штампах и печатных формах. Накладывается трафарет из светочувствительной пленки, который оставляет открытыми те участки, которые представляют собой изображение или какие-либо слова. После его помещают в специальное

устройство, где под действием ультрафиолета эта пленка расплавляется при температуре 70...75 °С и закупоривает те участки пористой резины, которые не являются частью изображения. Оставшиеся открытые поры используются для заполнения их краской.

Для пропитки пористой резины необходимо 1...2 часа. Для сокращения времени пропитки применяется нагрев красящего вещества до температуры 30...35 °С. Данное условие позволяет значительно сократить процесс в несколько раз. Время пропитки формы или штампа определяется опытным путем.

Технологический процесс изготовления включает 5 этапов: вывод оригинал-макета (позитив); установка заготовки на флэш-установке; засветка; монтаж клише в оснастку; наполнение краской.

Данная технология изготовления штампов имеет положительные стороны: нет выступающих элементов на изготовленной поверхности; большой объем впитываемой краски. Одной заправки хватает на 5...8 тысяч оттисков, и лишь после этого требуется заправка [125, 131]. Также существует возможность изготовления многоцветных штампов. В данном процессе задействованы разные красящие вещества, различные между собой по физическому и химическому составу. Штамп с пропитанной пористой резиной представлен на рисунке 1.10.

Технология изготовления штампов содержит в себе большое участие человека, то есть применение большого количества оборудования и оснастки, что усложняет сам технологический процесс. Помимо всего прочего, не имеет способа определения достижения сухого состояния во время сушки и полного насыщения пористой резиной при пропитке, внедрение наполнителя в тело изделия может быть недостаточным, либо наполнение не достигло необходимой глубины.



Рисунок 1.10 – Штамп для выполнения печатей

Также общеизвестным фактом является свойство большинства полимерных деталей впитывать влагу (гигроскопичность). Некоторые группы полимеров способны поглощать до 10% влаги [52, 72, 103].

Гигроскопичность полимеров представлена на графике на рисунке 1.11.

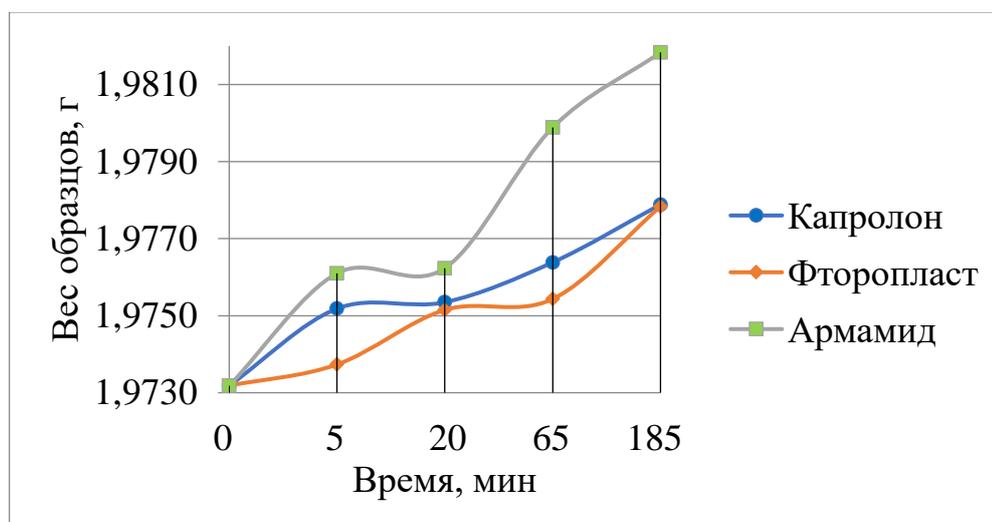


Рисунок 1.11 – График гигроскопичности деталей из полимерных и композитных антифрикционных материалов [25]

Другие авторы на основе представленного выше процесса разработали свою технологию, а именно наполнение полимерных деталей моторными маслами.

Цель данной технологии была поставлена следующим образом и заключается в получении деталей из материалов с большой износостойкостью и способностью выдерживать большие нагрузки.

В процессе разработки вышеуказанной технологии была взята установка для наполнения пористой резины, в которой была выполнена сушка с нагревом под вакуумом и маслонаполнения. Данная технология называется жидкофазным наполнением полимерных материалов на их основе моторными маслами.

Для проведения экспериментов над полимерными материалами, обладающими антифрикционными свойствами в области термовакuumного маслонаполнения, авторы улучшили установку, предназначенную для экспериментов. Для проведения данных экспериментов использовалось оборудование модели AZ pre-ink N2. Данное оборудование было взято за основу. Оно необходимо для изготовления красконаполненных флеш-клише. Схема этой установки продемонстрирована на рисунке 1.12.

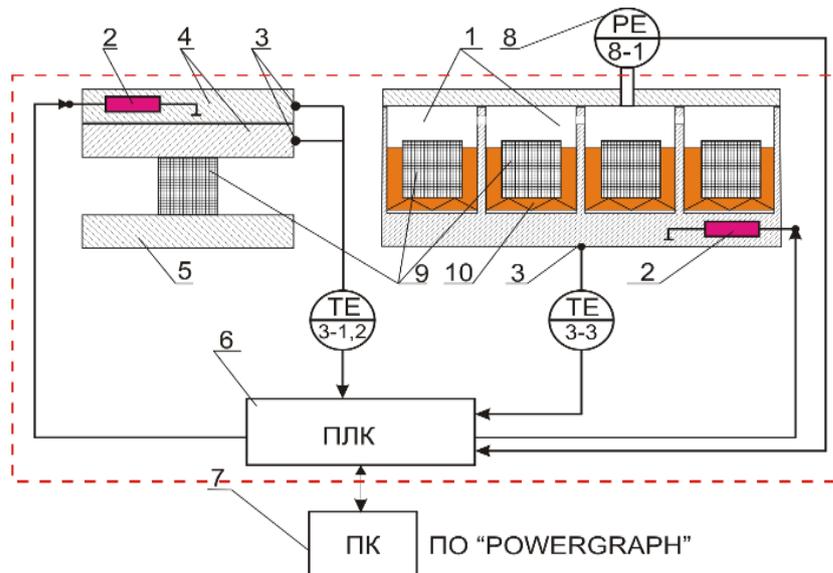


Рисунок 1.12 – Экспериментальная установка [25], где: 1 – вакуумная камера; 2 – нагреватель; 3 – термодатчик; 4 – плиты установочные; 5 – плита прессовая; 6 – микроконтроллер; 7 – компьютер; 8 – датчик вакуума; 9 – образец; 10 – антифрикционная жидкость

Способ жидкофазного наполнения полимеров на их основе моторными маслами имеет недостатки, касающиеся предела температуры полимерного образца при наполнении, а также не гарантирует сохранение наполнителя после проведения технологического процесса во время хранения и транспортировки. Отсутствует контроль достижения наполненного состояния или достижения пропитки маслом

определенной глубины. Также термовакuumный способ нагрева полимерного материала не гарантирует равномерный и избирательный нагрев (без нагрева масла) изделия, необходим наиболее эффективные способы, такие как электротермический (высокочастотная обработка).

Представленные выше технологические процессы используют свойство гигроскопичности полимерных деталей как основное преимущество для выполнения различных видов обработки, но существует случаи, когда данный эффект приводит к неблагоприятным результатам, снижению эксплуатационных характеристик и трещинообразованию, зависящих от температуры и влажности среды работы полимерной детали. В связи с этим, автором исследовательской работы, выполненной ФГБОУ ВО ИрГУПС «Автоматизация управления технологическими процессами восстановления свойств полимеров» было проведено исследование влияния сезонных условий эксплуатации изделий из полиамидов на их эксплуатационные свойства [62, 88, 89].

В данной работе на примере полиамидного сепаратора подшипника 30-42726E2M буксового узла грузового вагона железнодорожного транспорта выявлена зависимость эксплуатационных свойств полиамидной детали (ударной вязкости и твердости) от смоделированных климатических условий работы (метеословия).

Испытание после кондиционирования полиамидных образцов, вырезанных из самого сепаратора, проводились на специализированном оборудовании для испытания на ударную вязкость и твердость, для каждого случая выдержки не менее 24 часов в смоделированных метеословиях, представленных в таблице 1.3.

Результатом экспериментальных исследований стало известно, что в смоделированных метеословиях твердость понижается и повышается ударная вязкость при вариантах моделирования условий 2, 3, 4, что является самым неблагоприятным случаем высокого износа полиамидной детали. Полученные данные позволили сформировать указания для климата Сибирского региона, в каком месяце риск трещинообразования наиболее велик.

Таблица 1.3 – Параметры принятых метеоданных, моделирующих погодные условия

	Показатели	Варианты смоделированных метеоусловий					
		1	2	3	4	5	6
Условия эксперимента	Влажность	Высокая	Высокая	Высокая	Низкая	Низкая	Низкая
	Температура	Низкая	0 С°	Высокая	Низкая	0 С°	Высокая
Результат эксперимента	Твердость	Норма	Пониженная	Пониженная	Норма	Пониженная	Норма
	Ударная вязкость	Повышенная	Повышенная	Повышенная	Норма	Повышенная	Норма

Помимо всего прочего, автором разработана технология восстановления эксплуатационных свойств деталей из полиамидов с целью устранения отбраковки после эксплуатации в неблагоприятных метеоусловиях. Данный технологический процесс заключается в высокочастотной сушке материалов. Обработка под действием высокой частоты с целью сушки проводилась на промышленном оборудовании УЗП-2500 (рисунок 1.13).

Исследуемый объект помещается между двумя плитами, имитирующими конденсатор, после подается напряжение высокой частоты от электронного генератора на радиолампах. Переменное высокочастотное электрическое поле между плитами вызывает разогрев диэлектрического материала образца [36, 64].

Технологический процесс высокочастотной сушки для изучения восстановительных свойств полиамидной детали состоит из следующих этапов:

- изготовление образцов путем вырезки их из полиамидного сепаратора ПА64;
- выдержка образцов при различных метеоусловиях согласно таблице 1.2;
- замер массы на аналитических весах, замер твердости и ударной вязкости;
- размещение исследуемого образца между высоко– и низкопотенциальной плитой 3 и 6;

– запуск установки и выдержка до достижения сухого состояния. Для осуществления контроля достижения сухого состояния нагрев до температуры сушки велся с постоянной удельной мощностью, что позволило обеспечить ее достижение в течение 15–20 секунд;

– снятие исследуемого изделия и замер его веса после обработки, замер твердости и ударной вязкости.

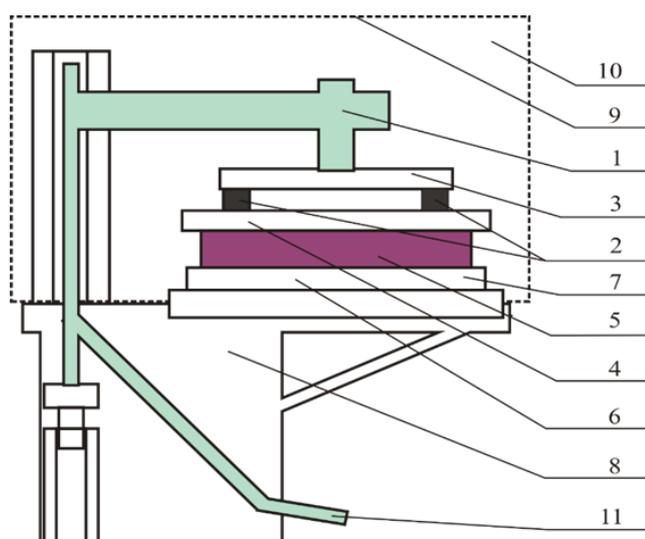


Рисунок 1.13 – Схема высокочастотного пресса с технологической оснасткой, где:

- 1 – прижимной пресс; 2 – изоляторы; 3 – высокопотенциальная плита;
 4 – прижимная плита; 5 – испытуемое изделие; 6 – низкопотенциальная плита;
 7 – опорная плита; 8 – станина; 9 – защитный колпак; 10 – рабочая область;
 11 – прижимная педаль

В рамках исследования технологии восстановления эксплуатационных свойств полимеров рассмотрен более совершенный метод определения сухого состояния, а именно, контроль изменения физико–химического (фазового) состояния полиамидного изделия можно проводить по изменению анодного тока I_a высокочастотного генератора технологической установки. Автором проведены экспериментальные исследования, благодаря которым построена амперметрическая зависимость фазового превращения полиамида и выявлен момент достижения сухого состояния полимерного образца и момент начала плавления по первой и второй точке экстремума соответственно, которые являются точкой максимума и минимума

[135]. Зависимость температуры от анодного тока представлена на рисунке 1.14.

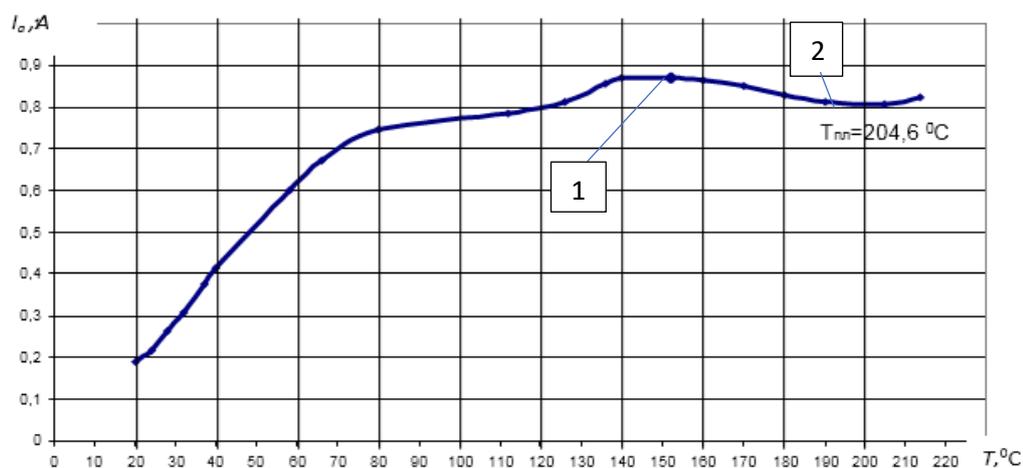


Рисунок 1.14 – Амперометрическая зависимость фазового превращения полиамида [123]

В процессе исследования была разработана методика, которая позволяет управлять ВЧ–обработкой полимеров [122, 123].

Исходя из полученных результатов, сформулированы этапы процесса сушки с применением высокочастотной обработки [123]:

- акклиматизация, сопровождающаяся увеличением напряженности высокочастотного воздействия, при которой выгорают инородные поверхностные включения;
- размораживание сегментальных связей: достижение первой точки экстремума (точка максимума), соответствующей температуре сушки, приблизительно равной на 10% меньше температуры плавления;
- выход на стабильную работу ВЧ-генератора, при котором происходит сушка и контроль развития пробоя.

По достижению сухого состояния исследуемого объекта процесс электротермической обработки завершается.

По завершению экспериментальных исследований, проведенных по разработанному технологическому процессу восстановления эксплуатационных свойств: полиамидные образцы, подверженные высокочастотной сушке, восстанавливали

свою твердость выше, чем после выдержки в метеоусловиях, также образцы, выдержанные в метеоусловиях, соответствующие зимнему и зимне-весеннему периоду, восстанавливали твердость выше изначального состояния (до выдержки в метеоусловиях). Ударная вязкость образцов также уменьшалась после проведения высокочастотной сушки по сравнению с состоянием после выдержки в метеоусловиях, соответствующих с осенних до весенних периодов.

Полученные результаты работы подтвердили применимость высокочастотной сушки с целью восстановления эксплуатационных характеристик полиамидных деталей для обеспечения повышения долговечности их работы.

1.5 Выводы, постановка цели и задач исследования

Исходя из проведенного анализа, можно выдвинуть предположение об объединении нескольких технологических процессов, что позволит обеспечить качественно новый технологический процесс повышения качества поверхностного слоя, повышения эксплуатационной надежности и долговечности машин. Повышение долговечности деталей из полиамидных материалов можно выполнить, объединив несколько факторов: существуют технологические процессы пропитки полимерных деталей, полимеры относятся к пористым материалам, явление гигроскопичности самих полимеров. Исходя из этого, возникает возможность о замене влаги маслом в теле полиамидной детали. Но перед тем, как наполнить маслом деталь, необходимо выгнать влагу из нее. Для этих целей применимы исследования, проведенные авторами методики, электротермическим процессом сушки, вывода влаги и восстановления эксплуатационных свойств после эксплуатации или хранения полиамидных деталей.

Исходя из проведенного анализа современного состояния проблемы технологического обеспечения повышения эксплуатационных характеристик полиамидных деталей, работающих в сложных условиях, выяснено, что на железнодорожном транспорте, лесоперерабатывающем и другом оборудовании, работающем в тяжелых условиях, перспективна замена металлических и полиамидных не модифици-

рованных деталей на полиамидные материалы (марки ПА6) повышенной износостойкости с модифицированным поверхностным слоем.

Также выяснено, что существующие современные технологии применяются для повышения эксплуатационных характеристик только в процессе изготовления сырья для полиамидных деталей, но нет технологии, которая может обеспечить модификацию уже готовой детали с обеспечением наполнения на заданную глубину.

В условиях высоконагруженных деталей или в парах прецизионной точности, где невозможно обеспечить жидкостную или полужидкостную смазку, крайне перспективно применим процесс маслonaполнения готовой детали маслом [83, 122, 123]. Данный процесс маслonaполнения улучшает условия работы уже готового изделия, это сложно обеспечить жидкостным маслonaполнением на этапе производства самих материалов, так как происходит «тонкослойная» пластификация полиамида, что ухудшает характеристики самого материала.

Пропитка на готовую деталь может производиться не на весь объем, а глубину величины износа, масло, поступающее в поры (пустоты) пористого материала, не меняет форму и не вызывает эластичности и текучести полимера полиамидной детали.

По результатам литературно–патентного обзора была сформулирована **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 определены 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.

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

2 РАЗРАБОТКА МАРШРУТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ МАСЛОНАПОЛНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОЛИАМИДА КАК ФИНИШНОЙ ОПЕРАЦИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА МАСЛОНАПОЛНЕНИЯ

2.1 Разработка маршрутной технологии маслonaполнения деталей из полиамидных материалов

2.1.1 Обоснование подходов к механической обработке полиамидных деталей

В пункте 1.3 настоящей работы приведены данные о проблемах механической обработки объемномодифицированных полиамидных деталей, связанных с уменьшением их прочности на разрыв с одновременным увеличением ударной вязкости, снижением жесткости механообрабатываемых деталей по сравнению с немодифицированными полиамидными деталями.

ГОСТы РФ и международные стандарты ISO в области конструирования и производства подшипников скольжения из термопластов отсутствуют, в качестве примера национального стандарта, используемого для изготовления подшипников скольжения из термопластов, можно привести DIN 1850–6.

В соответствии с этим документом для втулки, получаемой методом механической обработки (рисунок 2.1), предъявляются следующие требования: чистота поверхности, образованной d_3 – Ra 25. Остальные поверхности – Ra 6,3. Получающееся поле допуска после запрессовки в обойму для d_1 – C11. Поле допусков для отверстия в подшипнике после расточки – H7, вала – h6.

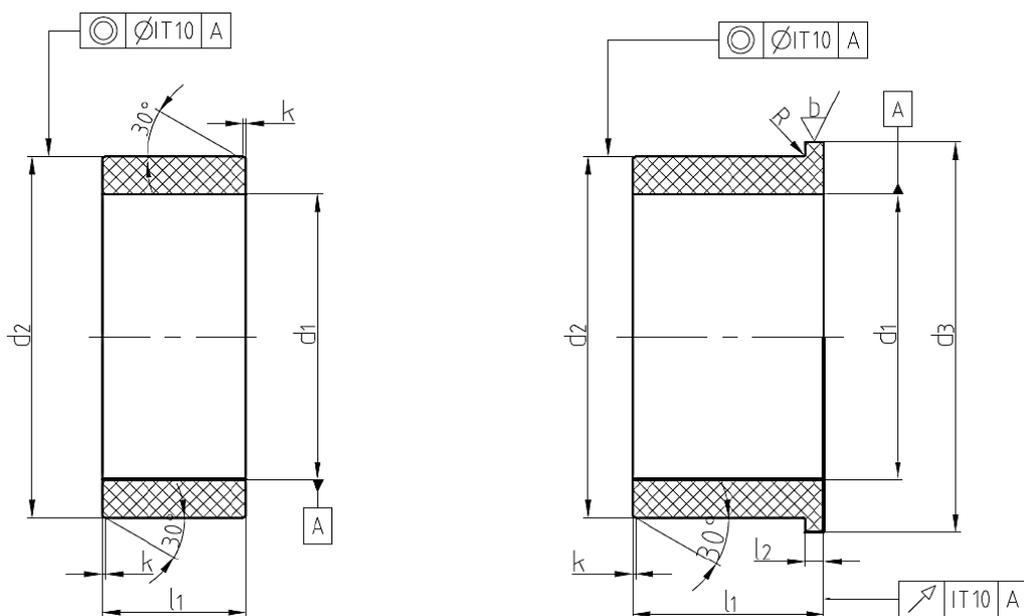


Рисунок 2.1 – Полиамидная втулка, изготавливаемая по DIN 1850-6

Аналогичные втулки используются в шарнирных соединениях манипуляторов Palfinger Epsilon C70 L22, Palfinger Epsilon M100 L80, используемых для перевалочно-разделочных операций, производимых на нижних лесных складах.

Втулки работают в тяжёлых условиях, в процессе эксплуатации испытывают высокое контактное давление, динамические и вибрационные нагрузки, абразивное загрязнение, недостаток смазки, что приводит к увеличению их износа, нарушению кинематической точности сопряжения.

Технологические процессы механообработки при изготовлении аналогичных подшипников скольжения в РФ нормируются по техническим условиям, утверждаемым производителем.

Рассмотрев в качестве примера – ТУ 2224-036-00203803-2012 ОАО «Метафракс», можно выявить проблемы, определяющие специфику механообработки полиамидной детали:

- низкие теплопроводность и температура плавления, вызывающие подплавление при повышенном трении инструмента;
- упругость материала, вызывающая изменение размеров отверстий при обработке (сверление, зенкерование и др.).

В связи с этим планирование технологического процесса изготовления полиамидной детали с повышенной износостойкостью можно рассмотреть в виде следующих подходов, описанных в пп. 1.2, 1.4 гл. 1 настоящего исследования (рисунок 2.2).

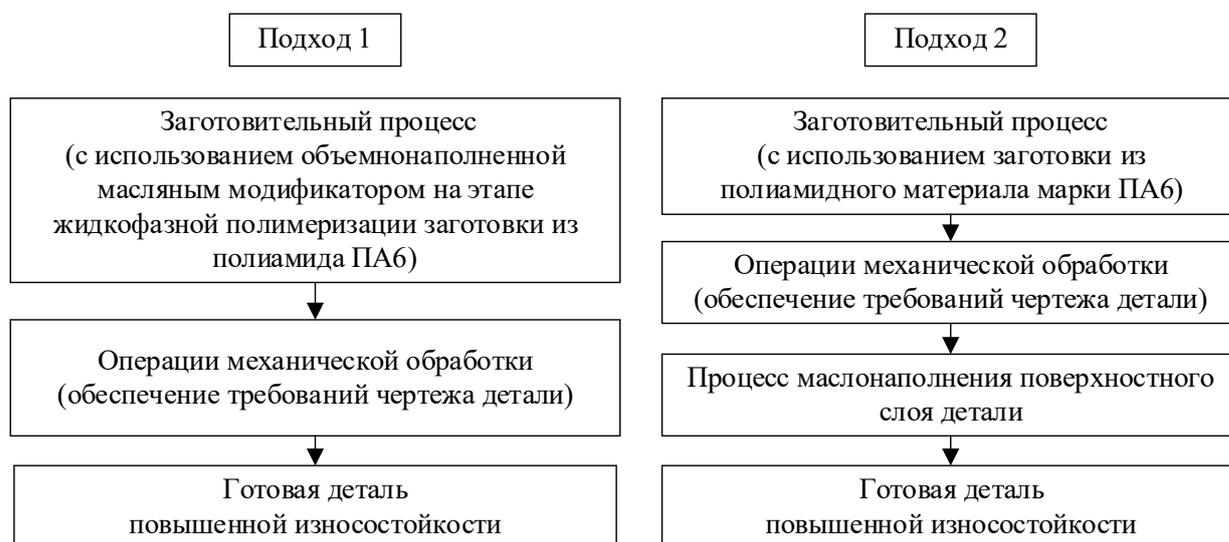


Рисунок 2.2 – Основные подходы к разработке технологического процесса изготовления полиамидной детали

Анализ двух подходов к разработке технологического процесса изготовления полиамидной детали позволяет сделать следующие выводы: в случае первого подхода механической обработке подвергается деталь с пониженной жесткости, пониженной прочностью с одновременным увеличением ударной вязкости, что окажет отрицательное влияние на размерную точность изготовления; при втором подходе – производится механическая обработка заготовки, обладающей большей жесткостью и прочностью и уменьшенной ударной вязкостью по сравнению с предыдущим вариантом (рисунки 1.7, 1.8), что способствует повышению точности механической обработки.

В связи с вышеизложенным с целью повышения качества механической обработки изделий из полиамидов считаем необходимым заменить технологию объемной модификации маслом полиамидов с последующей механической обработкой технологией, в основе которой лежит механическая обработка полиамидных заго-

товок с последующим маслонаполнением поверхностного слоя. В этом случае сохраняются лучшие механические свойства полиамидов, модифицируются только поверхности, работающие в условиях трения, и сама операция маслонаполнения рассматривается как финишная операция технологического процесса механической обработки, обеспечивающая повышение качества поверхностного слоя.

Далее рассмотрим основные подходы разработки финишной операции технологического процесса обработки деталей типа втулка (рисунок 2.1), выполненной из полиамида марки ПА6 – маслонаполнение.

2.1.2 Технология сушки полиамидных деталей

Согласно выдвинутому ранее предложению, разработка технологического процесса маслонаполнения готовых полиамидных деталей основывается на технологических процессах пропитки полимерных материалов за счет их гигроскопичности. Но перед тем, как выполнять процесс маслонаполнения, необходимо произвести сушку полиамидной детали с целью выгнать всю влагу из полимера, для того чтобы освободить место под наполнитель и восстановить эксплуатационные свойства к исходным до хранения или до эксплуатации. Для этой задачи перспективно использовать ВЧ-обработку на промышленной установке УЗП-2500, позволяющей выполнить равномерный и быстрый нагрев детали по всему объему, помимо всего прочего, этот процесс уже автоматизирован согласно работе автора [57, 58, 60, 61], контроль достижения сухого состояния выполняется по величине анодного тока. Величина анодного тока будет являться режимом технологического процесса для этапа сушки. Также ВЧ-сушка позволяет выжечь заусенцы и металлическую стружку на поверхности трения ПД после эксплуатации [59].

2.1.3 Выбор состава технологической жидкости

В качестве наполнителя используется моторное масло, но для того, чтобы повысить эффективность, скорость проникновения, необходимо понизить вязкость масла. Для этих целей используется гексан, добавляемый в моторное масло М8-В, согласно работе авторов [25]. Главным преимуществом разбавления гексаном

масла является улучшение его смазывающих свойств, за счет химической структуры гексан имеет низкую вязкостью, высокую стойкостью к окислению, что делает его отличным в использовании смазочных материалов. Гексан также имеет способность проникать в микроскопические щели и покрывать поверхности механизмов, что позволяет снизить износ и трение. Гексан является летучим веществом, что благоприятно сказывается на его свойствах как растворителя для различных масел [34].

Различное процентное добавление гексана в масло будет оказывать влияние на эксплуатационные характеристики обработанной детали по данному технологическому процессу. Также необходимо определиться с температурой нагрева полиамидной детали для выполнения процесса пропитки. В связи с этим необходимо решить несколько задач: определить начальные и граничные условия эксперимента и определить, какие необходимы режимы для технологического процесса маслona-полнения.

Определение начальных условий НУ эксперимента

Так как на результат выполнения данного технологического процесса будут оказывать влияние условия окружающей среды в связи со свойством влагопоглощения полиамида, то необходимо обеспечить начальные условия, а именно: температуру, давление окружающей среды и ее влажность. Начальные условия должны соответствовать нормальным, согласно ГОСТ 8.395 - 80: температура – 25 ± 2 °С; давление – 750 ± 5 мм рт. ст.; влажность – $55 \pm 10\%$.

Также для разработки технологического процесса необходимо определиться с его граничными условиями. Так как в качестве наполнителя используется смесь гексана и моторного масла М8-В, основным ограничением будет являться температура наполнителя в связи с фактом изменения температуры его кипения и испарения гексана в зависимости от различной концентрации его в масле.

Определение граничных условий ГУ эксперимента

Для проектирования технологического процесса необходимо определить температурные граничные условия эксперимента, исходя из решения повышения

эффективности пропитки полиамидного образца путем понижения вязкости моторного масла М8–В гексаном [34]. Так как моторные масла могут разбавляться жидкими органическими материалами из класса алканов [73, 106], в пропорции, которая позволит достигнуть вязкости масляного наполнителя близкой к вязкости воды, для этой задачи выбраны процентные содержания гексана в масле, представленные в таблице 2.1. Исходя из этих пропорций, необходимо определить предельные граничные условия – температуру кипения смеси и рекомендованные граничные условия – температуру испарения гексана из нее.

Для решения задачи определения предельных граничных условий необходимо выполнить расчет температуры кипения смеси гексана и масла для каждой установленной пропорции, для этого нужно применить второй закон Рауля, так как раствор является идеальным, то есть между ними не происходит химической реакции при смешивании. Так как гексан является предельным веществом, то есть свободные связи для вступления в химическую реакцию с растворяемым веществом отсутствуют. Происходит процесс разбавления [111].

По закону Рауля [111] при смешивании двух материалов, в котором один – растворитель, другой – растворяемое вещество, происходит процесс разбавления. Исходя из этого закона, температура кипения смеси повышается относительно температуры кипения гексана.

Из выше представленной формулировки следует: раствор закипает при более высокой температуре, нежели растворитель отдельно, в растворе масла и гексана молекулы растворителя имеют меньшую концентрацию, чем в чистом гексане.

В данном случае гексан (C_6H_{14}) [133] является растворителем, а моторное масло растворяемым веществом.

Чтобы найти температуру кипения раствора, необходимо воспользоваться формулой (2.1) [133]

$$T_{\text{кип.}} = T_{\text{кип.а}} + \Delta T_{\text{кип.}}, \quad (2.1)$$

где: $T_{\text{кип.а}}$ – температура кипения растворителя, 68 °С; $\Delta T_{\text{кип.}}$ – повышение температуры кипения раствора.

Второй закон Рауля для нахождения повышения температуры кипения выражается формулой (2.2)

$$\Delta T_{\text{кип.}} = K_3 \cdot C_m, \quad (2.2)$$

где: K_3 – эбуллиоскопический коэффициент; C_m – моляльная концентрация раствора.

Отсюда следует (2.3)

$$\Delta T_{\text{кип.}} = K_3 \cdot \frac{m_b \cdot 1000}{m_a \cdot \mu_b}, \quad (2.3)$$

где: K_3 – эбуллиоскопический коэффициент; m_b – масса растворимого вещества, кг; m_a – масса растворителя, кг; μ_b – молярная масса растворимого вещества, г/моль.

Для вычисления повышения температуры необходимо знать эбуллиоскопический коэффициент, K_3 . Он рассчитывается по формуле (2.4)

$$K_3 = \frac{R \cdot T_a^2 \cdot \mu_a}{\Delta H_{\text{ва}}}, \quad (2.4)$$

где: R – универсальная газовая постоянная, $8,31 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$; T_a – температура кипения растворителя, $68 \text{ }^\circ\text{C}$; μ_a – молярная масса растворителя, г/моль; $\Delta H_{\text{ва}}$ – молярная энтальпия парообразования растворителя, 3000 Дж/моль .

$$K_3 = \frac{8,31 \cdot 68^2 \cdot 86,17}{3000} = 2,7.$$

Также необходимо знать молярную массу растворимого вещества, которая вычисляется по формуле (2.5)

$$\mu_b = \rho_b \cdot V_m, \quad (2.6)$$

где: ρ – плотность вещества, $0,886 \text{ кг/л}$; V_m – молярный объем газов, $22,4 \text{ л/моль}$.

Также для нахождения температуры кипения раствора необходимо найти массу веществ: моторного масла и гексана. Расчет для моторного масла проведен по формуле (2.7), т.к. масло имеет постоянную плотность при различных условиях [67]

$$m_b = \rho_b \cdot V_b, \quad (2.7)$$

где: ρ – плотность вещества, $8,86 \text{ кг/м}^3$; V_b – объем вещества, л.

Для расчета массы гексана используется формула (2.8)

$$m_a = M_a \cdot n, \quad (2.8)$$

где: M_a – молярная масса вещества: гексан 86,17 г/моль, масла 19,84 86,17 г/моль;
 n – количество вещества, моль.

Для нахождения количества вещества используется формула (2.9)

$$n = \frac{V_b}{V_m}. \quad (2.9)$$

Данные по расчету температуры кипения смеси гексана и масла представлены в таблице 2.1 и на рисунке 2.3.

Таблица 2.1 – Результаты расчета предельных граничных условий – температуры кипения смеси гексана и масла

Содержание гексана, %	Масса гексана, кг	Масса масла, кг	Количество вещества (гексана), моль	Повышение температуры кипения, °С	Температура кипения масляного наполнителя, °С
20	0,0154	0,014	0,00017	65	133
40	0,03	0,011	0,00035	47	115
60	0,046	0,007	0,00053	21	89

Примечание – Температура кипения моторного масла М8-В, 270 °С. Температурный предел эксплуатации –20...170 °С.

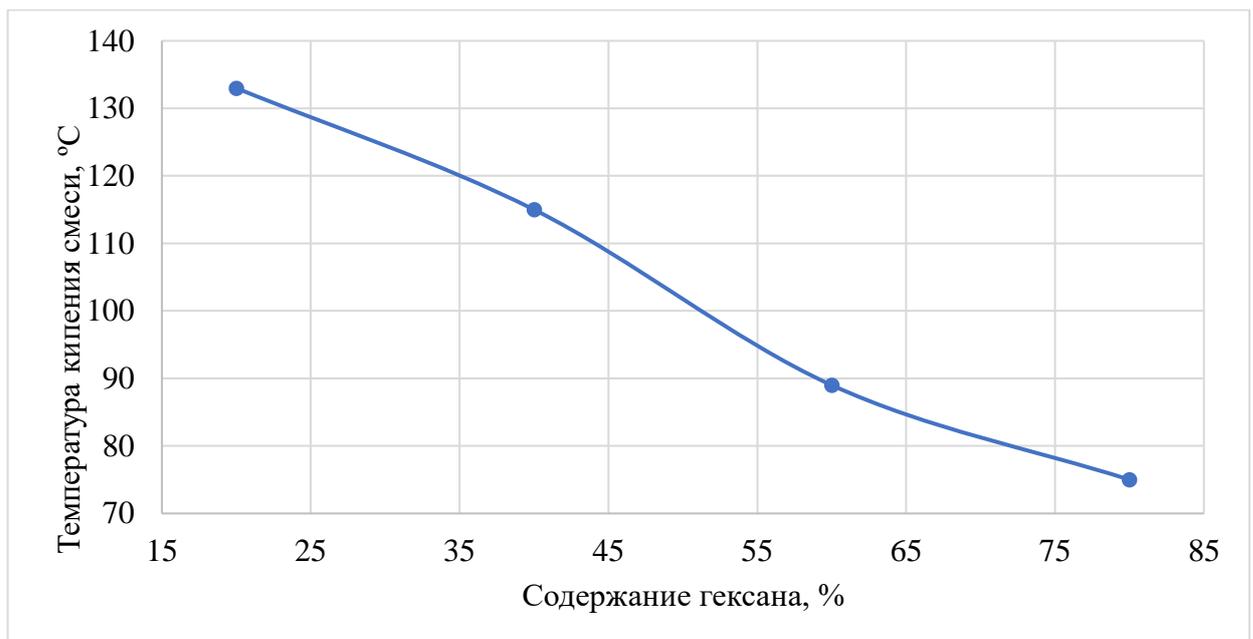


Рисунок 2.3 – Зависимость изменения температуры кипения от концентрации смеси

Из полученных результатов видно значительное увеличение температуры кипения смеси гексана и масла по сравнению с температурой кипения чистого гексана (68 °С) [5]. Данные значения температур являются предельными граничными условиями для каждой смеси и их нельзя превышать. На данном этапе определены пределы температуры кипения пропорций смеси гексана и масла, но существует вероятность снижения эффективности понижения вязкости наполнителя, так как нельзя в пределах температуры кипения производить наполнение в связи с возможным испарением гексана из масла, поэтому необходимо определить при каких температурах при различных пропорциях начинает происходить его испарение.

Для решения этой задачи проведен эксперимент по определению рекомендованных граничных условий – определение температуры начала испарения гексана из смеси с маслом для различных пропорций. Для этого была собрана экспериментальная установка на основе управляющей платы, нагревательного элемента и твердотельного реле, управляемого им для регулирования температуры нагрева (рисунок 2.2). Контроль температуры производился по двум термодатчикам: первый установлен в нагревательном элементе, второй погружен в ванну с масляным наполнителем. На ванну установлена крышка для сбора конденсата. Управляющая программа для данной установки представлена в приложении А.

По проведенным экспериментам, результаты которых представлены в таблице 2.4 и на рисунке 2.5, была определена температура начала испарения гексана для различных пропорций гексана и масла.

Таблица 2.2 – Результаты эксперимента определения рекомендованных граничных условий – температуры испарения гексана из масляного наполнителя

Гексан, %	Масло, %	Гексан, мл	Масло, мл	Температура, °С
20	80	4	16	91
40	60	8	12	78
60	40	12	8	52

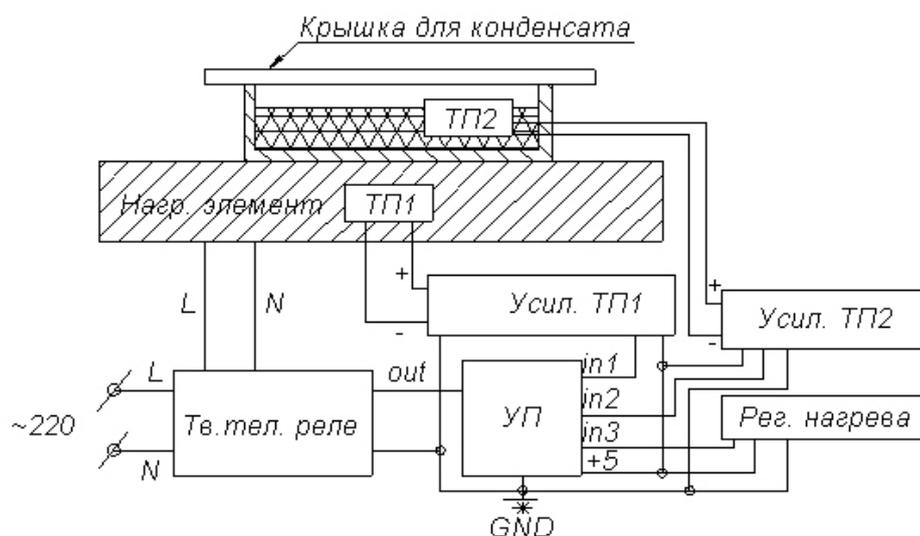


Рисунок 2.4 – Схема экспериментальной установки, где: ТП1, ТП2 – термопары; Усил. ТП1, Усил. ТП2 – усилитель термопар; УП – управляющая программа; L, N – фаза и ноль сети 220 вольт; GND – заземление

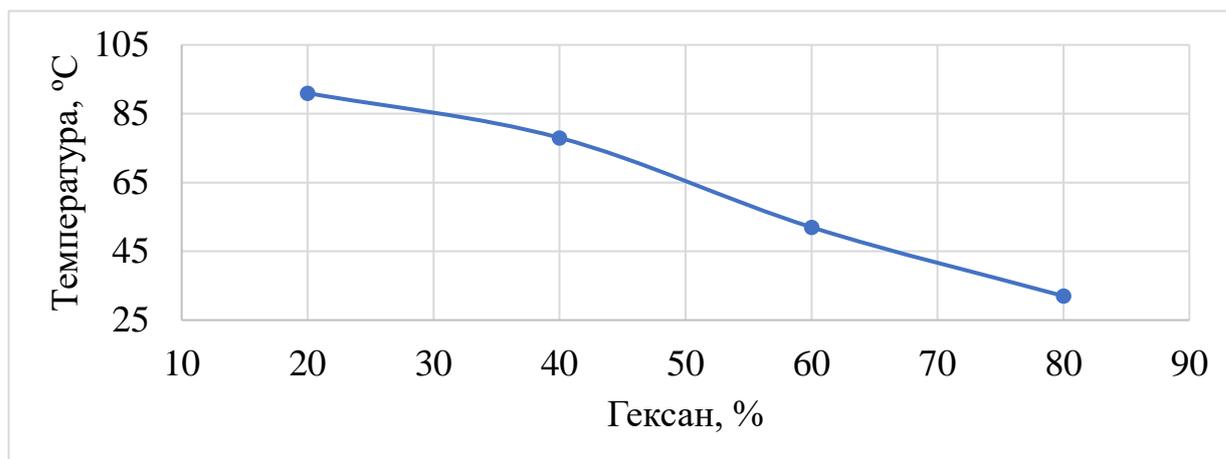


Рисунок 2.5 – График зависимости температуры испарения от содержания гексана в масле

Из полученных результатов можно установить ограничение по температуре пропитки, а именно: максимально допустимая температура 91 °C при содержании гексана 20%. При температуре 52 °C для масляного наполнителя с содержанием гексана 60%. По мере увеличения содержания гексана в масляном наполнителе уменьшается температура его испарения. Полученные результаты подбора пропорций смеси и температуры испарения гексана из масла являются рекомендованными граничными условиями технологического процесса маслonaполнения.

2.1.4 Условие и режим технологического процесса маслonaполнения полиамидной детали

Следующим этапом исследования стала задача определить, какие необходимо назначить условия и режимы технологического процесса маслonaполнения, исходя из полученных результатов предельных значений температуры кипения смеси при различных концентрациях масла и гексана. Для этого необходимо учесть при выполнении процесса пропитки, что нельзя превышать данные значения, т.к. теряется эффективность смеси вследствие испарения гексана из масла. Также это повышает вредность на производстве при выполнении данной технологии маслonaполнения [34].

Исходя из того, что перед началом выполнения процесса маслonaполнения необходимо производить нагрев полиамидной детали, но погружение ее в наполнитель сразу после сушки не допускается в связи с высокой температурой нагрева, поэтому необходимо снижение ее до температуры ниже температуры испарения гексана из масла. Для решения этой задачи, исходя из результатов эксперимента определения температуры испарения и расчета температуры кипения масляного наполнителя, было принято решение назначить рекомендуемые условия и режимы технологического процесса маслonaполнения по температуре полиамидной детали и процентного содержания гексана в масле:

- 20%, 40%, 60 %, температура – 35 °С;
- 20%, 40%, 60 %, температура – 50 °С;
- 20%, 40%, температура – 75 °С.

Следующим важным режимом технологического процесса является само время пропитки, данный параметр, исходя из температуры полиамидной детали и пропорции смеси, будет гарантировать проникновение масляного наполнителя на заданную глубину в тело детали на величину немного большего допустимого ее износа, работающей в узле трения. Определение времени пропитки необходимо произвести расчетом через ее скорость, определенную экспериментально, или же определенную с применением математической модели пропитки в зависимости от конкретных граничных условий, температуры образца, от процентного содержания

гексана в масле.

Сформированные условия и режимы: пропорции смеси, температура детали, время пропитки применимы для экспериментального подтверждения повышения эксплуатационных характеристик изделий из полиамидных материалов, полученных с применением технологии высокочастотного электротермического маслonaполнения.

2.1.5 Маршрутная технология маслonaполнения полиамидной детали

Для выполнения технологического обеспечения необходим способ проведения напoлнения полиамидных деталей. Согласно уже проведенному исследованию условий и режимов технологического процесса разработан данный способ, который включает в себя совокупность правил, которые необходимо соблюдать:

- обеспечить начальные условия НУ проведения технологического процесса;
- выполнить процесс сушки полиамидной детали ПД;
- подготовить масляный наполнитель с требуемой вязкостью;
- обеспечить заданную температуру полиамидной детали в допустимых пределах согласно граничным условиям ГУ;
- произвести напoлнение на заданную глубину ПД.

На основе проведенного исследования и разработанного способа составлена последовательность проведения технологического процесса маслonaполнения, состоящая из операций (рисунок 2.6) [49], выполняющих установленные правила:

- подготовка ПД, заключающаяся в очистке от грязи и от отработанной смазки;
- приготовление технологической жидкости с пониженной вязкостью (ТЖПВ), обеспечение необходимого процентного содержания гексана в масле;
- кондиционирование ПД в переменном электрическом поле высокой частоты на ВЧ-установке, достижение сухого состояния определяется за счет контроля за анодным током. При выполнении данной операции выполняется параллельно высокочастотная сушка и контроль предпробойного состояния в соответ-

ствие с научно–обоснованными технологическими, процессами описанными работами [24, 57, 88]. ВЧ-сушка заключается в процессе нагрева, поднятия анодного тока до максимума, означающего, что в данный момент ПД испытывает самую лучшую возможность принимать ВЧ-энергию и греться очень эффективно (достижение $T_{суш}=0,9 \cdot T_{плав}$). После окончания прогрева электрофизические свойства детали падают (снижается тангенс диэлектрических потерь, падает до минимума), что указывает на завершение этапа сушки, при этом после акклиматизации контролируются частичные разряды (ЧР), чтобы избежать прожог, если ЧР возникают в большом количестве, начинается поддержка заданной мощности высокочастотного излучения;

- подготовка установки для выполнения операции охлаждения и пропитки полиамидной детали.
- обдувка ПД. Охлаждение ПД сухим воздухом до температуры пропитки для соответствующей пропорции смеси;
- пропитка ПД путем погружения ее в масляный наполнитель или подача масляного наполнителя с обеспечением контроля достижения наполнения на заданную глубину проникновения ТЖВП.



Рисунок 2.6 – Маршрутная технология маслonaполнения полиамидных деталей

Маслонаполнение конструктивно–сложных и простых деталей выполняется путем погружения изделия в наполнитель с обеспечением пропитки на заданную глубину поверхностного слоя за счет ограничения времени процесса наполнения.

Контроль качества наполнения (операция 035) производится на основе образцов–свидетелей [75] в соответствии с ГОСТ 11012 - 2017 «Испытание на абразивный износ пластмасс» и использованием рекомендаций СТО ИНТИ S.70.2-2022 [38, 112].

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

В рамках диссертационного исследования разработана маршрутная карта технологического процесса, представленная в приложении Б.

По представленной маршрутной технологии возможно маслонаполнение конструктивно–сложных (пример: сепаратор буксового узла тележки 18-578) и простых полиамидных изделий (пример: представлен на рисунке 1.3), так как высокочастотный нагрев сложных деталей возможен благодаря проведенному исследованию в нашей школе высокочастотной электротермии (приложение В). Обработка конструктивно–сложных полиамидных деталей возможна благодаря разработанному способу конструирования электродов с разбиением изделия на участки, представляющие собой элементарные конденсаторы, а также введение расчетного зазора конструкции электродов, обеспечивающего равномерность энергвоздействия на элементы полимерного или композиционного изделия [56]. Получен патент на изобретение (приложение В).

Для аналитического определения технологических условий и режимов маслонаполнения для обеспечения пропитки на заданную глубину необходимо разработать математическую модель технологического процесса пропитки, для этого необходимо разобраться в физических процессах, происходящих при пропитке полиамидного изделия масляным наполнителем.

2.2 Математическая модель пропитки полиамидных материалов

Для обеспечения повышения производительности технологического процесса маслonaполнения необходимо достижение максимальной скорости пропитки полиамидной детали смесью гексана и масла. Как было выявлено ранее, значимое влияние на скорость пропитки будет оказывать вязкость наполнителя и температура полиамидной детали, исходя из этого, необходимо обеспечение возможности аналитического способа расчета режимов технологического процесса пропитки, для этого необходимо математически представить эту зависимость.

Пропитка полиамидного материалов основана на достаточно сложных процессах, протекающих в полимере. В зависимости от материала наполнения в качестве преобладающих могут выступать различные виды проникновения, подчиняющиеся различным законам [7, 9]. Чаще всего в качестве наполнителей рассматриваются жидкие материалы, в том числе вода (гигроскопичность полимера до 10%) и различные виды углеводородов, выступающих как растворителями, так и материалами, изменяющими физико-механические свойства полиамидных изделий.

Для решения задачи математического моделирования процесса маслonaполнения необходимо определиться с физикой происходящих процессов. Рассматриваемые полиамидные материалы относятся к гидрофильным [47, 85, 87, 114] и впитывают до 10% жидкости. С другой стороны, технические условия ТУ2224–036–00203803–2012 на полиамиды предусматривают наличие пор в данном материале размерами от 0,8 мм до 1,5 мм. При этом в работах [14, 72, 104] указано, что полиамиды при взаимодействии с окружающей средой собирают жидкости в аморфных областях полиамида. Объем аморфных фаз для полиамида может составлять от 30% до 60%. Проблемы, возникающие с абсорбцией полиамидов, широко известны [4, 91]. Принимая во внимание исследование образцов размерами 4x50x50 мм, большой площади и малой глубиной проникновения жидкости (изменение поверхностного слоя), процесс маслonaполнения можно рассматривать в виде однонаправленного капиллярного явления (рисунок 2.7).

В работах ряда авторов широко представлены математические модели, описывающие капиллярные явления с использованием закона фильтрации в пористых

средах, описываемых системой уравнений неразрывности и закона Дарси (2.10) [78, 105, 113, 115]:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \\ u_x = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad u_y = u_z = 0 \end{cases} \quad (2.10)$$

где: u_x, u_y, u_z – скорость течения жидкости в направлениях x, y, z , соответственно;

k – коэффициент фильтрации, зависящий от свойств жидкости (в первую очередь динамической вязкости, μ) и пористого скелета; p – давление.

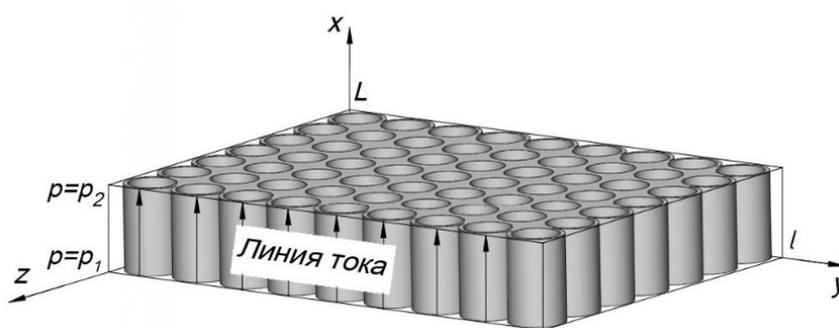


Рисунок 2.7 – Модель технологической системы пропитки

Боковые границы области в связи с незначительной высотой образца можно считать непроницаемыми. На входе области задано постоянное давление $x=0, p=p_1$, на выходе $x=L$ – задано постоянное давление $p=p_2 < p_1$. Массовые силы отсутствуют. Изменения разности давления подчиняется линейному закону [21, 23, 26].

Граничными условия являются: $x=0: p=p_1; x=L: p=p_2$.

При анализе системы уравнений (2.10) было выявлено, что при плоскопараллельном фильтрационном течении давление изменяется по линейному закону [3, 19, 50, 109] (2.11)

$$p(x) = p_1 + \frac{p_2 - p_1}{L} x \quad (2.11)$$

Также, рассмотрев данную модель заполнения (2.10), необходимо отметить невозможность определения разности давления на границах пропитанного ТЖПВ слоя, и, следовательно, стоит задача по корректировке системы уравнения неразрывности и закона Дарси для использования в производственных условиях.

Была выдвинута гипотеза о возможности корректировки существующей математической модели, основанной на принципе подобия. При данной корректировке сложно контролируемый параметр разности давления заменяется показателем разности температур при охлаждении образца.

Результат корректировки системы уравнения неразрывности и закона Дарси имеет следующий вид (2.12). Данная система уравнений описывает поведение условного полностью пропитанного ТЖПВ полиамидного образца с толщиной, равной глубине пропитки.

$$\begin{cases} \frac{\partial u_{Тх,усл.}}{\partial x} = 0 \\ u_{Тх,усл.} = -\frac{k_{Тх,усл.}}{\mu} \frac{\partial T_{усл.}(x)}{\partial x}, \end{cases} \quad (2.12)$$

где $k_{Тх,усл.}$ – коэффициент проницаемости пористой среды, зависящая от перепада температуры, $\text{м}^2 \cdot \text{Па} / \text{°С}$.

Граничными условиями являются:

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

Математическая модель имеет следующие допущения, представленные далее. Боковые границы области в связи с незначительной высотой образца можно считать непроницаемыми. Массовые силы отсутствуют. Изменение температуры по координате x подчиняется линейному закону.

Начальными условиями являются:

- температура полиамидного образца выбирается в соответствие решенной задачи оптимизации;
- содержание гексана в ТЖПВ выбирается в соответствие решенной задачи оптимизации;
- температура ТЖПВ $25 \pm 2 \text{ °С}$ по ГОСТ 8.395–80;
- влажность окружающей среды $55 \pm 10\%$ по ГОСТ 8.395–80.

Для разных глубин пропитки средняя скорость $u_{Tx,усл}$, коэффициент проницаемости $k_{Tx,усл}$, перепад температуры ΔT будут иметь различные значения.

Необходимо отметить, что величина $u_{Tx,усл} = \text{const}$ и представляет собой среднее значение скорости пропитки на всем рассматриваемом диапазоне толщины пропитки (рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 – Условный полиамидный образец, используемый при математическом моделировании

Математические модели, описываемые системами уравнений (2.10) и (3.12), относятся к подобным физическим процессам в соответствии с принципом гидродинамического подобия [35, 101]. Критерием подобия является одинаковое число Рейнольдса (2.13), и условие подобия – одинаковая скорость пропитки (2.15)

$$Re = \frac{d \cdot u_{Tx,усл.}}{\nu} \quad (2.13)$$

где: $u_{Tx,усл.}$ – скорость течения жидкости, м/с; d – характерная длина (например, радиус капилляра, в которой течет жидкость), м; ν – кинематическая вязкость жидкости, м²/с.

$$-\frac{k_{px,усл.}}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{h_{усл.}} = -\frac{k_{Tx,усл.}}{\mu} \cdot \frac{\Delta T}{h_{усл.}} \quad (2.14)$$

$$k_{px,усл.} \cdot \Delta p = k_{Tx,усл.} \cdot \Delta T \quad (2.15)$$

где: $k_{px,усл.}$ – коэффициент проницаемости при использовании в математической модели разности давления; $k_{Tx,усл.}$ – коэффициент проницаемости при использовании в математической модели разности температуры; $h_{усл.}$ – толщина условного полиамидного образца.

Уравнения (2.14) и (2.15) построены исходя из предположения линейности закона изменения температуры (2.16).

$$T(x) = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{L} x. \quad (2.16)$$

Забегая вперед, можно сказать, что данное предположение нашло свое доказательство в ходе экспериментальных исследований, изложенных ниже.

Анализ системы уравнений (3.3) показывает, что для возможности ее практического применения необходимо на основе натурального эксперимента определить следующие неизвестные параметры: скорость пропитки, изменение температуры по координате x , которые позволят вычислить коэффициент проницаемости по следующей зависимости (2.17):

$$k_{T_{x, \text{усл.}}} = \frac{u_{T_{x, \text{усл.}}} \cdot h_{\text{усл.}} \cdot \mu}{\Delta T_{\text{усл.}}}, \quad (2.17)$$

где: μ – динамическая вязкость ТЖПВ, Па·с; $\Delta T_{\text{усл.}}$ – разница температур условного полиамидного образца, $T_2 - T_1$, °С; $h_{\text{усл.}}$ – толщина условного полиамидного образца, м; $u_{T_{x, \text{усл.}}}$ – скорость пропитки условного полиамидного образца, м/с.

Для дальнейшего исследования в целях проведения экспериментального доказательства выдвинутой гипотезы необходимо разработать способ, который позволит экспериментально определить скорость пропитки полиамидных деталей жидкостью с пониженной вязкостью.

2.3 Температурно-динамический способ определения скорости пропитки полиамидного образца

Для определения наполненного состояния полиамидного образца была выдвинута гипотеза о способе определения скорости течения наполнителя в его теле. Данная гипотеза заключается в том, что остывание образца происходит по одной закономерности, но при проникновении наполнителя в полимер на определенную глубину эта закономерность видоизменяется. Поэтому было принято решение установить термодатчики в тело образца на разную глубину для осуществления замера температуры полиамидного образца по высоте в процессе

пропитки им масляным наполнителем.

2.3.1 Разработка схемы размещения термодатчиков в полиамидном образце призматической формы

Согласно этой гипотезе разработан температурно-динамический способ определения скорости пропитки полиамидного образца. Для данного способа контроля разработана расчетная схема расположения термодатчиков в полиамидном образце призматической формы для различных габаритов. За основу была взята расчетная двухмерная схема расположения термопар между стыков двух алюминиевых образцов для изучения коэффициента теплоотдачи при его закалке [15, 16, 28]. Доработанная трехмерная расчетная схема расположения термодатчиков в образце представлена на рисунке 2.9.

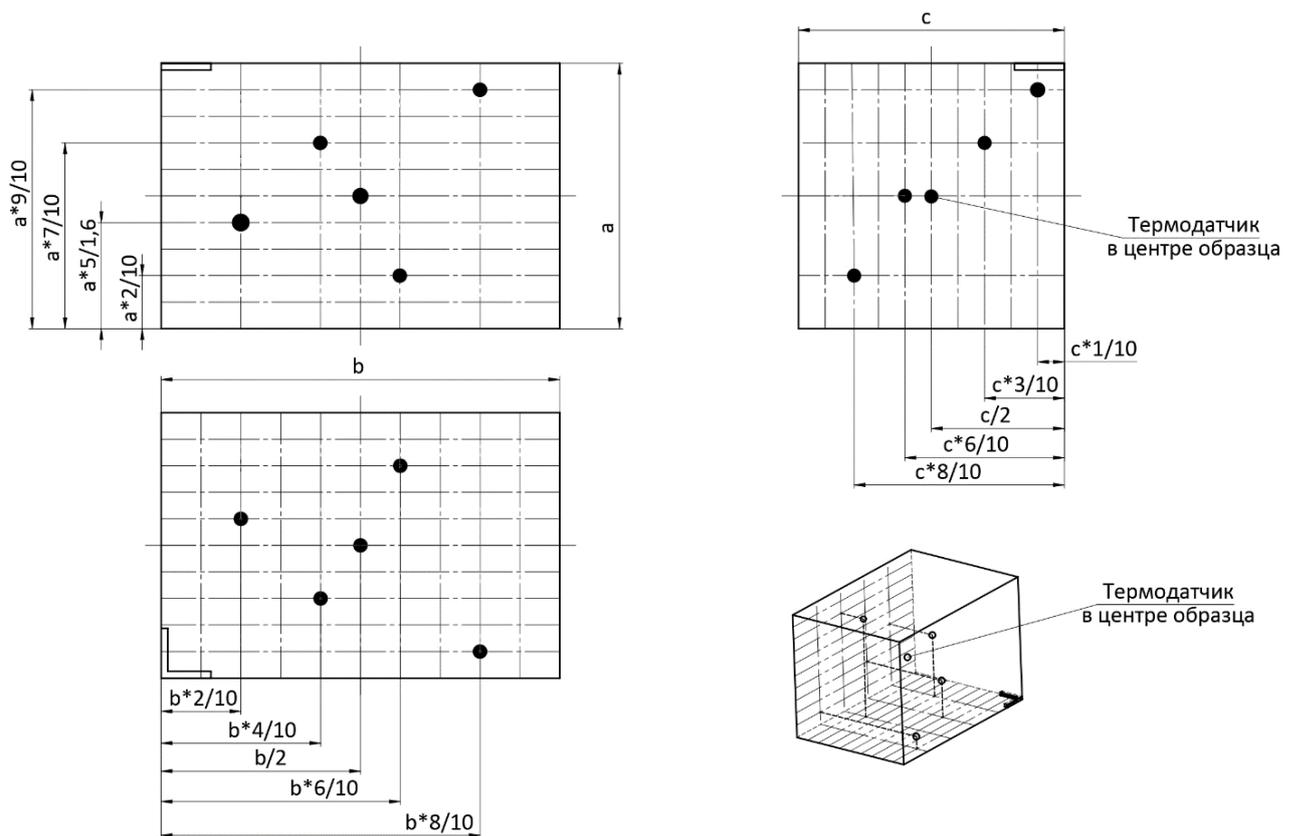


Рисунок 2.9 – Расчетная схема расположения термодатчиков в образце, где:

a – высота, b – длина, c – ширина

В качестве материала для проведения исследования использован полиамид–

6, обоснование использования данного материала образца осуществлено в первой главе. Далее было принято использовать полиамидные образцы размерами 4x50x50 мм. Исходя из этого, разработана экспериментальная схема расположения термодатчиков по глубине по данным размерам образца, представлена на рисунке 2.10.

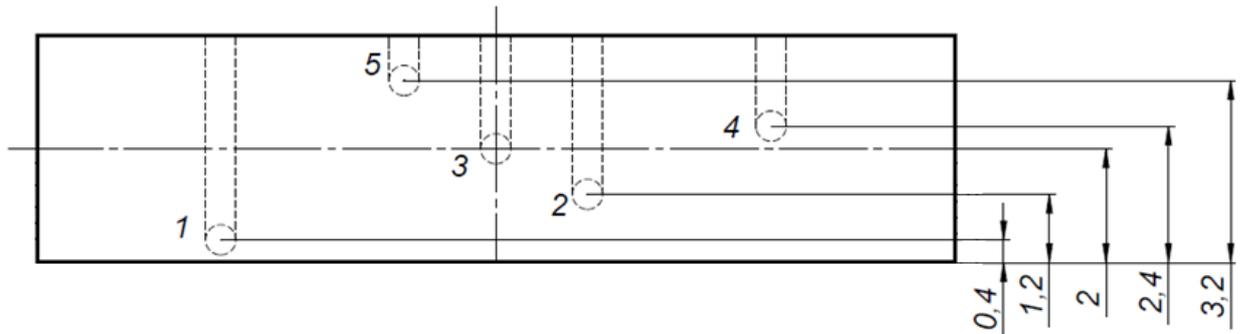


Рисунок 2.10 – Схема глубины расположения термодатчиков, где:
1...5 – Термодатчики

В целях доказательства выдвинутой гипотезы произведены предварительные экспериментальные исследования. Эксперимент производился согласно разработанному ранее технологическому процессу маслonaполнения полиамидных деталей, включая все его этапы. Данные по замеру температуры полиамидного образца при пропитке маслом на примере одного из термодатчиков (в точке 3) представлены на рисунке 2.11.

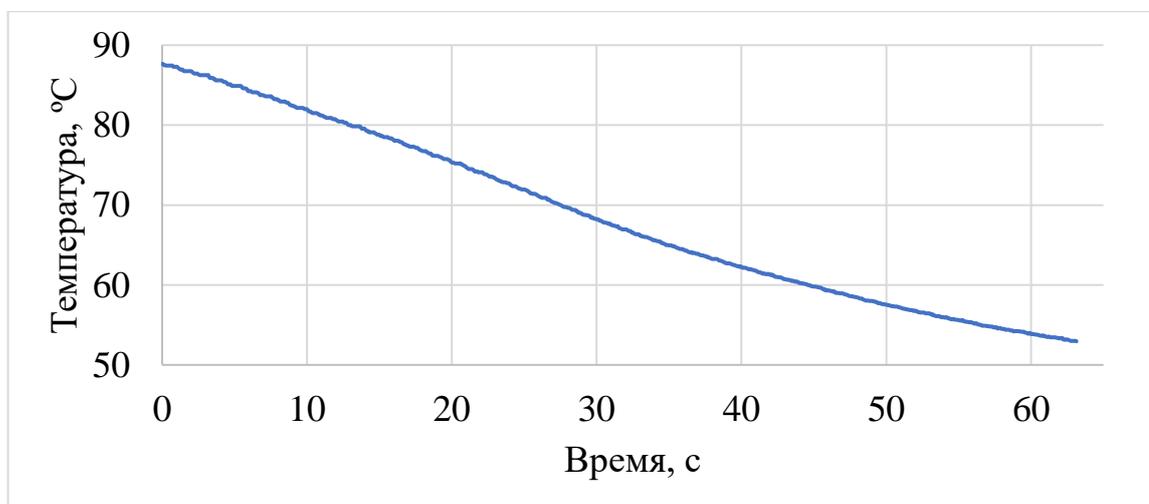


Рисунок 2.11 – График остывания образца, погруженного в масляный наполнитель по термодатчику в точке 3

Для выявления динамики изменения температуры необходимо определить производную по полученным графическим данным. При помощи программного обеспечения PowerGraph (рисунок 2.22) [92] проведено скользящее дифференцирование данных [63] по температуре теплообмена образца и наполнителя в диапазоне 100 точек. Результат представлен на рисунке 2.12.

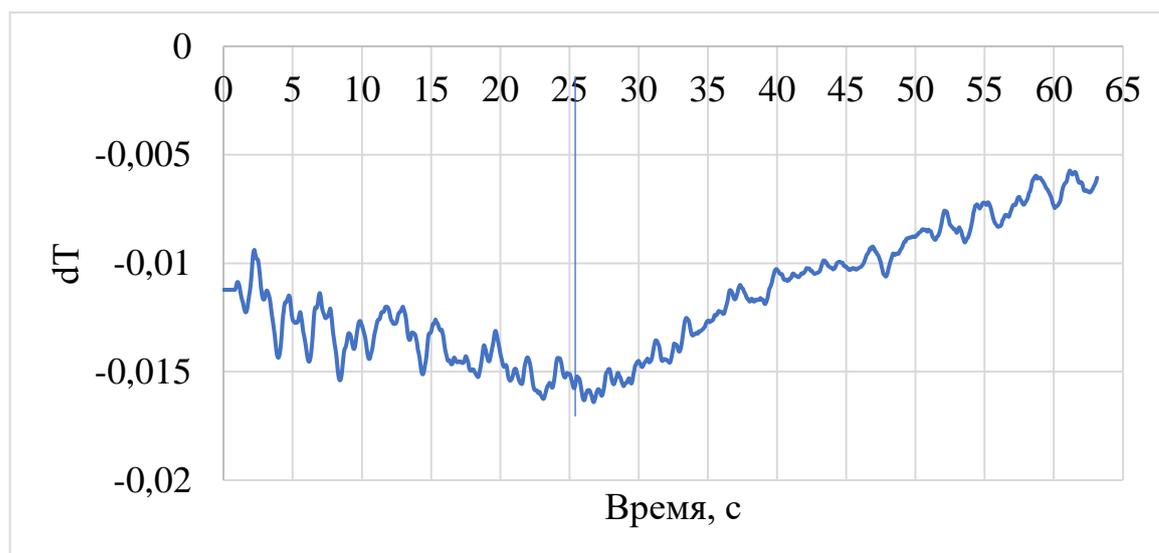


Рисунок 2.12 – Скользящее дифференцирование данных по температуре по термодатчику 3 теплообмена образца и наполнителя в диапазоне 100 точек

По полученным графическим данным видна точка экстремума – минимум, что соответствует закономерности изменения температуры в точке теплообмена полимера и наполнителя. Данные результаты соответствуют и остальным точкам расположения термодатчиков с разницей по времени проникновения в образец наполнителя снизу вверх.

Результаты проведенного исследования доказывают выдвинутую гипотезу об изменении динамики остывания полиамидного образца при проникновении в него масляного наполнителя.

2.3.2 Конечно-разностный расчет влияния размещения датчиков температуры на точность температурно-динамического способа контроля скорости пропитки

Далее для дополнительного обоснования выдвинутой гипотезы было принято решение произвести исследования по влиянию конвекции и изменению объема полиамидного образца, а также определения допустимого диаметра отверстия и его направления расположения в теле полимера для установки в него термодатчика. Основное условие состоит в том, что данные результаты отклонения полученных данных при установке в образец термодатчиков не должны превышать от принятых 3% по ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002.

По проведенному ранее аналитическому расчету возникла необходимость провести исследование по влиянию конвекции и изменению объема тела на температуру при нагреве от внутренних источников тепла при высокочастотной обработке полиамидного образца.

Для проведения данного исследования выполнены следующие действия: смоделировать процесс высокочастотного разогрева в программном комплексе SOLIDWORKS Simulate с применением конечно-разностного расчета; смоделировать процесс высокочастотного разогрева в программном комплексе MSC Sinda (графический интерфейс Patran) с применением конечно-разностного расчета; произвести сравнительный анализ полученных данных.

Вследствие выполнения в теле полиамидного образца отверстий под расположение в нем термодатчиков изменяется его объем. Данные отверстия могут быть расположены вдоль или поперек для конкретно определенных размеров полиамидного образца 4x50x50 мм. Данные по характеристикам полиамидного образца представлены в таблице 2.3 [127].

Исходные данные высокочастотного разогрева представлены в таблице 2.4. Для расчета принято достаточным выполнение одного отверстия, диаметры которого представлены в таблице 2.5 [8, 84].

Таблица 2.3 – Исходные данные

Параметры	Значения
Материал	ПА6 ТУ2224-036-00203803-2012
Размеры образца	50x50x4 мм
Плотность	1120 кг/м ³
Удельная теплоемкость	1601 Дж/кг·К
Теплопроводность	0,23 Вт/(м·К)

Таблица 2.4 – Исходные данные

Параметры	Значения
Коэффициент конвекции	10 Вт/м ² К
Время работы ВЧ–генератора	10 сек
Температура окружающей среды	20 °С
Мощность нагрева	400 Вт
Глубина отверстия вдоль	40 мм
Глубина отверстия поперек	3 мм

Моделирование процесса высокочастотного разогрева в программном комплексе SOLIDWORKS Simulation с применением конечно–разностного расчета. Для моделирования процесса высокочастотного разогрева в программном комплексе SOLIDWORKS Simulation построена конечно–разностная математическая модель разогрева исследуемого объекта от внутренних источников тепла [1, 76].

Сетка разбиения тела: треугольник. Размер: 1,077 мм; соотношение: 1,5 [17, 108]. Модель конечно–разностного расчета представлена на рисунке 2.13. В котором отображены температуры разных участков полиамидного образца в зависимости влияния на них конвекции при высокочастотном нагреве (от внутренних источников тепла) в случаях выполнения отверстия вдоль и поперек образца. Цветовая температура в °С указана справа.

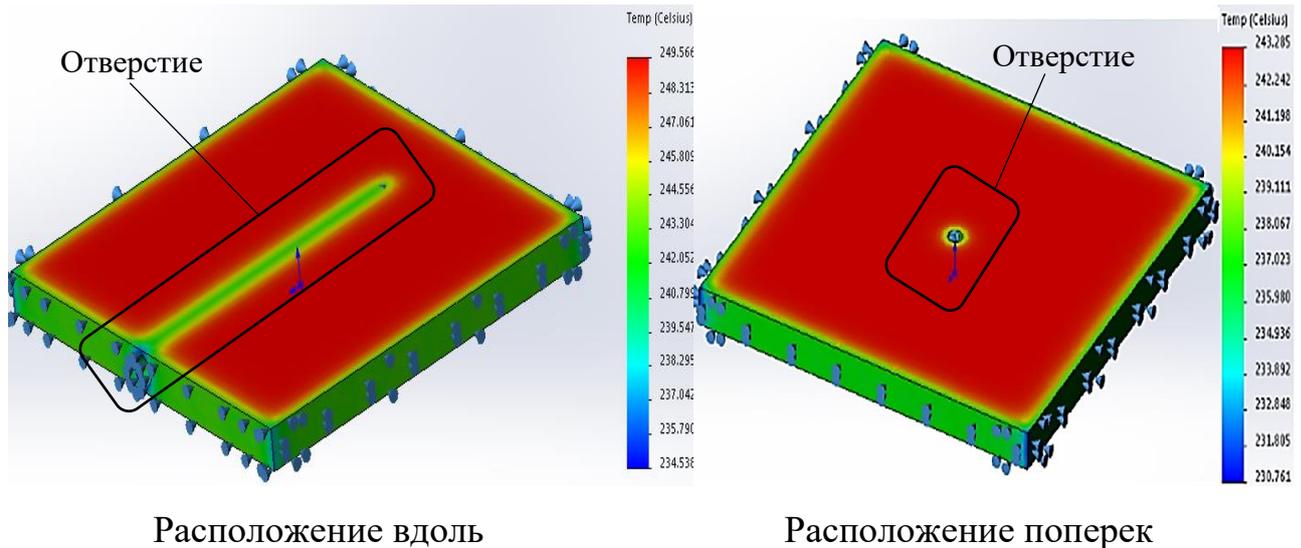


Рисунок 2.13 – Результат конечно–разностного расчета SOLIDWORKS Simulation

Итоги конечно–разностного расчета в программном комплексе SOLIDWORKS Simulation, приведенные в таблице 2.5, также построены зависимости температур от размера отверстия в исследуемом объекте (рисунок 2.14).

Таблица 2.5 – Итоги конечно–разностного расчета в программном комплексе SOLIDWORKS Simulation

Диаметр отв., мм	Температура (отв. вдоль), °C	Температура (отв. поперек), °C
0	243,075	243,075
0,25	243,115	243,078
0,5	243,244	243,088
1,0	243,769	243,127
2,0	245,901	243,285
3,0	249,547	243,549

Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что влияние конвекции оказывает незначительное воздействие на температуру нагрева по сравнению с тем, как на нее влияет изменение объема, вследствие увеличения диаметра отверстий в исследуемом объекте.

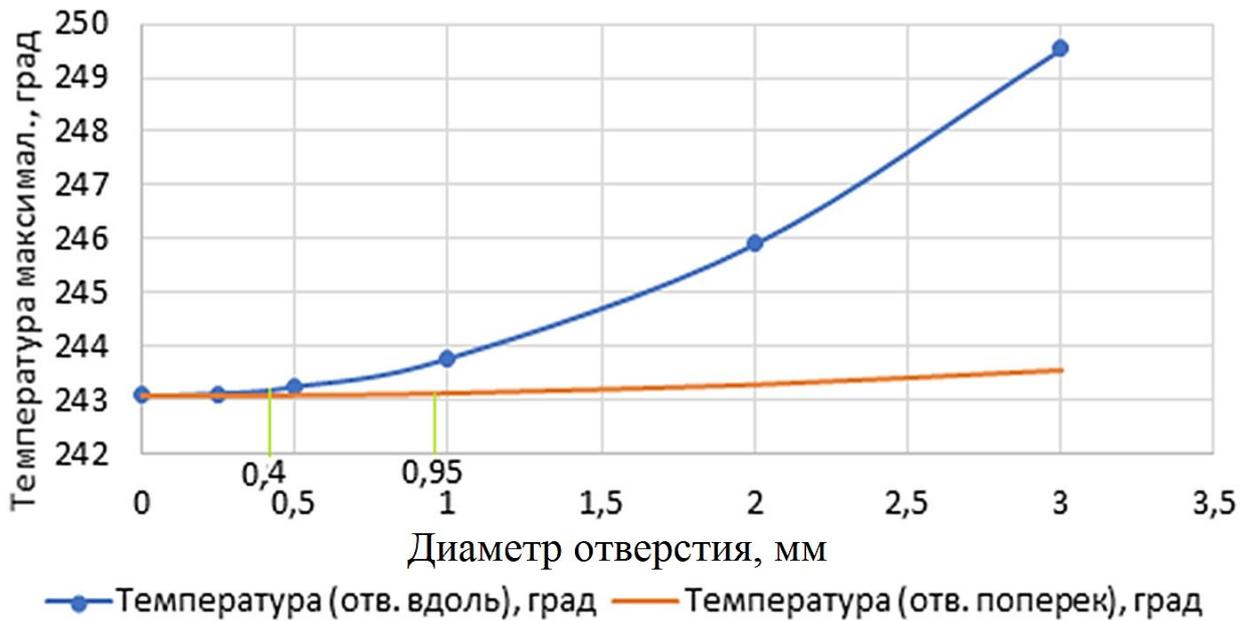
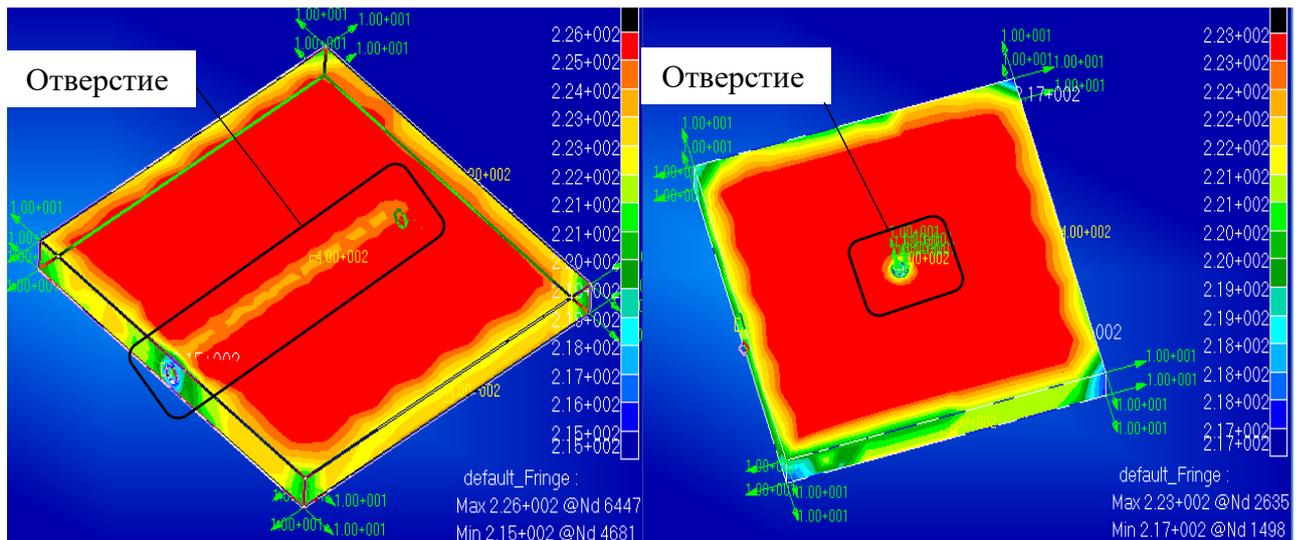


Рисунок 2.14 – Зависимость температуры от количества отверстий исследуемого объекта

Участки образца, на которые воздействует конвекция, отмечены стрелками и представлены на рисунке 2.13. По мере уменьшения объема увеличивается температура нагрева от внутренних источников. Из полученных данных можно определить допустимые размеры отверстия: поперек 0,95 мм, поперек 0,4 мм. Максимальный размер диаметра отверстия ограничивается первой точкой, после которой график зависимости переходит из приблизительной параллельности оси абсцисс на резкое увеличение температуры [30, 53, 79].

Моделирование процесса высокочастотного разогрева в программном комплексе MSC Sinda с применением конечно-разностного расчета. Для сходимости полученных результатов было принято решение провести подобные расчеты в другом программном комплексе, а именно MSC Sinda.

Сетка разбиения объемного тела: Elem shape, Tet; Mesher, TetMesh; Topology, Tet10 [41, 126, 128]. Модель конечно-разностного расчета представлена на рисунке 2.15. В котором отображены температуры разных участков полиамидного образца в зависимости влияния на них конвекции при высокочастотном нагреве (от внутренних источников тепла) в случаях выполнения отверстия вдоль и поперек образца. Цветовая температура указана справа в 10^2 °C.



Расположение вдоль

Расположение поперек

Рисунок 2.15 – Результат конечно-разностного расчета в программном комплексе MSC Sinda

Итоги исследования в программном комплексе MSC Sinda представлены в таблице 2.6, также построены зависимости температур от размера отверстия в исследуемом объекте (рисунок 2.16).

Таблица 2.6 – Итоги конечно-разностного расчета в программном комплексе MSC Patran 2014, Sinda

Диаметр отв., мм	Температура (отв. вдоль), °C	Температура (отв. поперек), °C
0	223,128	223,128
0,25	223,14	223,122
0,5	223,215	223,117
1	223,587	223,136
2	225,678	223,296
3	228,926	223,527

Итоги конечно-разностного расчета в программном комплексе MSC Sinda схожи с результатами, полученными в программном комплексе SOLIDWORKS

Simulation. Температура нагрева образца имеет такую же закономерность изменения от изменения диаметра отверстия.

По окончании расчетов в программном комплексе MSC Sinda были получены следующие диаметры отверстий: поперек – 0,93 мм, вдоль – 0,42 мм.

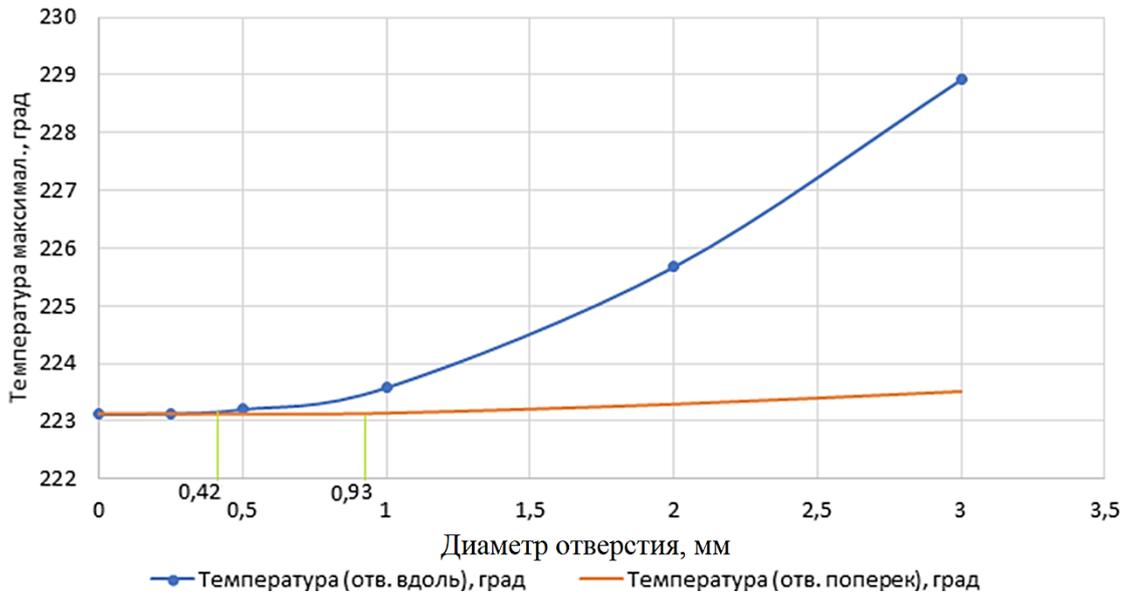


Рисунок 2.16 – Зависимость температуры от количества отверстий исследуемого объекта

Анализ сходимости результатов конечно-разностных расчетов в двух программных комплексах показал, что влияние конвекции на открытые участки исследуемого объекта (боковые стенки и сами отверстия в теле), площадь которых увеличивается по мере увеличения отверстия. Наиболее значимое влияние на температуру влияния полиамидного образца оказывает изменение размера отверстия – чем больше отверстие, тем больше нагрев от внутренних источников тепла.

Итоги сравнения двух аналогичных расчетов сведены в таблицу 2.7 и представлены на рисунке 2.16. Итог допустимого диаметра отверстия будет иметь значение: поперек 0,9 мм, вдоль 0,4 мм, определенные на рисунке 2.17 по графическим данным.

Таблица 2.7 – Итоги сравнения расчетов в программных комплексах

Диаметр отв., мм	Вдоль		Поперек	
	Температура 1 (Simulation), °C	Температура 2 (MSC Sinda), °C	Температура 3 (Simulation), °C	Температура 4 (MSC Sinda), °C
0	243,075	223,128	243,08	223,13
0,25	243,115	223,14	243,08	223,12
0,5	243,244	223,215	243,09	223,12
1	243,769	223,587	243,13	223,14
2	245,901	225,678	243,29	223,3
3	249,547	228,926	243,55	223,53

В конечном итоге были определены максимально допустимые размеры диаметров отверстий в полиамидном образце для установки термодатчика, а также была доказана сходимость расчетов в двух различных программных комплексах. Разница между максимальными температурами составила 20 °C. При этом динамика изменения самой температуры идентична для данных расчетов в программных комплексах. Самым приемлемым способом расположения отверстия под термодатчик, при котором погрешность измерений минимальна, является поперек полиамидного образца.

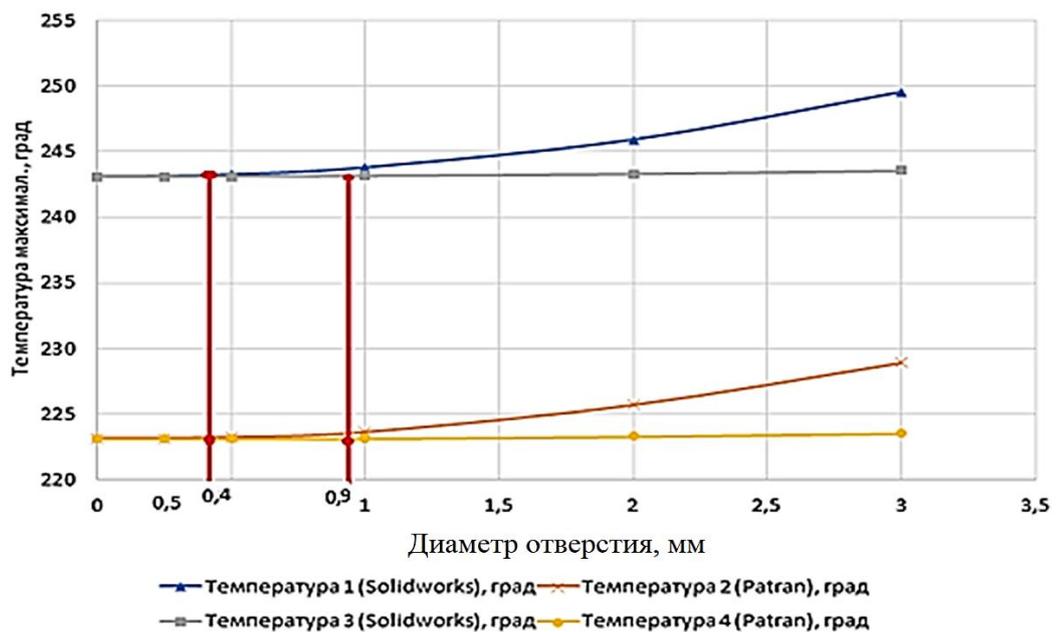


Рисунок 2.17 – Итоги анализа сходимости результатов расчетов в программных комплексах SOLIDWORKS Simulation и MSC Sinda

Так как в связи со сложностью подбора термодатчика такого малого размера возникает необходимость в выборе большего диаметра отверстия под исследования температуры полиамидного образца. Наиболее предпочтительным для настоящего исследования является измерение температуры полиамидного образца термистором NTC 3950, а не датчика из металлической основы (термопары), так как это может вызвать проблемы с высокочастотным нагревом, рассмотренным ранее в исследовании [27], возникновение прогара образца в точках расположения термодатчика по причине резких скачков мощности ВЧ генератора и выполнения роли термопары дополнительного электрода. Поэтому принято решение для настоящего исследования применить термодатчик модели NTC 3950 на 10 кОм [11], необходимый диаметр отверстия по его установке составляет 2,2 мм. Исходя из этого необходимо рассчитать погрешность результата измерений, возникших от принятого решения, по формуле 2.18 из данных на рисунке 2.17, рассчитанных в программном комплексе SOLIDWORKS Simulation и MSC Sinda, в случае выполнения отверстия поперек образца.

$$\Delta_{\text{Поперек Patran}} = 100 - \frac{T_{\text{без ТП}} \cdot 100}{T_{2,2\text{мм ТП}}} \quad (2.18)$$

$$\Delta_{\text{Поперек Patran}} = 100 - \frac{223,13 \cdot 100}{223,44} = 0,139 \%$$

$$\Delta_{\text{Поперек SolidWorks}} = 100 - \frac{243,08 \cdot 100}{243,44} = 0,148 \%$$

где: $\Delta_{\text{поперек}}$, $\Delta_{\text{вдоль}}$ – погрешность измерений вдоль и поперек полиамидного образца соответственно, %; $T_{\text{без ТП}}$ – температура в теле полиамидного образца без отверстий, °С; $T_{2,2\text{мм ТП}}$ – температура в теле исследуемого объекта с диаметром отверстия 2,2 мм.

Из полученных результатов видно, что наиболее предпочтительным и не превышающим погрешность больше 3% является расположение термодатчиков поперек при диаметре одного отверстия 2,2 мм, погрешность составила до 0,15%.

Далее для уже разработанной схемы расположения термодатчиков (рисунок 2.9) в полиамидном образце в данной работе необходимо произвести расчет погрешности температуры полиамидного образца при высокочастотном разогреве от

различного количества термодатчиков. Для этого построена конечно–элементная и общая математическая модель по расчету влияния количества термопар на нагрев образца при высокочастотной обработке. Произведен сравнительный анализ полученных результатов по разработанному контактному способу измерения температуры полиамидного образца по всему объему при высокочастотной обработке. Исходные данные для проведения данного исследования представлены в таблице 2.3. Диаметры отверстия 2,2 мм, глубина согласно схеме 2.9.

Разностно–элементный математический расчет. Построение конечно–элементной математической модели по расчету влияния количества термопар на нагрев образца при высокочастотной обработке выполнялось в программном комплексе MSC Patran Sinda [53, 79]. На рисунке 2.18 отображены температуры разных участков полиамидного образца в зависимости от влияния на них конвекции при высокочастотном нагреве (от внутренних источников тепла). Цветовая температура указана справа в 10^2 °С.

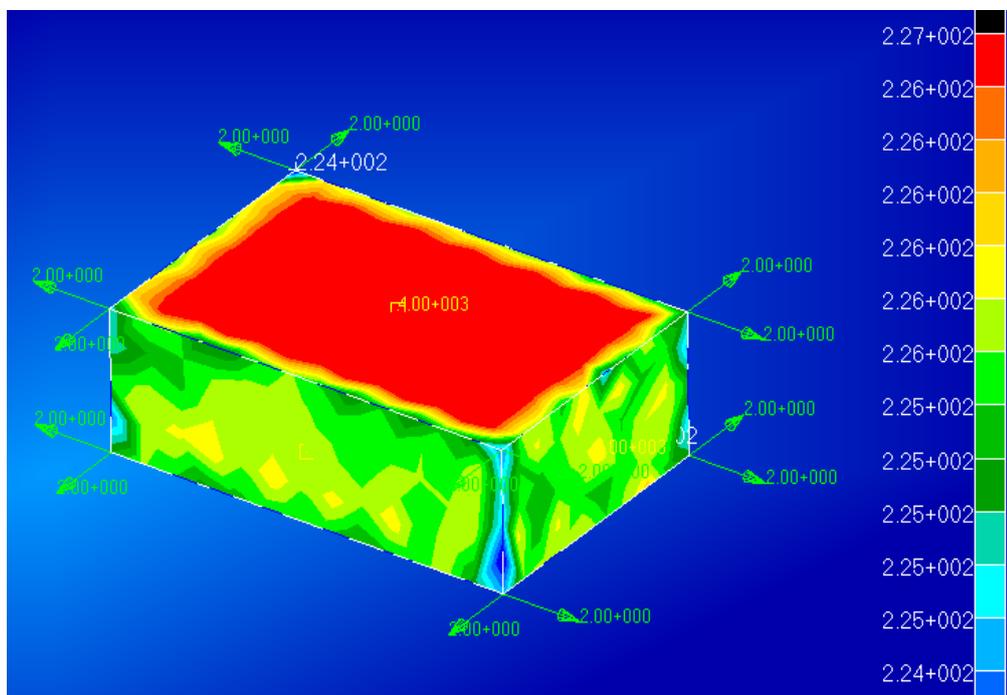


Рисунок 2.18 – Конечно-элементная математическая модель опытного образца

По результатам аналитического расчета программного комплекса MSC Sinda, приведенных в таблице 2.8, на рисунке 2.19 представлены графики зависимости

температуры от количества отверстий под термодатчики в исследуемом объекте.

Таблица 2.8 – Свод результатов расчета MSC Sinda

Количество отв. под ТД, шт	Температура на плоскости симметрии, °С	Температура на поверхности тела, °С	Температура на стенке отверстия, °С
0	220,746	202,701	–
1	221,500	203,516	220,251
2	221,546	203,538	220,263
3	221,625	203,569	220,282
4	221,630	203,558	220,271
5	221,678	203,575	220,293

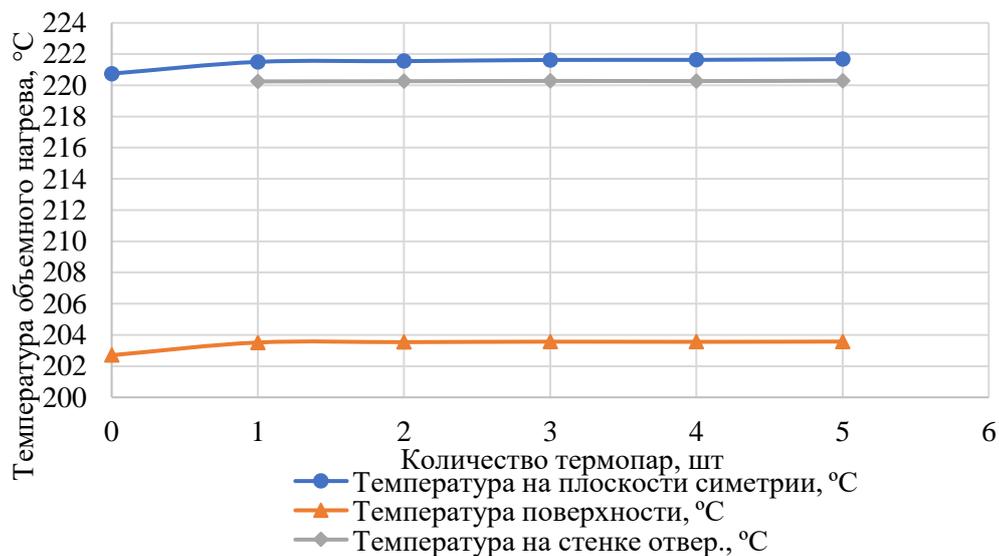


Рисунок 2.19 – Результаты расчетов MSC Sinda

Из полученных графических данных можно сделать вывод, что при высокочастотном разогреве по мере уменьшения массы вследствие выполнения отверстий в теле температура полиамидного образца увеличивается по всему объему.

Расчет погрешности, возникшей от установки термопар в полиамидный образец (2.19)

$$\Delta_1 = 100 - \frac{T_{\text{без ТП}} \cdot 100}{T_{5\text{ТП}}} = 100 - \frac{220,746 \cdot 100}{221,500} = 0,34 \%. \quad (2.19)$$

где: $T_{\text{без ТП}}$ – температура в теле полиамидного образца без отверстий, °С; $T_{5\text{ТП}}$ – температура в теле полиамидного образца с 5-ю отверстиями, °С;

Результаты построения разностно–элементной математической модели показали, что рассчитанное значение погрешности не превышает допустимого значения 3%.

Общий математический расчет разработанного способа контроля. Построение общей математической модели по расчету влияния количества термопар на нагрев образца при высокочастотной обработке.

Процесс объемного разогрева полиамидного образца размерами 50x50x4 мм от внутренних источников тепла отнесем к частному случаю теплопроводности однородной пластины.

Равномерный объемный нагрев $q_v \text{ const}$. Коэффициент конвективной теплоотдачи $\alpha \text{ const}$ и температура окружающей среды $T_{\text{воз}} \text{ const}$. Вследствие одинакового влияния конвекции на две стороны пластины температура этих сторон одинакова.

Изменение температуры только вдоль оси x (рисунок 2.20), направленной по нормали к поверхности тела. Температуры на оси симметрии образца и на его поверхности обозначены T_0 и $T_{\text{пов}}$.

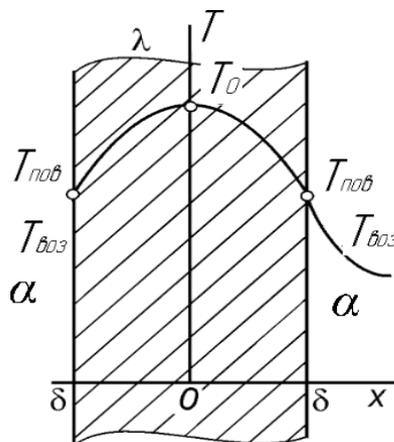


Рисунок 2.20 – Расчетная схема теплопроводности однородной пластины

Помимо всего прочего, необходимо вычислить распределение температуры в образце и количество тепла, отданного в окружающую среду (2.20) [30, 128]

$$T(x) = T_{\text{воз}} + \frac{q_v \cdot \delta}{\alpha} + \frac{q_v}{2 \cdot \lambda} (\delta^2 - x^2), \quad -\delta \leq x \leq \delta, \quad (2.20)$$

где: $T_{\text{воз}}$ – температура окружающей среды (воздуха), 20 °С; α – коэффициент конвективной теплопередачи, 10 Вт/(град·м²); λ – коэффициент теплопроводности полимера (ПА 6), 0,26 Вт/(град·м); δ – крайнее положение точки, контактирующей с окружающей средой, 0,002 м; q_v – объемная производительность внутренних источников теплоты, Вт/м³.

Объемная производительность внутренних источников теплоты рассчитывается по формуле (2.21)

$$q_v = \frac{Q}{V}, \quad (2.21)$$

где: Q – тепловая мощность от каждого внутреннего источника теплоты, 10 Вт; V – объем тела, м³.

Результаты расчетов объемной производительности внутренних источников теплоты сведены в таблицу 2.9.

Таблица 2.9 – Результаты расчетов объемной производительности внутренних источников теплоты

Количество отв. под ТД, шт.	V, м ³	q _v , Вт/м ³
0	1,00000·10 ⁻⁵	1,000·10 ⁶
1	9,99877·10 ⁻⁶	1,001·10 ⁶
2	9,99754·10 ⁻⁶	1,002·10 ⁶
3	9,99631·10 ⁻⁶	1,004·10 ⁶
4	9,99508·10 ⁻⁶	1,005·10 ⁶
5	9,99385·10 ⁻⁶	1,006·10 ⁶

Температура на поверхности тела (x равно δ) по формуле (2.22)

$$T_{нов} = T_{воз} + \frac{q_v \cdot \delta}{\alpha} \quad (2.22)$$

Температура на плоскости симметрии (x равно 0) по формуле (2.23)

$$T_0 = T_{нов} + \frac{q_v \cdot \delta^2}{2 \cdot \lambda} \quad (2.23)$$

Результаты расчетов температуры по граничным условиям третьего рода на поверхности тела [41, 126] и на плоскости симметрии сведены в таблицу 2.9, рисунок 2.21.

Зависимость температурного поля, формула [30, 128] (2.24)

$$T(r) = T_{воз.} + \frac{q_v \cdot \delta}{2\alpha} \cdot \left[1 - \left(\frac{\delta_r}{\delta} \right)^2 \right] + \frac{q_v \cdot \delta^2}{4\lambda} \cdot \left[1 + \left(\frac{\delta_r}{\delta} \right)^2 \cdot 2 \ln \frac{r}{\delta} - \left(\frac{r}{\delta} \right)^2 \right], \delta_r \leq r \leq \delta, \quad (2.24)$$

где δ_r – радиус отверстия под термопару, 0,000125 м.

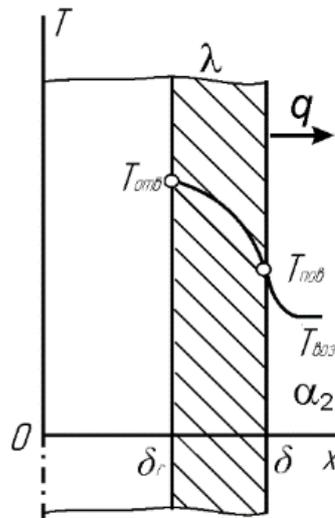


Рисунок 2.21 – Расчетная схема температуры на стенке отверстия

Перепад температур между поверхностью тела и теплоотдающей поверхностью стенки отверстия, формула (2.25)

$$T_{стен.отв.} - T_{нов.} = \frac{q_v \cdot \delta_r^2}{4\lambda} \cdot \left[\left(\frac{\delta}{\delta_r} \right)^2 - 2 \ln \frac{\delta}{\delta_r} - 1 \right], \quad (2.25)$$

Отсюда (2.26)

$$T_{стен.отв.} = \frac{q_v \cdot \delta_r^2}{4\lambda} \cdot \left[\left(\frac{\delta}{\delta_r} \right)^2 - 2 \ln \frac{\delta}{\delta_r} - 1 \right] + T_{нов.} \quad (2.26)$$

Результаты расчетов температуры на стенки отверстия сведены в таблицу 2.10.

Таблица 2.10 – Результаты расчетов температуры на поверхности тела, плоскости симметрии и на стенки отверстия

Количество отв. под ТД, шт.	$T_{нов.}$, °С	T_0 , °С	$T_{стен.отв.}$, °С
0	220,000	227,692	–
1	220,246	227,948	224,029
2	220,493	228,204	224,280
3	220,741	228,462	224,553
4	220,989	228,719	224,785
5	221,238	228,978	225,039

Из полученных зависимостей видно, что при увеличении отверстий в теле увеличивается температура как на поверхности образца, так и на стенке отверстия. Это можно объяснить уменьшением объема образца, влекущим за собой увеличение объемной производительности внутренних источников теплоты при постоянной мощности (рисунок 2.22).

Расчет погрешности, возникшей от установки термодатчиков в полиамидный образец (2.27)

$$\Delta_2 = 100 - \frac{T_{без\ ТП} \cdot 100}{T_{5\ ТП}} = 100 - \frac{227,692 \cdot 100}{228,978} = 0,57\% \quad (2.27)$$

где: $T_{без\ ТП}$ – температура в теле полиамидного образца без отверстий, °С; $T_{5\ ТП}$ – температура в теле исследуемого объекта с 5-ью отверстиями, °С.

При расчете общей математической модели показали, что рассчитанное значение погрешности не превышает допустимого значения, равного 3%.

Сравнительный анализ полученных результатов. Для составленной предварительной схемы расположения термопар в теле полиамидного образца для кон-

троля температуры объемного нагрева при высокочастотной обработке была математически обоснована применимость данной схемы.

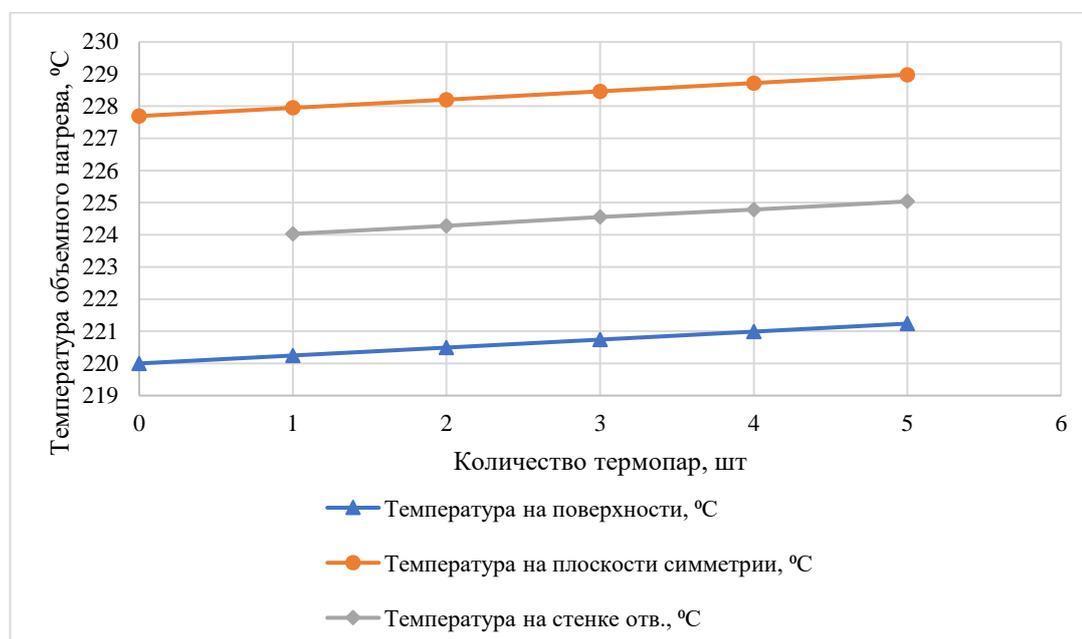


Рисунок 2.22 – Результаты общего математического расчета

При расчете погрешности, возникающей от количества отверстий под термопары, выполненным при помощи разностно-элементной модели в программном комплексе MSC Sinda (Δ_1 равно 0,34%), и общей математической модели по расчетным формулам (Δ_1 равно 0,57%). По итогу проведенного этапа исследования погрешность измерений от примененного способа контроля температуры составляет до 0,57%, согласно полученному максимальному значению.

После выбора размеров исследуемого полиамидного образца и разработки расчетно– и экспериментально обоснованного способа контроля температуры всего его объема, а также допустимого диаметра отверстий под термодатчик необходимо перейти к разработке контрольной операции технологического процесса маслonaполнения.

В связи с этим стал возможен переход к следующему этапу исследования – экспериментальному определению скорости пропитки и изменения температуры по координате x , являющихся параметрами математической модели, необходимыми для вычисления коэффициента проницаемости по формуле (2.17).

2.4 Экспериментальное определение неизвестных параметров математической модели (температурного градиента, коэффициента проницаемости)

Для нахождения неизвестных параметров математической модели была разработана экспериментальная автоматизированная установка. При этом нагреву предшествовал процесс сушки, что обеспечило гарантированное соблюдение условий однофазного заполнения пористого материала.

Эксперимент по маслonaполнению проводился с использованием полиамида марки ПА-6 и моторного масла М8-В (из числа наиболее широко используемое по параметрам вязкости) в смеси с гексаном (ТЖПВ, гексана 20%, масла 80%), что соответствовало условиям, предъявляемым к составу рабочей жидкости (РЖ) [51, 121].

РЖ применяется для проведения испытаний полиамидных деталей как стандартная углеводородная среда.

Рабочая жидкость должна обеспечивать следующие функции:

- рабочая жидкость является смазочной средой, обеспечивающей снижение трения в сопрягающихся парах;
- рабочая жидкость является теплоносителем, передающим теплоту от нагретых частей механизмов холодным;
- рабочая жидкость является промывочной средой. В своем движении она уносит продукты изнашивания деталей и другие загрязнения;
- рабочая жидкость является средством консервации, защищающим от коррозии деталей машин и механизмов;
- рабочая жидкость демпфирует колебания, вызванные механическими ударами.

Важным условием эксплуатации рабочей жидкости является ее широкий диапазон рабочих температур до +90 °С.

Выбранная ТЖПВ с процентным соотношением, указанным выше, полностью соответствует представленным требованиям

Для проведения экспериментов использовались образцы размерами 4x50x50

мм разогретые до температуры 50 °С.

Образцы помещались в ванну с ТЖПВ, температура которой составляла 25 ± 2 °С. Определение температуры по глубине полиамидного образца определялась термодатчиками ТД, расчетная схема расположения которых представлена на рисунке 2.23.

Координаты расположения датчиков (рисунок 3.3 поз. 1...5, $x=0,4$; $x=1,2$; $x=2$; $x=2,4$; $x=3,2$) были подобраны таким образом, что позволило определить скорость наполнения полиамидного образца ТЖПВ с минимальным влиянием температурного воздействия окружающей среды.

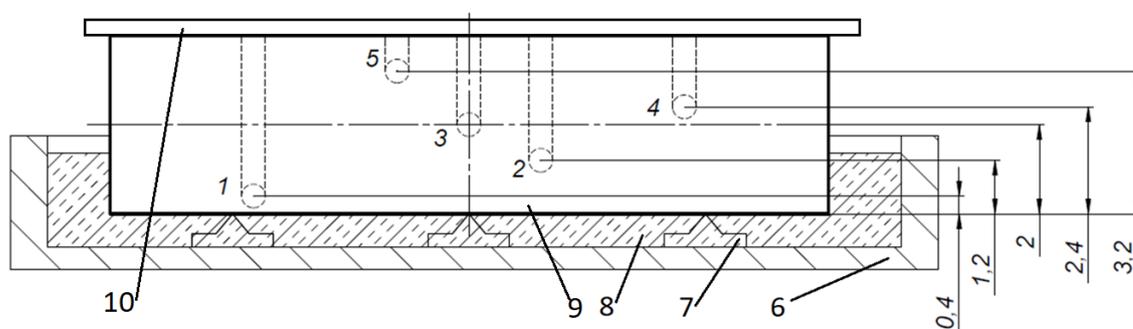


Рисунок 2.23 – Схема устройства маслonaполнения с указанием координат расположения термодатчиков в образце, где: 1...5 – термодатчики; 6 – ванна; 7 – опоры для создания зазора между образцом и ванной; 8 – масляный наполнитель; 9 – полиамидный образец; 10 – теплоизолятор

Падение температуры полиамидного образца происходило вследствие проникновения в него жидкости (ТЖПВ), отличающейся своей температурой нагрева. В ходе эксперимента проводился автоматизированный контроль температуры полиамидного образца с целью определения момента достижения заданной глубины наполнителем.

Определение момента достижения ТЖПВ заданной глубины производилось по резкому изменению динамики падения температуры, обработанные в ПО Power-Graph данные графически представлены на рисунке 2.24.

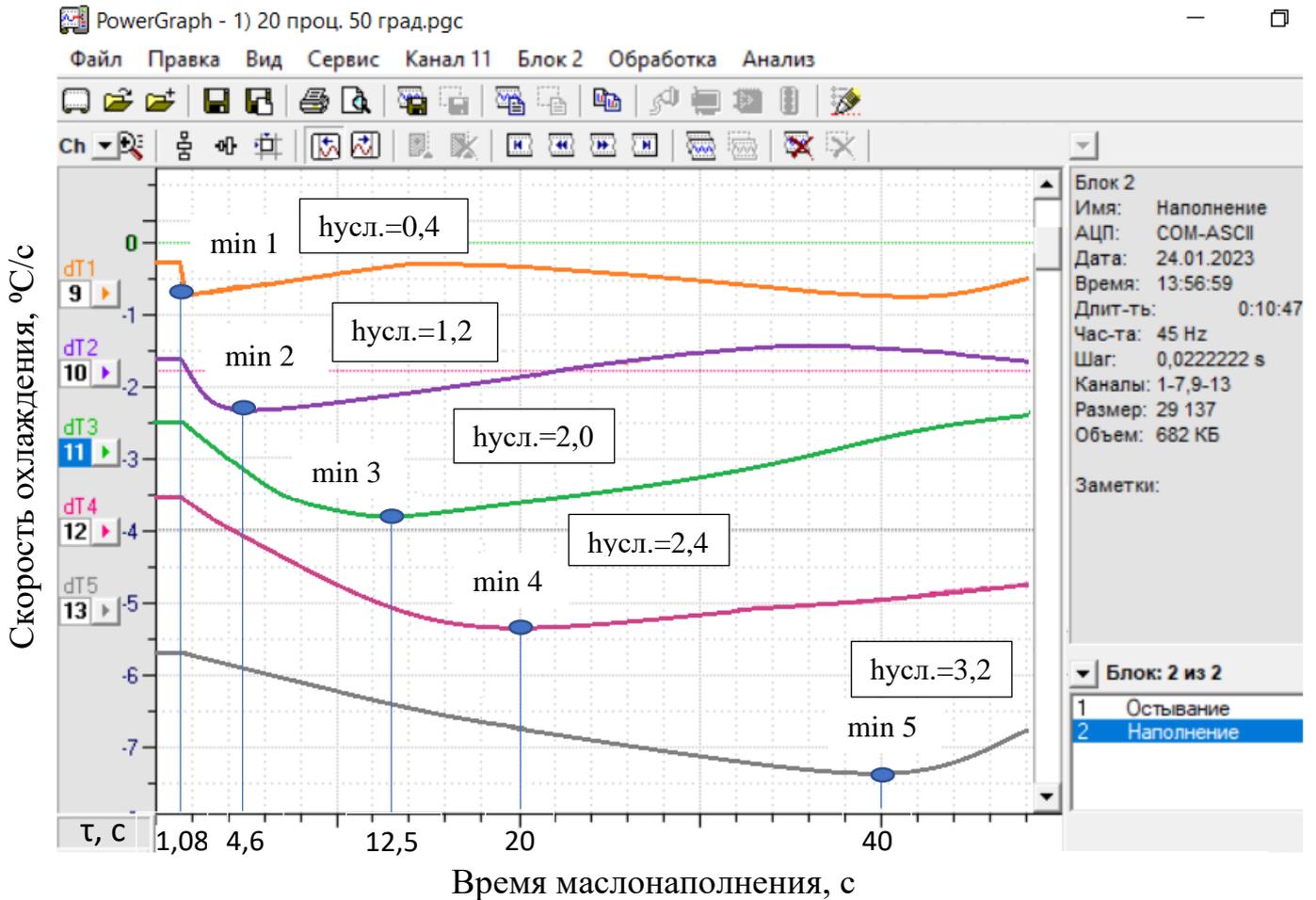


Рисунок 2.24 – Экспериментальные данные изменения динамики температуры полемичного образца при маслonaполнии, где: dT – динамика падения температуры по времени τ ; $\text{min } 1 \dots 5$ – точки экстремума изменения динамики температуры, соответствующим толщинам условного полиамидного образца хусл.

Полученные данные времени достижения РЖ позволили определить скорость пропитки.

Построена зависимость изменения температуры образца по сечениям, зафиксированные в моменты достижения смеси в измеряемых точках расположения ТД, представленном на рисунке 2.25.

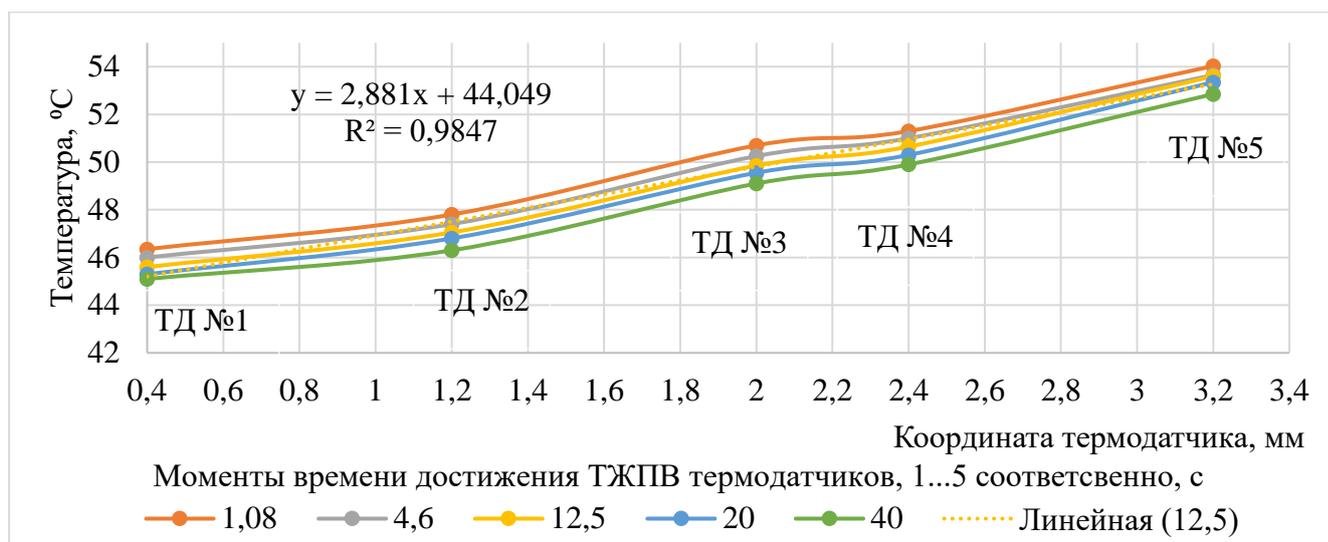


Рисунок 2.25 – Графики изменения температуры образца в моменты достижения ТЖПВ каждого термодатчика по координатам их расположения

Температуры на входе в полиамидный образец, так и на толщине УПО при маслonaполнении, меняются в узком диапазоне, отклонение от средней температуры составляет $\approx \pm 1\%$. Следовательно, можно сделать вывод о том, что температуры на границе раздела сред (наполнителя и полиамидного образца) и на глубине ($h_{\text{усл.}}$) пропитки постоянны, что соответствует принятым граничным условиям математической модели.

Полученный вывод подтверждает соответствие граничных условий математической модели уравнению неразрывности и закону Дарси (3.1), где при граничных условиях давление на входе и выходе постоянно.

Аналогичным образом, аппроксимация полученных данных показала, что изменения температуры полиамидного образца в каждый момент времени по мере прохождения наполнителя подчиняется линейному закону, как и изменение давления (2.11). Достоверность аппроксимации по термодатчику 3, находящемуся на середине толщины исследуемого образца (рисунок 2.24), составляет около 0,9847.

После определения зависимости температуры произведено определение средней скорости пропитки по координате. Для этого экспериментально определено время достижения наполнителя заданной координаты полиамидного образца (рисунок 2.21) по способу, описанному ранее. Результат определения скорости пропитки представлен на рисунке 2.26.

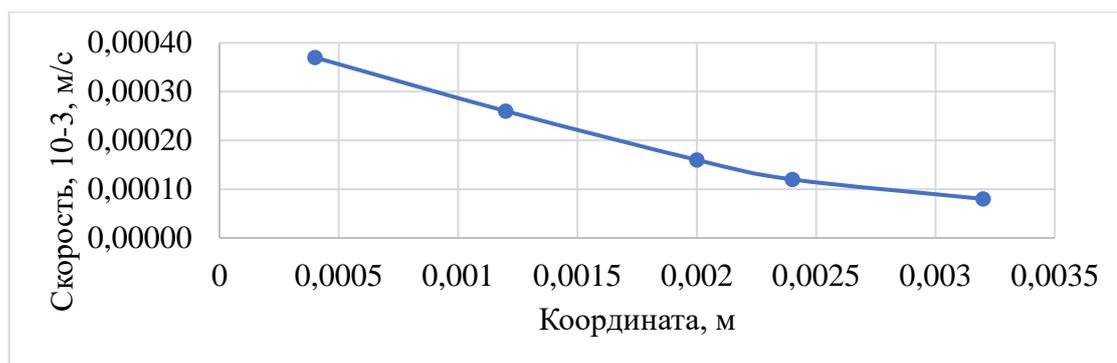


Рисунок 2.26 – Средняя скорость пропитки полиамидного образца ТЖВП по координате x

Исходя из полученного результата, можно сказать, что скорость пропитки непостоянна. В этом случае мы имеем дело с переменным числом Рейнольдса, зависящим от скорости $u_{Тх}$ и определяемым по следующей формуле (2.13), что необходимо учитывать при математическом моделировании.

Данный факт снижения скорости пропитки был обнаружен впервые и требует дальнейшего исследования.

Результат определения неизвестных параметров математической модели пропитки полиамидного образца ТЖВП соответствующей стандартной рабочей жидкостью: скорость пропитки, изменение температуры по толщине условного полиамидного образца (УПО) и коэффициент проницаемости, представлен в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Экспериментально определенные параметры

Толщина, $h_{\text{усл}}$, м	Динамическая вязкость, μ , Па·с	Время, τ , с	Температура, $\Delta T_{\text{усл}}$, °С	Скорость, $u_{Тх, \text{усл}}$, м/с	Коэффициент, $k_{Тх, \text{усл}}$, $\text{м}^2 \cdot \text{Па} / ^\circ\text{С}$
0	$31 \cdot 10^{-3}$	0	22,30	–	–
0,0004		1,08	45,60	$3,7 \cdot 10^{-4}$	$1,97 \cdot 10^{-10}$
0,0012		4,6	47,05	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$3,92 \cdot 10^{-10}$
0,0020		12,5	49,85	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$3,60 \cdot 10^{-10}$
0,0024		20	50,65	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$3,15 \cdot 10^{-10}$
0,0032		40	53,60	$0,8 \cdot 10^{-4}$	$2,53 \cdot 10^{-10}$

Примечание: Материал образца ПА6 с размерами 4x50x50 мм. Состав наполнителя: гексана –20% и моторного масла М8–В – 80%. Температура наполнения 50 °С.

В производственных условиях вместо стандартной рабочей жидкости возможно использовать рабочие жидкости с различной вязкостью, созданные на основе различных масел. В связи с этим следующая глава была направлена на проведение исследования, позволяющего определить режимы и условия, обеспечивающие повышение эксплуатационных характеристик изделий из полиамидных материалов, обработанных по технологии маслonaполнения.

2.5 Доказательство работоспособности температурно-динамического способа контроля глубины пропитки

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 в объеме 10%.

Для эксперимента изготавливались образцы из полиамида ПА6, размерами R35x30x4 мм (рисунок 2.27). Образцы пропитывались модифицированным ТЖПВ. После пропитки образцы разделялись ударно-режущим способом на части в направлении пропитки. Определение глубины пропитки проводилось методом оптической микроскопии с использованием микроскопа модели Olympus GX41F с увеличением 100 раз в поляризованном свете (рисунок 2.28). Результатом проведенного эксперимента стало определенная глубина пропитки в зависимости от времени маслonaполнения (рисунок 2.27). Фотофиксация и наблюдение производились с помощью оптической камеры Levenhuk C800 NG 8M.

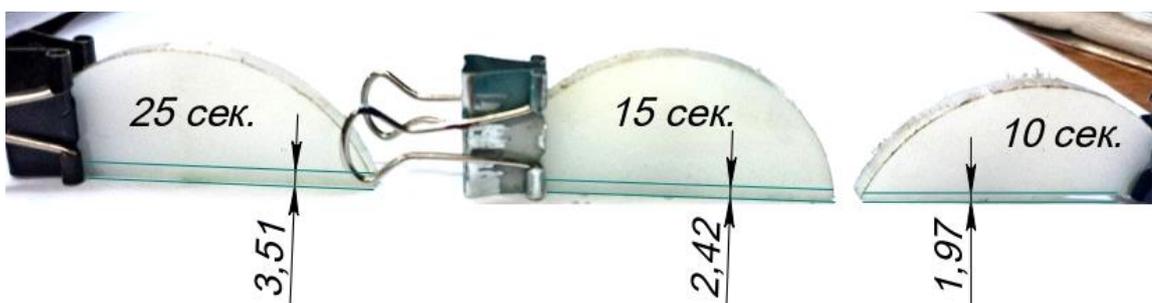


Рисунок 2.27 – Образцы размерами R35x30x4 мм из полиамида ПА6

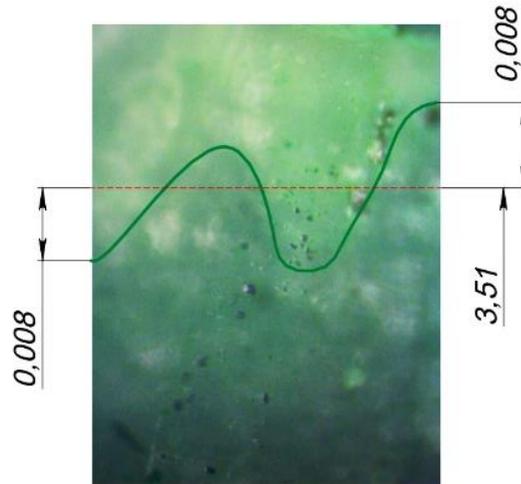


Рисунок 2.28 – Фотографии результата скола пропитанного образца в поляризованном свете (увеличение – 100х, светофильтр СК40М-АН)

Анализ результатов оптической микроскопии позволил выявить неравномерность распределения ТЖПВ по линии, характеризующей глубину пропитки. Такая неравномерность не превышает значения 0,016 мм (0,47%). Соотношение неравномерности и глубины пропитки позволяет пренебречь первой при построении технологического процесса (рисунок 2.28).

Отклонение расчетной глубины пропитки от экспериментально полученной не превышает 5,74%, что подтверждает адекватность разработанной в рамках диссертационного исследования математической модели.

Выводы по главе 2

1. Процесс анализа существующих технологических решений позволил предложить новый способ повышения износостойкости полиамидных деталей и на его основе разработать маршрутную технологию процесса маслonaполнения, включающую в себя основные операции:

– приготовление технологической жидкости с пониженной вязкостью, состоящей из моторного масла М8-В, наиболее широко используемого по параметрам вязкости, и гексана, повышающего способность смачивать и проникать в поверхностный слой детали;

– кондиционирование готовой полиамидной детали, ее сушку с целью восстановления эксплуатационных характеристик, снижающихся в процессе хранения, транспортировки и эксплуатации. Для этого используется высокоэффективная автоматизированная высокочастотная сушка;

– процесс маслonaполнения предварительно нагретой полиамидной детали в подготовленной технологической среде (в смеси масла и гексана необходимой концентрации);

2. В ходе работы было выявлено возможность математического описания процесса маслonaполнения изделий из полиамидных материалов, относящихся к гидрофильным, впитывающих до 10% жидкости (абсорбция полиамидов), в виде системы уравнений, основанной на использовании уравнения неразрывности и закона Дарси, позволяющей исследовать однонаправленные капиллярные явления, происходящие в образцах большой площади и малой высоты проникновения жидкости. Решение предложенной системы уравнений позволило установить закономерности изменения температурного градиента ΔT и коэффициента проницаемости k_T от глубины пропитки h_{ysl} для конкретных условий: температура полиамидной детали 50 °С, содержания гексана в технологической жидкости 20%.

3. Полученные научные результаты позволили сформировать методику определения неизвестных параметров математической модели и представить результаты их экспериментального определения, в том числе скорости пропитки и изменения температуры по направлению пропитки при маслonaполнении, которые позволили получить зависимости температурного градиента ΔT и коэффициента проницаемости k_T от глубины пропитки h_{ysl} для конкретных условий: температура полиамидной детали 50 °С, содержания гексана в технологической жидкости 20%.

4. Указанная методика основана на использовании температурно-динамического способа контроля температуры и скорости маслonaполнения, опирающийся на математические расчеты с использованием программных комплексов SOLIDWORKS Simulation и MSC Sinda, позволяющих определить расположение, размер и количество необходимых термодатчиков при погрешности измерения

0,57%. Работоспособность температурно–динамического способа контроля глубины пропитки доказана на основе сравнения результатов математического моделирования и эксперимента. Отклонение расчетной глубины пропитки от экспериментально полученной не превышает 5,74%.

3 ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССА МАСЛОНАПОЛНЕНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОЛИАМИДНЫХ ДЕТАЛЕЙ МАРКИ ПА6

Для экспериментального подтверждения повышения эксплуатационных характеристик изделий из полиамидных материалов, полученных с применением разработанной ранее технологии высокочастотного электротермического маслonaполнения, необходимо провести экспериментальные исследования полиамидных образцов на примере испытания эксплуатационных свойств, которые оказывают наиболее значимое влияние на ресурс работы полиамидных деталей в сложных условиях, а именно испытания на абразивный износ и на модуль упругости второго рода.

Так как принято решение проводить нагрев полиамидной детали, необходимо использовать подходящее оборудование с обеспечением контроля процесса ее нагрева [12, 13, 65].

Помимо испытания эксплуатационных характеристик маслonaполненных полиамидных деталей, необходимо определить один из основных параметров технологического процесса, оказывающий влияние на параметр производительности, а именно скорость пропитки.

Для проведения экспериментальных исследований скорости движения наполнителя в полиамидных образцах и подтверждения повышения эксплуатационных характеристик полиамидных деталей, обработанных по технологическому процессу маслonaполнения, необходимо разработать специализированное оборудование и оснастку для проведения технологического процесса маслonaполнения.

3.1 Разработка оборудования для технологического обеспечения процесса маслonaполнения полиамидных деталей

3.1.1 Модернизация промышленной установки УЗП-2500 для выполнения технологического процесса маслonaполнения полимерных деталей

С целью обеспечения технологического процесса маслonaполнения разработана автоматизированная система управления сушки и маслonaполнения полиамидных материалов на основе модернизации оборудования УЗП 2500 (рисунок 3.1) путем внедрения в него блока управления с разработанной управляющей программой, в которой за основной управляемый параметр взята величина анодного тока [124, 120], по которому производится управление температурой нагрева для сушки с последующим масляным наполнением. Само определение наполненного состояния выполняется по представленному ранее способу. По данному оборудованию совместно с другими авторами разработано пять программы для ЭВМ и разработан один патент [93, 94, 95, 96, 97, 110], приложение В.



Рисунок 3.1 – Промышленная установка УЗП 2500

Схема блока управления автоматизированной установки маслonaполнения представлена на рисунке 3.2.

Блок управления состоит из компонентов: Упр. плата – управляющая плата

С учетом уже разработанной и рассчитанной схемы расположения ТД в теле полиамидного образца для контроля температуры по всему объему (рисунок 2.7) составлена схема экспериментально–исследовательской установки для маслona-полнения и представлена на рисунках 3.3, 3.4.

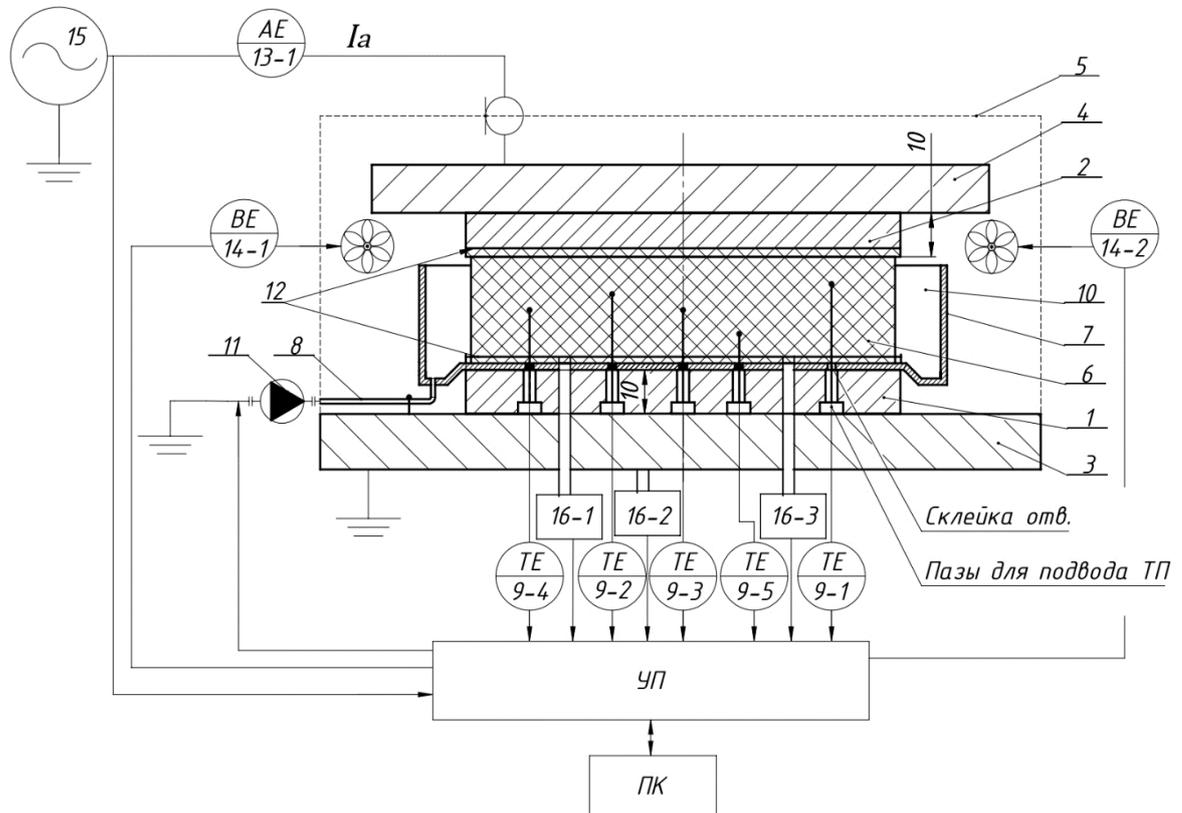


Рисунок 3.3 – Схема экспериментально–исследовательской установки для маслona-полнения (процесс сушки), где: 1 – заземленный электрод; 2 – высокопотенциальный электрод; 3 – низкопотенциальная опорная плита; 4 – высокопотенциальная плита; 5 – защитный экран; 6 – обрабатываемое изделие; 7 – ванна; 8 – трубка для подвода и отвода наполнителя (масла); 9 – термопары: 9-1...9-5 – для контроля температуры по всему объему и уровня заполнения маслом образца; 9-6 – контроль поддержания температуры масла; 10 – масло; 11 – насос; 12 – картонный изолятор; 13 – амперметр; 14 – вентилятор; 15 – генератор ВЧ; 16-1...16-3 – подъемники электромагнитные

Методика управления по данной схеме состоит из двух этапов.

Этапы процесса сушки исследуемого объекта:

- сбор компонентов установки (образца (6), ванны (7), термодатчиков (9-1...9-5)) с последующей герметизацией отверстий в ванне под термодатчики (9-1...9-5))

1...9-5);

– размещение этих компонентов на заземленном электроде (ванне) (1);

– подключение всех электрокомпонентов к управляющей плате (УП) (9, 11, 12, 14);

– запуск установки (15) и выдерживание величины анодного тока в заданных пределах (13) с целью достижения температуры сушки (температура сушки $T_{суш}$ около 170 °С) по всему объему образца (график зависимости анодного тока от температуры был представлен выше);

– включение вентиляторов (14) для обдувки от остаточной влаги на поверхности образца.

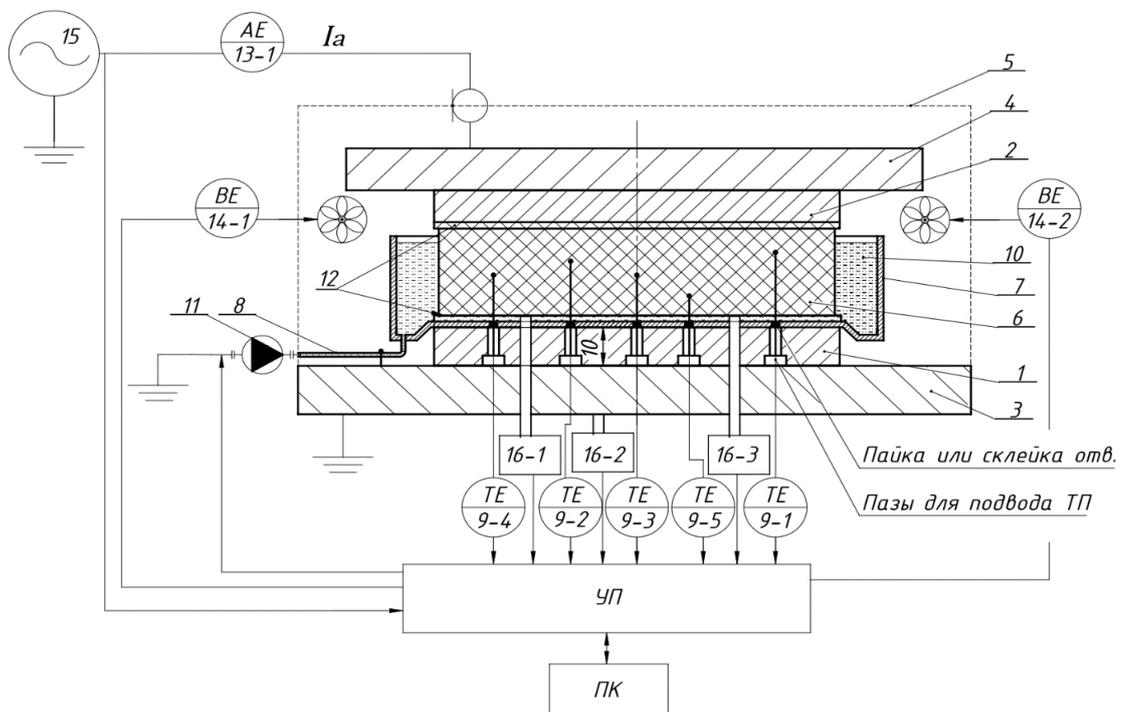


Рисунок 3.4 – Схема экспериментально-исследовательской

установки для маслонаполнения (процесс наполнения), где 1 – заземленный электрод; 2 – высокопотенциальный электрод; 3 – низкопотенциальная опорная плита; 4 – высокопотенциальная плита; 5 – защитный экран; 6 – обрабатываемое изделие; 7 – ванна; 8 – трубка для подвода и отвода наполнителя (масла);

9 – термопары: 9-1...9-5 – для контроля температуры по всему объему и уровня заполнения маслом образца; 9-6 – контроль поддержания температуры масла; 10 – масло; 11 – насос; 12 – картонный изолятор; 13 – амперметр; 14 – вентилятор;

15 – генератор ВЧ16-1...16-3 – толкатели электромагнитные [27]

Этап наполнения (пропитки):

- охлаждение образца (6) ниже $75\text{ }^{\circ}\text{C}$, поддержание температуры не выше этого значения температуры полиамидного образца при наполнении ($T_{\text{нап}}$);
- отключение вентиляторов;
- подъем ПО толкателями (16) на высоту 4 мм;
- включение насоса (11), подача масляного наполнителя;
- контроль за изменением температуры (процессов теплообмена масла и образца и пропитки его самим маслом) на ТД с целью выявления наполненного состояния образца (9-1...9-5) за счет изменения динамики температуры объекта в точках, к которым поступил масляный наполнитель;
- отключение установки (15), ожидание полного остывания образца (6).

Управляющая программа для данной установки представлена в приложении В.

Компоненты этой установки применимы как для автоматизированного исследования процесса маслonaполнения полиамидных образцов, так и для автоматизации технологического процесса маслonaполнения готовых полиамидных деталей.

При проведении предварительно проверочных экспериментальных исследований была выявлена проблема наведения больших помех, возникающих от переменного электрического поля высокой частоты, переходящих через термодатчики на управляющую плату (Arduino) и вызывающее ее выход из строя. Исходя из этого, были приняты решения применить для передачи данных показаний температуры от датчиков через транзисторную оптопару РС817, указанную на схеме 4.20. Также в целях дополнительного способа решения выявленной проблемы и модернизации исследовательской установки возникла задача по определению интервала величины анодного тока, при котором достигается состояние полностью высушенного образца с размерами 4x50x50 мм. Для этого экспериментально определено значение интервала анодного тока, при котором достигается полная сушка и не происходит прогар образца, стала 0,25...0,35 А [27]. Определенный интервал значения анодного тока соответствует приблизительно температуре $170\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.1.2 Описание алгоритмов исследования процесса маслonaполнения и его практической реализации с использованием исследовательской установки

Описание алгоритма процесса исследования маслonaполнения ПД. Управляющая программа представлена в приложении Г, блок-схема алгоритма представлена на рисунке 1, приложение Д (рисунок 1).

Перед запуском экспериментальной установки необходимо провести подготовку в виде выполнения некоторых действий:

- изготовить образец размерами 4x50x50 мм с заранее просверленными отверстиями в нем по схеме на рисунке 4.2, необходимыми для термодатчиков;
- изготовить изоляторы из картона размерами 0,5x55x55 мм;
- расположить образец на ванне–электроде с установкой сверху и снизу изоляторов;
- установить собранную ванну с образцом на низкопотенциальной плите ВЧ-установки УЗП2500;
- закрыть колпак и включить электромагнит для его фиксации;
- подключить блок управления к компьютеру;
- запустить программное обеспечение PowerGraph;
- рукоятку регулировки мощности повернуть до упора влево;
- подать питание на ВЧ-генератор.

Установка запущена, начался отчет времени работы ВЧ-генератора. При помощи датчика тока ACS712 считывается величина анодного тока и сравнивается с заданным интервалом значений (0,2...0,35 А). Если значение анодного тока превышает заданный предел, то шаговый двигатель уменьшает или увеличивает мощность за счет изменения угла поворота рукоятки. По установленному датчику угла поворота WH148 считывается угол поворота рукоятки регулировки мощности ВЧ-генератора. По полученным значениям анодного тока I_a и угла поворота φ рассчитывается мощность высокочастотного генератора по формуле (3.1) [55, 56]

$$P = U \cdot I_a, \quad (3.1)$$

где U – напряжение, В, по формуле (3.2)

$$U = -0,04 \cdot \varphi^5 + 2,21 \cdot \varphi^4 - 41,03 \cdot \varphi^3 + 407,55 \cdot \varphi^2 - 1907,4 \cdot \varphi + 4000. \quad (3.2)$$

По полученным значениям тока I_a и мощности P строятся графические данные в реальном времени в программном обеспечении PowerGraph.

В связи с тем, что датчики температуры NTC 3950 находятся в поле высокой частоты во время работы ВЧ-генератора, на них воздействуют значительные помехи, что не является целесообразным измерением температуры исследуемого объекта. Для решения этой задачи было принято решение периодически отключать ВЧ-генератор. Время работы ВЧ-генератора длится в течение 5 секунд, после происходит отключение его за счет твердотельного реле. После отключения срабатывает счетчик на 700 миллисекунд [18], необходимый для того, чтобы высокочастотное поле успело рассеяться и не оказывать никакого воздействия на показания температуры по термодатчикам. После в течение 300 миллисекунд происходит замер температуры полиамидного образца и вывод графических данных в программное обеспечение PowerGraph. По окончании этих временных интервалов снова включается ВЧ-генератор.

После достижения средней температуры между датчиками 170 °С отключается ВЧ-генератор. Включаются вентиляторы обдува при подаче сигнала на механическое реле. Вентиляторы используются для избавления поверхностной влаги на образце. Далее по первому датчику контролируется температура остывания образца до 75 °С (для масляного наполнителя с содержанием гексана 40%), так как масляный наполнитель поступает снизу вверх для исследования важна температура, близкая к нижней поверхности исследуемого объекта. По достижению данной температуры отключаются вентиляторы и по силиконовой трубке ванны-электрода подается масляный наполнитель.

После продолжается замер температур по пятью термодатчиками и по ним же в реальном времени рассчитывается производная температуры по времени, $dT1/dt \dots dT5/dt$.

По полученным значениям производных $X1 \dots X5$ высчитывается средняя ве-

личина из 50-ти замеров. После итоговые данные $X1_{cp} \dots X5_{cp}$ при помощи операции сравнения средних значений определяем точку минимум на графике производной температуры по времени, что соответствует достижению наполнителя соответствующей точки. Для случая, если у какой-либо производной температуры по времени не было определено точки экстремума минимум (туда не поступил наполнитель), установлен счетчик на 60 секунд, так как по проведенному множеству экспериментов больше этого времени полное наполнение ПО размерами 4x50x50 мм не происходило [27].

С целью реализации технологического процесса маслonaполнения полиамидных деталей разработан алгоритм процесса, который выполняется на одном и том же разработанном оборудовании и с теми же средствами автоматизации (приложение Д, рисунок 2). С учетом проведения некоторой модернизации, касаемо добавления в исследовательскую установку шагового двигателя и емкости с запорным клапаном для масляного наполнителя, механизм движения поршня в емкости для подачи наполнителя.

В блок-схеме представлена следующая последовательность действий. Схема автоматизированной установки имеет тот же вид (рисунки 3.3, 3.4) только с применением одного термодатчика 9.6, установленного заподлицо с верхней плоскостью ванны-электрода.

Оператором запускается блок управления техпроцессом и подключается к компьютеру. Устанавливается полиамидное изделие, которое необходимо наполнить маслом в загрузочное место установки. После в управляющую программу задаются параметры:

- h – необходимая глубина проникновения наполнителя, мм;
- U – объем изделия, необходимый для расчета объема подачи масляного наполнителя в ванну по формуле (3.3)

$$U_{\text{масла}} = 1,2 \cdot (20 + U); \quad (3.3)$$

– материал, для определения управляющей программы из базы данных скорости V , пропитки, для каждого материала своя скорость пропитки, определенная

по проведению исследований на автоматизированной установке процессов маслonaполнения (рисунок 3.3) или же по разработанной математической модели. Значение 20 чтобы скрыть дно.

Далее производится запуск установки: закрывается колпак, включается магнит, подается питание на ВЧ–генератор 15.

Управляющая программа производит расчет среднего значения из 50–ти замеров анодного тока I_a и сравнивает его с предыдущим значением для определения точки экстремума максимум, что соответствует достижению сушки полиамидного образца.

После достижения сухого состояния исследуемого объекта отключается ВЧ–установка 15. Рассчитывается объем масла с учетом объема ванны и глубины пропитки.

Для охлаждения и обдува остаточной поверхности на изделие включаются вентиляторы 14.

После осуществляется термодатчиком 9.6 контроль температуры исследуемого объекта до температуры маслonaполнения 75 °С (для содержания гексана в масляном наполнителе 40%).

Как только была достигнута температура наполнения, отключаются вентиляторы и при помощи шагового двигателя, используемого для перемещения поршня в емкости с масляным наполнителем, подается рассчитанный объем масла. Шаги мотора откалиброваны для подачи необходимого на наполнение масляного наполнителя. Для того чтоб не происходило испарения гексана из масла в емкости с масляным наполнителем, установлен запорный клапан.

После подачи наполнителя начинается отчет времени до того момента, пока он не пропитается на заданную глубину. Расчет времени пропитки $\tau_{проп.}$ определяется по формуле (3.4)

$$\tau_{проп.} = \frac{h_{проп.}}{u_{Т, усл.}}, \quad (3.4)$$

где $h_{проп.}$, $u_{Т, проп.}$ – глубина, мм, и скорость пропитки, мм/с, соответственно.

По достижении времени пропитки изделие поднимается над масляным

наполнителем.

3.1.3 Блок управления и технологическая оснастка исследовательской установки для определения скорости пропитки технологической жидкостью полимерных образцов

Выполнена практическая реализация экспериментально–исследовательской установки на основе промышленного оборудования УЗП-2500 путем внедрения в нее блока управления экспериментально–исследовательской установки (рисунок 3.5).

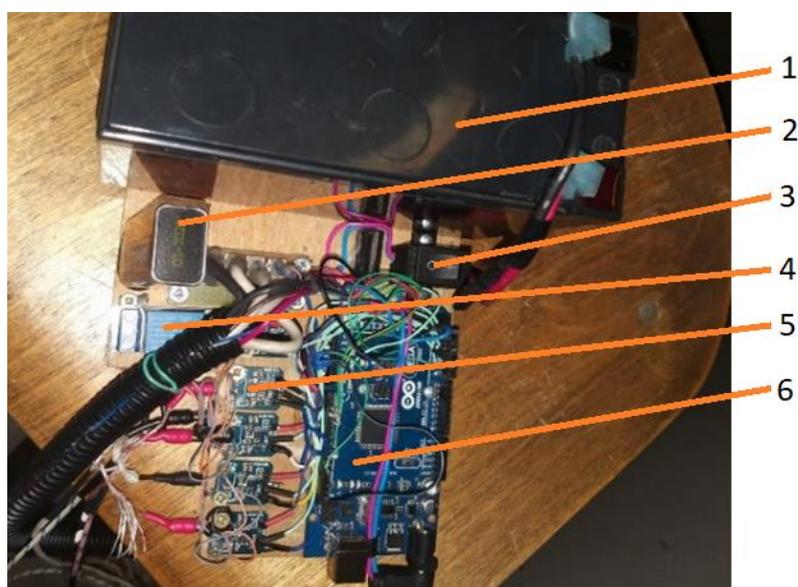


Рисунок 3.5 – Блок управления экспериментально–исследовательской установки для электротермического маслonaполнения полиамидных материалов, где:
1 – аккумулятор, 12 вольт; 2 – батарея, 9 вольт; 3 – тумблер подачи питания, 12 вольт; 4 – механическое двухканальное реле; 5 – плата для подключения термисторов (резисторы, оптопара); 6 – управляющая плата (Arduino)

Блок управления установки для электротермического маслonaполнения полиамидных материалов состоит из основных компонентов: управляющая плата Arduino Mega; механическое реле; аккумулятор 12 вольт; батарея 9 вольт; плата разъемов; тумблер.

По произведенным экспериментальным исследованиям возникла проблема прогара образца в местах, где присутствовала наибольшая глубина отверстия в теле

объекта [27]. Исходя из этого, было принято решение добавить автоматическое регулирование мощности ВЧ-генератора за счет установки шагового двигателя с ременным редуктором. Данный механизм был совмещен с рукоятью регулировки мощности. Автоматическое устройство регулировки мощности ВЧ-генератора представлено на рисунке 3.6.



Рисунок 3.6 – Автоматическое устройство регулировки мощности ВЧ, где:

- 1 – драйвер с переходной платой; 2 – рукоятка; 3 – шкивы; 4 – ремень;
5 – потенциометр; 6 – шаговый двигатель

Разработана технологическая оснастка, ванна-электрод со встроенными термодатчиками представлена на рисунке 3.7.



Рисунок 3.7 – Ванна-электрод со встроенными термодатчиками с рабочей областью 100x100 мм, где: 1 – ванна 100x100 мм; 2 – картонный изолятор; 3 – термистор; 4 – медная трубка для подачи наполнителя; 5 – плата термисторов

После разработанного автоматизированного оборудования необходимо выполнить задачу экспериментального подтверждения повышения эксплуатационных характеристик полиамидных деталей и повышения производительности технологического процесса маслonaполнения.

3.2 Проведение экспериментального подтверждения повышения эксплуатационных характеристик полиамидных деталей и производительности технологического процесса

Для проведения ряда экспериментов, направленных на оценивание скорости пропитки при различных пропорциях гексана и масла при различных температурах полиамидного образца, а также эксплуатационной характеристики, необходимо выполнение пяти повторений опыта ($n=5$) при одинаковых режимах и условиях для обеспечения стабильности полученных результатов согласно ГОСТ 24026 – 80. Для решения этой задачи составлена матрица планирования экспериментов, представленная в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Матрица планирования эксперимента

		Температура полиамидного образца, °С					
		35		50		75	
Содер. гексана, %	№ эксперимента, n	i=1		i=4		i=7	
		$(u_{п 35 20})_n$	$(u_{и 35 20})_n$	$(u_{п 50 20})_n$	$(u_{и 50 20})_n$	$(u_{п 75 20})_n$	$(u_{и 75 20})_n$
20	n=1...5	i=2		i=5		i=8	
40		$(u_{п 35 40})_n$	$(u_{и 35 40})_n$	$(u_{п 50 40})_n$	$(u_{и 50 40})_n$	$(u_{п 75 40})_n$	$(u_{и 75 40})_n$
60		i=3		i=6			
		$(u_{п 35 60})_n$	$(u_{и 35 60})_n$	$(u_{п 50 60})_n$	$(u_{и 50 60})_n$		

Параметры, указанные в таблице, являются скорость пропитки $(u_{п})_i$, мм/с и скорость абразивного износа $(u_{и})_i$, мм/мин.

Проводится усреднение после проведения пяти опытов ($n=5$), получаем i -ое значение параметра, согласно представленной таблице, значение i – находится в интервале от 1 до 8 усредненных значений скорости пропитки и скорости износа.

3.2.1 Экспериментальное определение скорости и времени пропитки полиамидного образца

3.2.1.1 Результаты эксперимента при пропитке смесью с содержанием гексана 20% для температуры нагрева 35 °С, 50 °С, 75 °С

В данном исследовании, касаясь экспериментального определения скорости пропитки, принято решение вносить в таблицу массу полиамидного образца после сушки и после наполнения, а также запись момента времени, при котором наполнитель достиг высоты расположения одного из термодатчиков по схеме на рисунке 4.2. Матрица натуральных экспериментов представлена в таблице 3.1.

Применив разработанную ранее матрицу планирования экспериментов на разработанном экспериментальном оборудовании, произведено исследование по скорости пропитки полиамида моторным маслом М8-В.

Для выполнения задачи по определению скорости пропитки для пропорции смеси масла и гексана 40%, 60% и 20% соответственно при различных температурах: 35 °С, 50 °С, 75 °С. При содержании гексана в масле 6% и температуре 75 °С – проведение эксперимента недопустимо, согласно граничным условиям.

После проведения промежуточных этапов экспериментального исследования выполнена обработка полученных данных, а именно определение скорости пропитки исходя из полученного времени достижения наполнителя термодатчика и глубины его расположения в теле полиамидного образца. Также определено процентное наполнение исследуемого образца масляным наполнителем. Все расчеты выполнены с применением усреднения из пяти повторений для 20% гексана и температур наполнения: 35 °С, 50 °С, 75 °С, представленных в таблице 3.2.

Скорость пропитки рассчитывается по формуле (3.5)

$$V = \frac{h_{\text{усл.}}}{\tau}, \quad (3.5)$$

где: $h_{\text{усл.}}$ – толщина пропитанного условного полиамидного образца, мм; τ – момент времени достижения наполнителя термодатчика.

Таблица 3.2 – Обработка экспериментальных данных для 20% гексана и температур: 35 °С, 50 °С, 75 °С

№	Толщина, $h_{\text{усл}}$, мм	Температура 35 °С		Температура 50 °С		Температура 75 °С	
		Время, τ , с	Скорость, мм/с	Время, τ , с	Скорость, мм/с	Время, τ , с	Скорость, мм/с
1	0,4	2,11	0,19	1,08	0,37	1,60	0,25
2	1,2	8,57	0,14	4,62	0,26	7,06	0,17
3	2	20,00	0,10	12,50	0,16	18,18	0,11
4	2,4	30,00	0,08	20,00	0,12	26,67	0,09
5	3,2	45,71	0,07	40,00	0,08	40,00	0,08
Наполнение		0,074%		0,113%		0,114%	

3.2.1.2 Результаты эксперимента при пропитке смесью с содержанием гексана 40 % для температуры нагрева 35 °С, 50 °С, 75 °С.

Следующим этапом исследования стало определение скорости пропитки для 40 % гексана. Результат эксперимента представлен в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Обработка экспериментальных данных для 40% гексана и температур: 35 °С, 50 °С, 75 °С

№	Толщина, $h_{\text{усл}}$, мм	Температура 35 °С		Температура 50 °С		Температура 75 °С	
		Время, τ , с	Скорость, мм/с	Время, τ , с	Скорость, мм/с	Время, с	Время, τ , с
1	0,4	0,77	0,52	1,38	0,29	0,95	0,42
2	1,2	2,93	0,41	5,71	0,21	3,75	0,32
3	2	7,41	0,27	16,67	0,12	9,09	0,22
4	2,4	12,00	0,20	24,00	0,10	13,33	0,18
5	3,2	21,33	0,15	40,00	0,08	22,86	0,14
Наполнение		0,179%		0,163%		0,182%	

3.2.1.3 Результаты эксперимента при пропитке смесью с содержанием гексана 60% для температуры нагрева 35 °С, 50 °С.

Проведены экспериментальные исследования по определению скорости пропитки без выполнения нагрева до 75 °С, так как при нагреве выше 52 °С происходит испарение гексана из масла. Поэтому было принято решение проводить исследования с температурами 35 °С и 50 °С. Итог обработанных данных представлен в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Обработка экспериментальных данных для 60% гексана и температур: 35 °С, 50 °С

№	Толщина, $h_{\text{усл}}$, мм	Температура 35 °С		Температура 50 °С	
		Время, τ , с	Скорость, мм/с	Время, τ , с	Скорость, мм/с
1	0,4	0,43	0,94	0,41	0,97
2	1,2	1,64	0,73	1,58	0,76
3	2	4,44	0,45	4,26	0,47
4	2,4	7,06	0,34	6,49	0,37
5	3,2	12,80	0,25	11,43	0,28
Наполнение		0,079%		0,096%	

3.2.1.4 Результаты экспериментов по определению скорости пропитки при различных температурах и от содержания гексана

В рамках настоящего исследования составлено графическое представление зависимости скорости пропитки от содержания гексана и температуры нагрева образца. График представлен на рисунке 3.8.

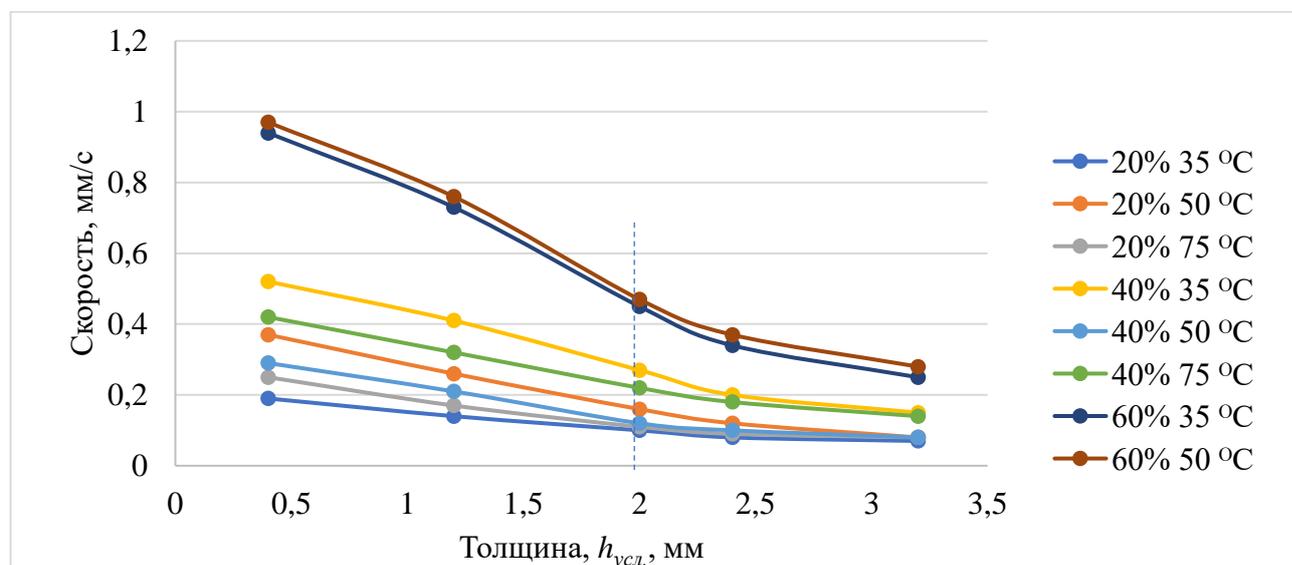


Рисунок 3.8 – Графические данные зависимости скорости пропитки от температуры полиамидного образца и содержания гексана в смеси

Из полученных данных видно, что по мере погружения наполнителя скорость проникновения снижается. Наибольшая скорость пропитки является при 60% гексана в смеси при температуре образца 35 °С, 50 °С, это можно объяснить тем, что вязкость смеси является самой низкой, что способствует прохождению жидкости с

меньшим сопротивлением через поры. Высокая температура полиамидного образца не оказывает значительного воздействия на скорость прохождения через поры полимера, как и на саму вязкость смеси.

Проведенные исследования доказывают практическую применимость разработанного способа определения наполненного состояния полиамидного образца.

Дальнейшим действием в цели обоснования повышения качества необходимо произвести исследованием влияние условий и режимов технологического процесса на эксплуатационные характеристики полиамидных деталей.

3.2.2 Экспериментальное определение абразивной износостойкости полиамидной детали

В рамках настоящего исследования проведены экспериментальные исследования абразивного износа. Порядок проведения эксперимента был разработан на основе «ГОСТ 11012 – 2017 – «Метод испытания на абразивный износ». В качестве оборудования была использована исследовательская установка, разработанная в Иркутском государственном университете путей сообщения на кафедре «Вагоны и вагонное хозяйство», использующая схему истирания плоскость–диск при высоких скоростях износа, обеспечиваемая вращением диска с частотой 610 об/мин. Установка состоит из исследуемого наполненного образца 1, эталонного сухого образца 2 размерами 4xØ50 мм, вращающегося диска 3, опорной плиты 4 для установки грузов 5, развивающих усилие 10,08 Н каждый. Для каждого абразивного испытания наполненного образца использовался эталонный образец. Эталонный сухой образец необходим для каждого исследуемого наполненного образца, чтобы создать идентичные условия проведения эксперимента из-за отсутствия непрерывного контроля износа. Контроль износа производился через каждые 7 минут с применением расчета его через массу образцов, замеренных на аналитических весах, по формуле 3.6. Для увеличения скорости износа использовалась шкурка 6 марки SK19XW по ГОСТ 344 – 79. Все испытания проводились до того момента, пока наполненный полиамидный образец не уменьшится по толщине на 2 мм, после проводились испытания следующего образца и эталона с ним. Схема исследовательской установки

представлена на рисунке 3.9.

Величина износа вычисляется по формуле 3.6:

$$h = \frac{m_{i-1} - m_1}{\rho \cdot a \cdot b}, \quad (3.6)$$

где: m_{i-1} m_1 – масса образца на предшествующем и текущим промежутке эксперимента соответственно, г; ρ – плотность ПА6, 1,14 г/мм³; a , b – размеры образца, 50 мм.

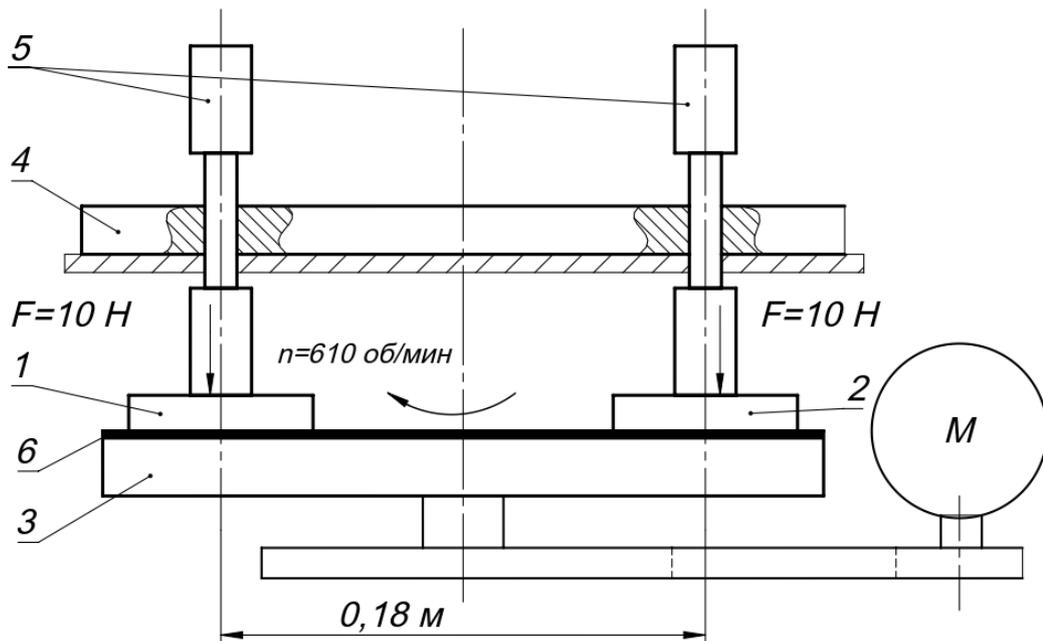


Рисунок 3.9 – Схема исследовательской установки, где: 1 – эталонный образец (ненаполненный); 2 – испытуемый образец (наполненный); 3 – диск; 4 – плита подвижная; 5 – груз; 6 – шкурка ГОСТ 344 – 79

После исследования абразивного износа полиамидных образцов проведена обработка полученных результатов, сведенных в один график для наглядного представления (рисунок 3.10).

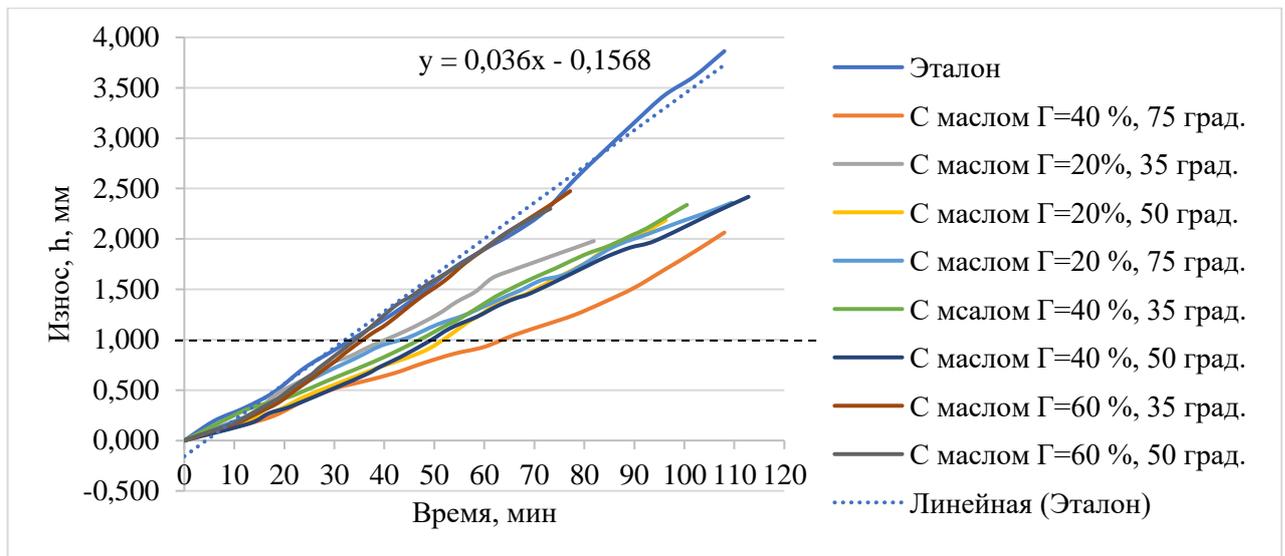


Рисунок 3.10 – Зависимость абразивного износа от условий и режимов технологического процесса маслonaполнения

Из графических данных зависимости абразивного износа от условий и режимов обработки электротермического маслonaполнения можно сделать вывод о том, что наилучший результат получен при 40% гексана и температуре наполнения 75 °С. Самый неблагоприятный результат будет при обработке: 60% гексана и температурах 35 °С и 50 °С, результаты близки с ненаполненным (эталонным) образцом, это можно пояснить тем, что при таком содержании гексана количество впитанного масла в тело полимера является низкоэффективным для повышения ресурса работы полиамидного изделия в узле трения. Помимо всего прочего, также сказывается низкая температура нагрева при маслonaполнении, что очень незначительно снижает вязкость масляного наполнителя, а это препятствует большему проникновению его в тело полимера. Остальные рассматриваемые условия и режимы обработки дают близкие к друг другу результаты по величине абразивного износа.

Для доказательства достижения поставленной цели настоящего диссертационного исследования по повышению эксплуатационных характеристик полиамидных деталей рассчитана скорость абразивного износа на глубину 1 мм полиамидной детали, пропитанной смесью с различным содержанием гексана. При этом выбирая время для температуры, в которой скорость износа наименьшая, согласно

данным на рисунке 3.11. Результаты расчета представлены в таблице 3.3 и на рисунке 3.11.

Таблица 3.3 – Скорость абразивного износа полиамидной детали на глубину 1 мм

Гексан, %	$u_{и}$, мм/мин	t, мин	Температура ПО, °С
0	0,033	30	–
20	0,024	41	50
40	0,016	64	75
60	0,029	35	35

По полученным данным построен график зависимости абразивного износа по ГОСТ 8550 – 81 от процентного содержания гексана смеси.

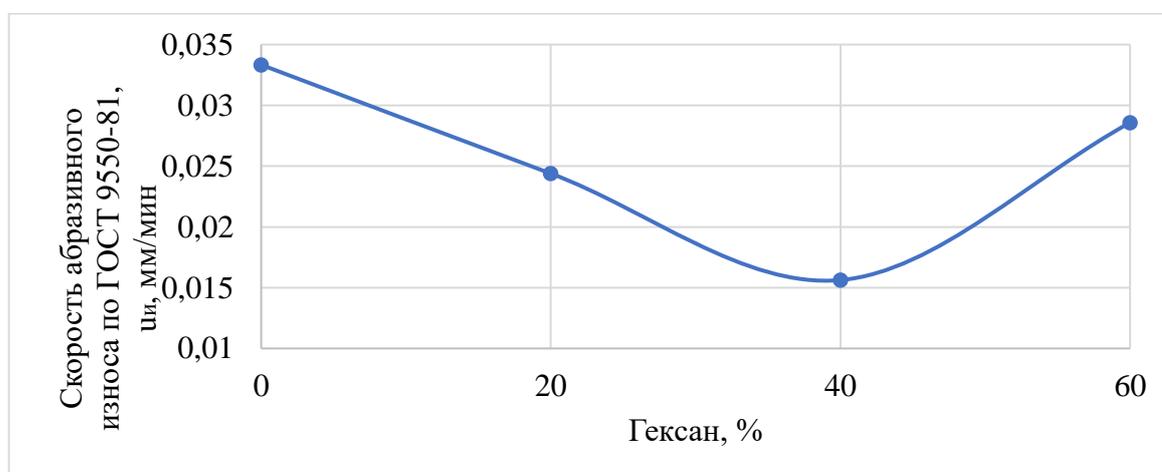


Рисунок 3.11 – Скорость абразивного износа по ГОСТ 11012 – 2017 от содержания гексана в масляном наполнителе

Согласно проведенному анализу, наибольшее снижение износа позволило получить при 40% гексана, а при 60% наблюдается значение абразивного износа, близкое к значению к исходному состоянию полиамидной детали. Максимально допустимое уменьшение абразивного износа по отношению к исходному составило 54,48%.

3.2.3 Экспериментальное определение модуля упругости второго рода полиамидной детали

В целях обоснования актуальности настоящего исследования возникла необходимость провести испытания на нагрузочную способность полиамидных образцов. В целях оптимизации проведения экспериментальных исследований было принято решение использовать те температуры полиамидного образца для наполнения, при которых получены минимальные значения скорости износа (температурные режимы для максимального положительного эффекта) для каждого процентного содержания гексана, согласно таблице 3.4.

Определение модуля упругости второго рода полиамидных образцов различного состояния по ГОСТ 9550 – 81. Модуль упругости первого рода определяется по приложению поочередно двух значений нагрузок F_1 и F_2 , не превышающих разрушающую силу при изгибе 20% по ГОСТ 9550 – 81. Измерение прогибов происходит с помощью индикатора часового типа ИЧ-10.

Расчет прилагаемых нагрузок выполняется по формулам (3.7), (3.8)

$$F_1 = (0,05 - 0,1) \cdot F_p, \quad (3.7)$$

$$F_2 = 0,2 \cdot F_p. \quad (3.8)$$

Процесс определения модуля упругости при изгибе выполнялся по схеме на рисунке 4.29 и на реализованном испытательном стенде (рисунок 3.13). Эксперимент проводится в следующем порядке: образец 1 устанавливают в устройство с нагружающим наконечником 2 и опорами 3, которое реализует трехточечную схему нагружения (рисунок 3.12).

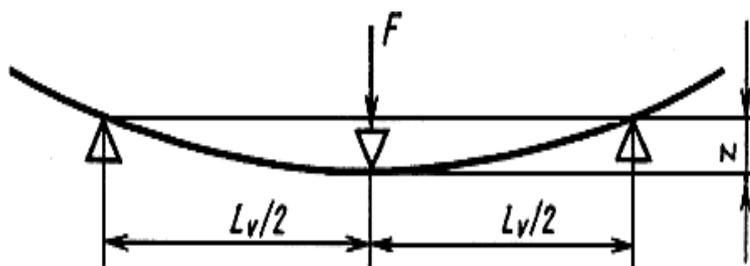


Рисунок 3.12 – Эскиз расчетной схемы, где: F , L_v , z – Параметры расчета

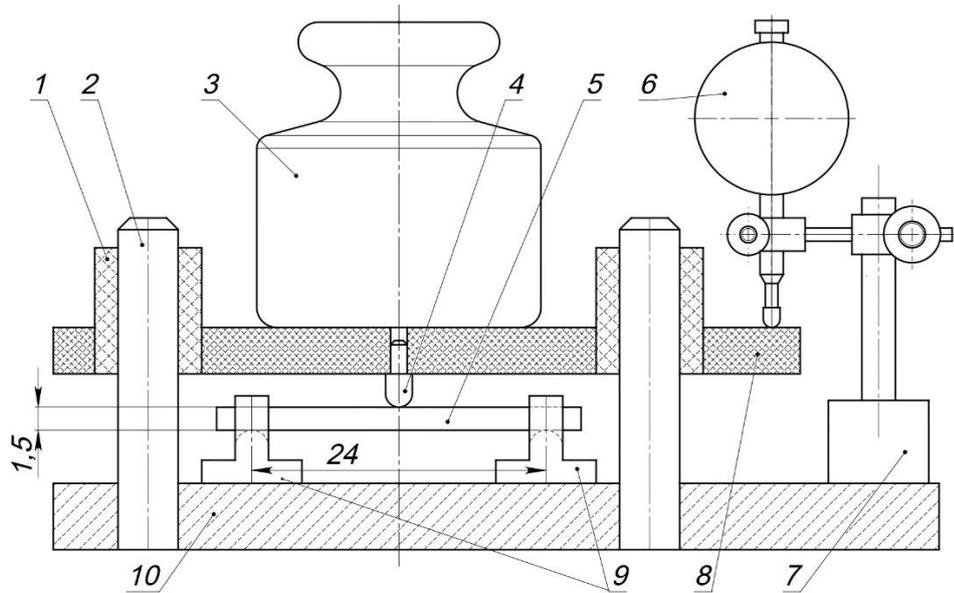


Рисунок 3.13 – Схема испытательного стенда для определения модуля упругости,

где: 1 – втулка; 2 – колонка; 3 – грузы на 2,25 Н и 9 Н; 4 – толкатель;
5 – испытуемый образец ПА6 размерами 1,5x4x50 мм; 6 – индикатор часового
типа ИЧ-10; 7 – штатив; 8 – плита подвижная; 9 – опоры; 10 – основание

Расстояние между опорами рассчитывается по формуле (3.9)

$$L_v = 16 \cdot h \pm 5, \quad (3.9)$$

где h – толщина испытуемого образца, 1,5 мм.

$$L_v = 16 \cdot 1,5 = 24 \pm 5 \text{ мм.}$$

Максимальная разрушающая нагрузка определяется по формуле (3.10) по ГОСТ 9550 – 81

$$F_p = \frac{2 \cdot \sigma_{и} \cdot b \cdot h^2}{3 \cdot L_v}, \quad (3.10)$$

где: $\sigma_{и}$ – изгибающее напряжение, 180 Мпа при толщине 1,5 мм по ОСТ 6 - 06 - С9 – 93; L_v – расстояние между опорами, мм; b – ширина и образца соответственно, 4 мм; h – толщина образца, 1,5 мм.

$$F_p = \frac{2 \cdot 180 \cdot 10^6 \cdot 0,004 \cdot 0,0015^2}{3 \cdot 24} = 45 \text{ Н.}$$

Расчет модуля упругости производится по формуле (3.11)

$$E_u = \frac{(F_2 - F_1) \cdot L_v^3}{3 \cdot b \cdot h^3 \cdot (f_2 - f_1)}, \quad (3.11)$$

где: f_1, f_2 – прогибы, F_1 и F_2 , мм; F_1, F_2 – соответствующие нагрузкам, Н.

За результат измерения прочности и модуля упругости принимают среднее арифметическое значение для всех образцов.

Результаты испытаний занесены в таблицу 3.4 и рисунок 3.14.

Таблица 3.4 – Результаты расчета модуля упругости (модуль Юнга) по ГОСТ 9550–81

Наполнитель	Температура ПО, °С	Нагрузка		Прогиб		E_u , ГПа
		F_1 , Н	F_2 , Н	f_1 , мм	f_2 , мм	
0%	–	2,25	9	0,75	2,9	1,48
20% гексана	50			0,4	2,2	1,28
40% гексана	75			0,73	2,25	1,15
60% гексана	35			0,74	2,3	1,21

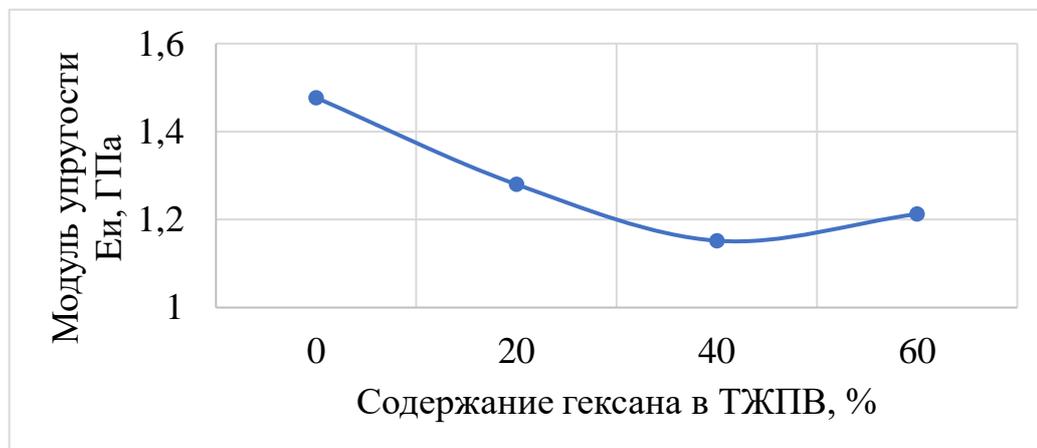


Рисунок 3.14 – Зависимость модуля упругости первого рода по ГОСТ 9550 – 81 от состояния образца

Из полученных результатов видим аналогичный итог, что у ненаполненного образца максимальный модуль упругости, а при содержании 40% гексана минимальный. При содержании 60% часть гексана испарилась, при этом туда поступило меньшее количество масла по сравнению с тем, как при 40% гексана в наполнителе.

Соответственно, можно сделать вывод о том, что при 40% содержания гексана поступает больше моторного масла, чем при 60% содержания гексана. Из этого видно, что результаты экспериментов схожи с результатами зависимости твердости от содержания влаги [72]. При увеличении содержания влаги или наполнителя уменьшается модуль упругости полиамида, а вследствие уменьшается его твердость. Максимальное уменьшение модуля упругости составило 23,2%.

При работе полиамидных деталей в узлах трения понижение модуля упругости и будет являться преимуществом при приработке ее трущейся поверхности. При этом необходимо учесть, что изменение модуля упругости будет оказывать влияние только на поверхностный слой полиамидной детали, на величину большего допустимого износа, что не изменяет твердость всего ее тела.

Согласно цели диссертационной работы повышение износостойкости ПД, работающей в тяжелых условиях, установлен параметр, который напрямую влияет на износостойкость, а именно скорость абразивного износа. Поэтому по результатам проведенной работы стало необходимым составление алгоритма технологического обеспечения износостойкости полиамидных деталей, для этого необходимо рассчитать кинематическую вязкость ТЖПВ, для которой достигнуто наибольшее снижение скорости износа ПД (40 процента гексана, 60% масла М8-В) при температуре ПД, равной 75 °С, согласно гл. 3, п. 3.2 диссертации. Также необходимо определить зависимости градиента температуры и коэффициента проницаемости от глубины пропитки при маслonaполнении.

Данное технологическое обеспечение должно учитывать использование других масел в ТЖПВ, которые отличаются от характеристик масла М8-В.

3.3 Разработка технологического алгоритма обеспечения повышения износостойкости полиамидной детали при маслonaполнении

3.3.1 Определение кинематической вязкости технологической жидкости

Для определения вязкости ТЖПВ, соответствующей выявленным режимам и условиям технологической операции, которые позволяют максимально снизить

скорость абразивного износа, необходимо определить вязкость для заданной температуры T , определяемой через формулу [71] (3.12)

$$v_T = v_{T_0} e^{-u_{vis}(T-T_0)}, \quad (3.12)$$

где: v_{T_0} – кинематическая вязкость, $\text{мм}^2/\text{с}$, для данной температуры, T_0 , $^{\circ}\text{C}$; u – показатель крутизны вискограммы, $1/^{\circ}\text{C}$, определяется по формуле (3.13)

$$u_{vis} = \frac{1}{T_2 - T_1} \ln \frac{v_{T_1}}{v_{T_2}}, \quad (3.13)$$

где v_{T_1} , v_{T_2} – кинематическая вязкость при температурах T_1 и T_2 , соответственно.

Исходными данными для определения вязкости ТЖПВ будут являться: гексан 40%, масло М8–В 60%, температура пропитки 75°C .

Первым этапом необходимо определить кинематическую вязкость при температуре 75°C для 100% содержания гексана. Для этого найдены данные кинематической вязкости гексана при разных температурах: 0,683 и 0,401 $\text{мм}^2/\text{с}$ при температурах $-17,8$ и $37,8^{\circ}\text{C}$ соответственно [32, 48]. Определим показатель крутизны

$$u_{vis} = \frac{1}{37,8 - (-17,8)} \ln \frac{0,683}{0,401} = 0,0096 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}.$$

Определяем кинематическую вязкость гексана для температуры 75°C , при известной температуре $37,8^{\circ}\text{C}$

$$v_t = 0,401 \cdot e^{-0,00096 \cdot (75 - 37,8)} = 0,281 \text{ } \text{мм}^2 / \text{с}.$$

Следующим этапом определим кинематическую вязкость масла М8–В для температуры 75°C при известных: 1200 и 8 $\text{мм}^2/\text{с}$ при температурах 0 и 100°C соответственно по ГОСТ 10541–2020. Показатель крутизны равен

$$u_{vis} = \frac{1}{100 - 0} \ln \frac{1200}{8} = 0,05 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}.$$

Кинематическую вязкость М8–В для температуры 75°C при известной температуре 100°C .

$$v_t = 8 \cdot e^{-0,05 \cdot (75 - 100)} = 27,997 \text{ } \text{мм}^2 / \text{с}.$$

Исходя из полученных данных кинематической вязкости для температуры пропитки 75°C и 100% содержания масла и гексана, определим вязкость смеси для 40% содержания гексана в масле по номограмме Молина-Гурвича [32, 48], представленной на рисунке 3.15. С учетом того, что компонент А соответствует маслу

М8-В, а компонент Б соответствует гексану.

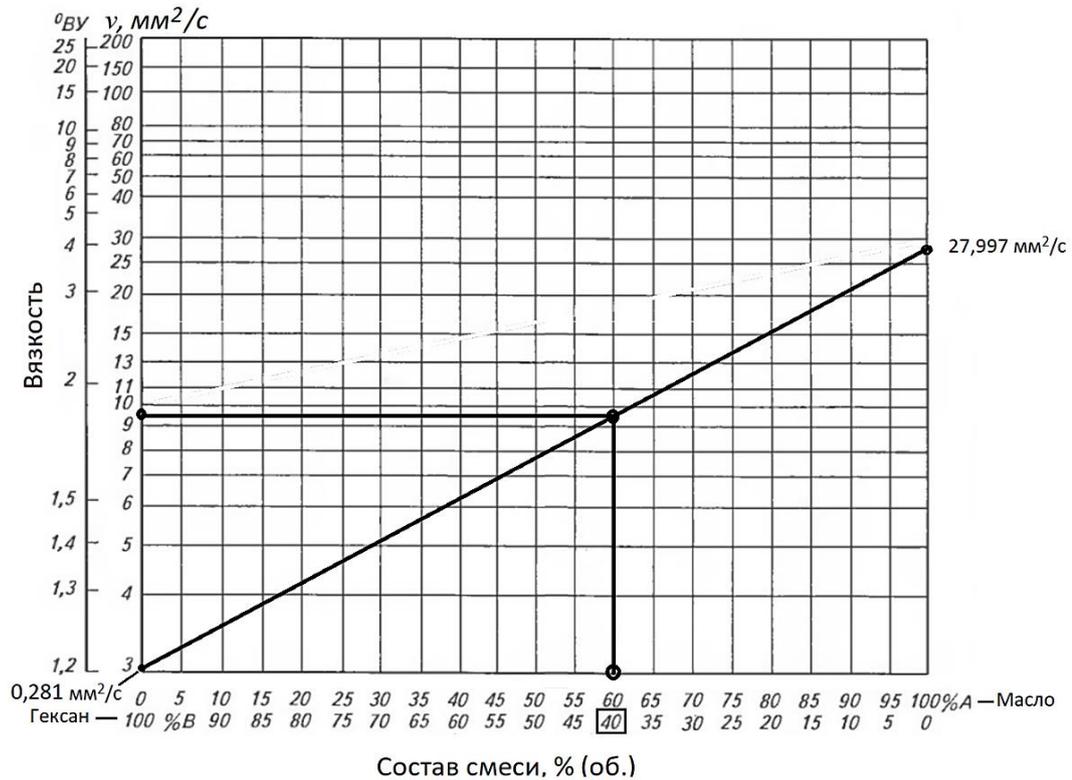


Рисунок 3.15 – Номограмма Молина–Гурвича для определения вязкости смеси нефтепродуктов

Из полученного результата построения линий на диаграмме видно, что кинематическая вязкость ТЖПВ, позволяющая максимально снизить скорость абразивного износа ПД, является при содержании гексана 40% и температуре полиамидного образца 75 °С, соответствует 9,4 мм²/с.

Необходимо отметить, что при использовании масел других марок необходимо определить вязкость гексана и масла для определенной температуры пропитки по представленной ранее методике расчета.

Также необходимо учесть, что кинематическая вязкость ТЖПВ с другими маслами должна соответствовать кинематической вязкости в соответствии с рекомендациями проведения технологического процесса маслonaполнения для конкретно выявленного процентного содержания гексана в масле М8-В (гл. 3, п. 3 диссертации). Определение содержания гексана для ТЖПВ с другими маслами для достижения заданной кинематической вязкости необходимо производить по ранее представленной методике.

Необходимо учесть, при повышении содержания гексана в ТЖПВ больше 60%, температура наполнения не должна превышать 52 °С, если больше 40% не должна превышать 78 °С. В случае превышения данного ограничения необходимо снизить температуру пропитки и выполнить пересчет кинематической вязкости ТЖПВ.

Область применения для данной кинематической вязкости 9,4 мм²/с для температуры 75 °С для данных условий и параметров масла М8-В, но для других масел будут другие значения температуры и вязкости, позволяющие достигнуть максимального снижения скорости абразивного износа. Для этого случая необходимо произвести аналогичные экспериментальные исследования.

3.3.2 Определение коэффициента проницаемости и градиента температуры для содержания гексана в технологической жидкости 40% при температуре полиамидной детали 75 °С

Для определения времени пропитки представлены значения коэффициента проницаемости для оптимальных режимов и условия выполнения технологического процесса маслonaполнения, полученные по методике, представленной в гл. 2, п. 4.

Для определения коэффициента проницаемости с использованием разработанной математической модели в гл. 2, п. 2, определена оптимальная динамическая вязкость (3.14) [119]

$$\mu_T = \rho_T \cdot \nu_T = 9,4 \cdot 10^{-6} \cdot 847,9 = 7,97 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}, \quad (3.14)$$

где: ν_T – оптимальная кинематическая вязкость, 9,4·10⁻⁶ м²/с; ρ_T – плотность ТЖПВ с содержанием гексана 40% при температуре 75 °С, определенная экспериментально, 847,9 кг/м³.

На основании ранее представленной математической модели пропитки получены результаты, представленные в таблице 3.5, которые необходимы для определения режимов и условий технологического процесса маслonaполнения полиамидной детали.

Таблица 3.5 – Экспериментально определение коэффициента проницаемости k_T и градиента температуры при условии 60% и режиме 75 °С

Толщина, $h_{\text{усл}}$, м	Время, τ , с	Скорость, $u_{Tх,усл.}$, м/с	Температура, $\Delta T_{\text{усл}}$, °С	Динамическая вязкость, μ , Па·с	Коэффициент, $k_{Tх,усл.}$, $\text{м}^2 \cdot \text{Па} / \text{°С}$
0	0	–	22,3	$7,97 \cdot 10^{-3}$	–
0,0004	0,95	$4,2 \cdot 10^{-4}$	68,1		$2,93 \cdot 10^{-11}$
0,0012	3,8	$3,2 \cdot 10^{-4}$	69,5		$6,41 \cdot 10^{-11}$
0,0020	9,09	$2,2 \cdot 10^{-4}$	72,4		$7,0 \cdot 10^{-11}$
0,0024	13,3	$1,8 \cdot 10^{-4}$	73,2		$6,78 \cdot 10^{-11}$
0,0032	22,86	$1,4 \cdot 10^{-5}$	76,1		$6,64 \cdot 10^{-11}$
Примечание: Материал образца ПА6 с размерами 4x50x50 мм. Состав наполнителя: гексана – 40% и моторного масла М8–В – 60%. Температура наполнения 75 °С.					

Экспериментальные данные, представленные в таблице 3.5, аппроксимируются следующими зависимостями (3.15), (3.16):

$$\Delta T = 2902,4 \cdot h_{\text{проп}} + 44,21 \quad (3.15)$$

(достоверность аппроксимации $R^2=0,9998$);

$$k_T = 6,287 \cdot 10^{-3} h_{\text{проп}}^3 - 4,531 \cdot 10^{-5} h_{\text{проп}}^2 + 1,029 \cdot 10^{-7} h_{\text{проп}} - 5 \cdot 10^{-12} \quad (3.16)$$

(достоверность аппроксимации $R^2=0,9993$);

Полученные параметры при оптимальной вязкости необходимы для определения скорости и времени пропитки для наполнения на заданную глубину готовой полиамидной детали при выполнении технологического процесса маслonaполнения.

3.3.3 Разработка операции контроля

В связи с тем, что в диссертационном исследовании поставлена задача достижения максимальной износостойкости полиамидной детали, принято решение выполнять разрушающую контрольную операцию путем определения абразивного износа ПД или образцов-свидетелей [112].

Общие сведения об операции контроля ПД после маслonaполнения с использованием образцов–свидетелей:

1. Определение параметра износостойкости полиамидных деталей проводят на образцах–свидетелях, изготовленных из этих деталей, их размеры и геометрическая форма должны соответствовать ГОСТ 11012 – 2017.

2. Образцы–свидетели подвергаются обработке совместно с ПД в технологических операциях: 015, 025, 030 (рисунок 2.4).

3. Перед приемкой полиамидная деталь не должна иметь на поверхности остатки ТЖПВ, для ее устранения необходимо обтереть сухой ветошью.

4. Приемку производят на основании установленного значения объемного абразивного износа для данных полиамидных деталей.

5. При проведении выборочного контроля определяется масса образца-свидетеля после притирки и после испытания с помощью аналитических весов (с точностью до 0,0001 г), далее по формуле определяют объемный износ на метр истирания.

6. При неудовлетворительном качестве износостойкости поверхностного слоя рекомендуется проводить повторное исследование на образцах-свидетелях, изготовленных из деталей, относящихся к той же партии.

7. Правила отбора и количество отбираемых деталей для повторного контроля определяется технологической документацией предприятия-изготовителя.

8. При положительном результате контроля на деталях вся проверяемая партия считается годной.

9. При неудовлетворительных результатах маслonaполнения детали совместно с образцами-свидетелями подвергаются повторной обработке, режим которой в каждом конкретном случае устанавливает технолог ремонтного предприятия.

10. Количество повторно проведенных режимов маслonaполнения полиамидной детали должно быть не более двух.

11. Вся проверяемая партия считается годной при положительном результате контроля на деталях.

Для составления требований, предъявляемым к образцам-свидетелям, использован отраслевой стандарт СТО ИНТИ S.70.2-2022, которые представлены ниже:

1. Для серийной продукции в качестве образца-свидетеля рекомендуется применять забракованную деталь или ее часть. Поверхности, подвергаемые маслonaполнению, не обрабатывать механически.

2. Образцы-свидетели должны изготавливаться из деталей, взятых из одной партии.

3. Шероховатость поверхности образца-свидетеля должна соответствовать шероховатости поверхности контролируемых деталей.

3. Форма и размеры образца-свидетеля должны соответствовать ГОСТу 11012 – 2017: прямоугольная призма со стороной $(50,0 + 0,4)$ мм, высотой 10...20 мм; цилиндр диаметром $(50,0 + 0,4)$ мм, высотой 10...20 мм. Геометрическую форму выбирают в зависимости от геометрической формы обрабатываемой детали.

4. Параметром абразивного износа образца-свидетеля является объемный износ образца на один метр пути истирания (показатель износа, $\text{мм}^3/\text{м}$) согласно ГОСТ 11012 – 2017. Отклонение от допустимого значения износа (полученного в гл. 3 п. 2) не должно превышать 10%.

5. Нагрузка, прикладываемая к образцам свидетелям при испытании, должна соответствовать 10,08 Н с отклонением $\pm 3\%$.

6. Перед маслonaполнением образцы-свидетели должны быть промаркированы.

7. Количество образцов-свидетелей – не менее 2 из партии на проводимый процесс наполнения деталей.

В рамках диссертационного исследования разработана карта контроля абразивного износа (ГОСТ 11012 – 2017) образца-свидетеля, представленная в приложении Е.

Согласно разработанной контрольной операции технологического процесса маслonaполнения, в которой контрольным параметром является объемный износ образца-свидетеля на один метр длины истирания, проводимого согласно ГОСТ

11012 – 2017, выполнить пересчет полученного значения скорости абразивного износа (0,016 мм/мин) для образца размерами 4xØ50 мм в размерность согласно ГОСТ (мм³/м). Для этого необходимо определить объемный износ полиамидного образца за одну минуту по формуле (3.17)

$$v_V = v_{50 \times 50} \cdot S_{50 \times 50} = 0,016 \cdot 1963,5 = 31,42 \text{ мм}^3 / \text{мин}, \quad (3.17)$$

где: $v_{\text{Ø}50}$ – скорость износа для образца размерами Ø50 мм, 0,016 мм/мин; $S_{\text{Ø}50}$ – площадь изнашиваемой поверхности образца Ø50 мм, 1963,5 мм².

Следующим этапом определена скорость перемещения полиамидного образца по вращающемуся диску по формуле (3.18)

$$v_L = D \cdot n \cdot \pi, \quad (3.18)$$

где: D – диаметр вращения (см. рисунок 3.6), 0,18 м; n – частота вращения диска об/мин.

$$v_L = 0,18 \cdot 610 \cdot 3,14 = 344,8 \text{ м/мин.}$$

Из полученных данных стало возможным определение показателя истирания образца–свидетеля на один метр пути абразивного износа, соответствующего оптимальному режиму и условию маслonaполнения (3.19)

$$V = \frac{v_V}{v_L} = \frac{31,42}{344,8} = 0,091 \text{ мм}^3 / \text{м}. \quad (3.19)$$

Зависимость пути трения L , м от глубины пропитки h , см, соответствующего оптимальному режиму и условию маслonaполнения, по формуле 3.20)

$$L = \frac{S \cdot h \cdot 1000}{V}, \quad (3.20)$$

где S – площадь поверхности трения образца–свидетеля, см².

Вычисленный путь трения L , м используется для организации контроля по ГОСТ 11012 – 2017. Полученный результат контролируемого показателя истирания V_k [38], вычисленный по формуле (3.21), должен иметь значение, не превышающее V более чем на 10%.

$$V_k = \frac{G - G_1}{\rho L} 1000, \quad (3.21)$$

где: G – масса образца для испытания до истирания, г; G_1 – масса образца для испытания после истирания, г; ρ – плотность образца, г/см³.

В рамках диссертационного исследования разработана карта контрольной операции, представленная в приложении [Е].

3.3.4 Технологический алгоритм обеспечения процесса маслonaполнения детали и полиамида марки ПА6

Рациональное обеспечение качества полиамидных деталей, работающих в тяжелых условиях, возможно только на основе системного подхода, поэтому была разработана система технологического обеспечения повышения износостойкости ПД, технологический алгоритм которой представлен на рисунке 3.16.

В представленном алгоритме в блоке исходных данных операции «Приготовление» указаны значения: $h_{изн}$ – предельная глубина износа, мм; ν_{11} при T_1 , ν_{12} при T_2 вязкости, мм²/с, при соответствующих температурах из справочных данных для выбранного моторного масла; оптимальная кинематическая вязкость ТЖПВ с маслом М8–В, $\nu_T=9,4$ мм²/с при оптимальной вязкости гексана $\nu_T=0,281$ мм²/с при соответствующей оптимальной температуре 75 °С. В данной операции выполняется определение кинематической вязкости выбранного масла при оптимальной температуре 75 °С. После по диаграмме Молина–Гурвича выполнение определения содержания гексана в ТВЖП с выбранным маслом с учетом достижения вязкости смеси равной оптимальной, 9,4 мм²/с. Следующим этапом определяется глубина пропитки, $h_{проп}$, и глубина погружения, $h_{погр}$, ПД, равными произведению предельной глубины износа на коэффициент запаса, K_3 , находящийся в пределах 1,2...1,4.

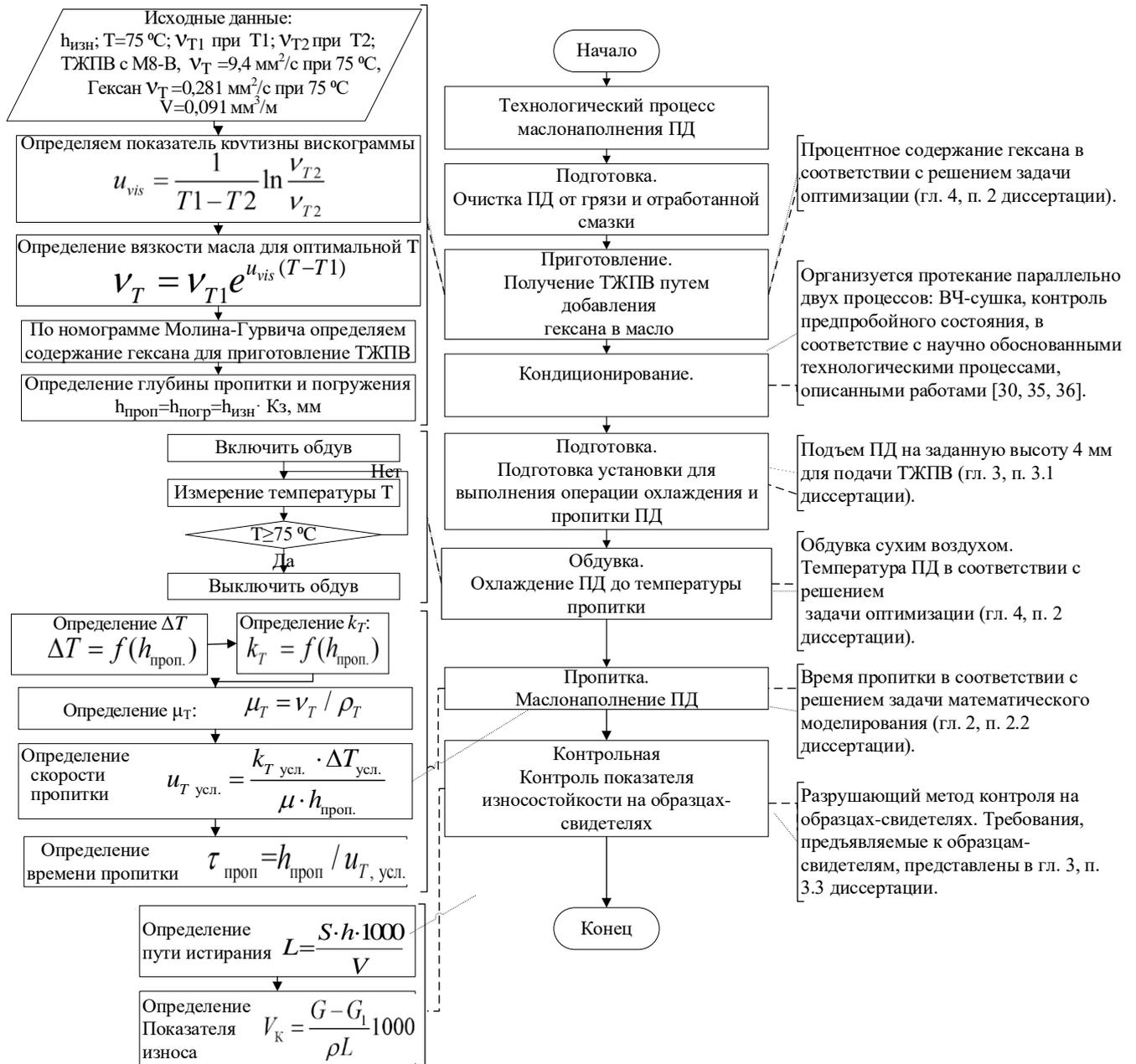


Рисунок 3.16 – Технологический алгоритм обеспечения повышения износостойкости ПД при маслonaполнении

В операции «Пропитка» вводятся исходные данные: глубина пропитки, $h_{проп}$; μ – динамическая вязкость, определенная через кинематическую вязкость, определенную в операции «Приготовление»; K_T – коэффициент проницаемости, определенный по методике, представленной в гл. 2, п. 4; ΔT – разность температуры на входе и на толщине пропитки полиамидной детали, $^{\circ}\text{C}$. Далее выполняется определение скорости пропитки по математической модели, представленной в гл. 3. Последним этапом

определяется по уравнению, представленному в блок схеме операции «Пропитка», необходимое время для проникновения ТЖПВ на заданную глубину пропитки.

Выводы по главе 3

1. Реализацию разработанного технологического процесса целесообразно производить с использованием разработанного технологического автоматизированного оборудования и оснастки для сушки и маслonaполнения полиамидной детали включающей в свой состав модернизированную установку УЗП 2500, оснастку в виде ванны-электрода и блока управления автоматизированной установки с необходимым программным обеспечением, реализующим процесс кондиционирования и наполнения полиамидной детали.

2. Использование разработанного оборудования, позволяло провести серию экспериментов, подтверждающих повышение показателя износостойкости полиамидных деталей (ГОСТ 11012 - 2017), в том числе:

– определена скорость пропитки при различных содержаниях гексана в технологической жидкости и температуре полиамидной детали (ПА6);

– определена скорость абразивного износа маслonaполненных полиамидных деталей с использованием машины испытания. Испытания проводились на образцах, обработанных при тех же условиях и режимах маслonaполнения, что и для экспериментов по определению скорости пропитки. В качестве эталона использовался ненаполненный кондиционированный образец.

– выявлено снижение модуля упругости второго рода (ГОСТ 9550 – 81) на 23,2%, возможное уменьшение скорости абразивного износа при подобранных режимах маслonaполнения на 54,48%.

3. Научные результаты, представленные в данной главе, позволили сформировать технологический алгоритм обеспечения повышения износостойкости полиамидной детали для осуществления маслonaполнения для различных масел, входящих в состав технологической жидкости, позволяющий определять оптимальные режимы и условия обработки, с целью обеспечения повышения износостойкости детали из ПА6 за минимальное основное время обработки.

Таким образом, на основании приведенных результатов теоретических и экспериментальных исследований можно говорить о разработанном новом технологическом процессе маслonaполнения полиамидных деталей, позволяющем увеличить их износостойкость.

4 ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МАСЛОНАПОЛНЕНИЯ И ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1 Постановка задачи оптимизации

Для решения задачи оптимизации нужно сформировать целевую функцию, необходимую для определения степени достижения поставленной цели по повышению износостойкости полиамидных деталей, обработанных по разработанному технологическому процессу маслonaполнения. Также целевая функция необходима для понимания, какие параметры технологического процесса будут обеспечиваться и как они будут оцениваться. Целевая функция необходима для количественного выражения критериев оптимальности [10, 43, 44]. Определение оптимальных критериев обеспечивает достижение поставленной цели настоящего исследования, а именно: подбор условий и режимов технологического процесса, которые дадут наилучший результат по проникновению наполнителя за кратчайшее время на заданную глубину ПД не менее чем на допустимую величину износа, что обеспечит максимальную ее износостойкость.

Параметрами технологического процесса маслonaполнения являются: производительность, стабильность, качество [39, 40, 70, 100]. Для представления параметра технологического процесса необходимо определить критерий, по которому он будет оцениваться. Критерий оценивания параметра должен быть численно выражен и иметь конкретный физический смысл, если он положительно сказывается на результате процесса, то достижение его максимального значения, если же он оказывает отрицательное влияние, то достижение его минимального значения:

- производительность – критерий оценивания максимальной скорости пропитки на заданную глубину;
- стабильность – критерий оценивания минимального отклонения результатов повышения какой-либо эксплуатационной характеристики полиамидной детали или скорости пропитки при одинаковых режимах и условиях проведения процесса маслonaполнения;

– качество – достижение максимального или минимального значения износостойкости полиамидной детали, определяющих надежность и долговечность машин.

Помимо критериев оценивания параметров технологического процесса необходимо указать, за счет чего они обеспечиваются.

Параметры, производительность и качество обеспечиваются путем:

– сохранности в течение всего процесса вязкости наполнителя за счет не превышения температуры полиамидного образца, не позволяющей выход гексана из масла согласно ранее определенным рекомендованным граничным условиям;

– подбором оптимальных условий и режимов, пропорций смеси и температуры полиамидной детали, определяется путем проведения ряда экспериментов.

Для параметров технологического процесса маслonaполнения, производительности и качества полиамидной детали необходимо формирование целевой функции, которую необходимо решить с применением экспериментальных исследований, направленных на поиск оптимальных значений температуры полиамидного образца и вязкости наполнителя. Помимо всего прочего, определение критерия оценивания параметра производительности – скорость пропитки – необходимо применение теоретических и практических основ физики фильтрации пористых тел и метода конечно-разностного расчета.

Для оценивания производительности, скорости пропитки и глубины проникновения возможно определение путем проведения неразрушающего способа контроля (например, контроль по изменению температуры полиамидного образца в процессе пропитки) или же разрушающий метод контроля (например, добавление в наполнитель красителя и после проведения процесса наполнения разрез полиамидного образца в поперечном сечении по направлению пропитки. Для оценивания параметра качества необходим непосредственный контроль износостойкости путем проведения испытания на абразивный износ образцов-свидетелей.

Параметр стабильности не нуждается в составлении целевой функции, так как он зависит от условий проведения техпроцесса. Данный параметр обеспечивается кондиционированием (сушкой) полиамидной детали, а также обеспечением

начальных и граничных условий проведения процесса, определенных ранее. Кондиционирование проводится для насыщения влагой полиамида до равновесного состояния с целью достижения стабильности полученных результатов технологического процесса [120]. Параметр стабильности технологического процесса также обеспечивается проведением контрольной операции, представленной в гл. 2 п. 2.4.

По проведенной постановке задачи оптимизации было выяснено, что необходимо сформировать целевую функцию для двух параметров: производительности технологического процесса и качества обработанной полиамидной детали по данному процессу маслonaполнения. Данные параметры технологического процесса зависят от его условий и режимов: температура ПД и процентное содержание гексана в масляном наполнителе. Исходя из этого, необходимо произвести оптимизацию данных условий и режимов, для этого нужно составить целевую функцию для выявления наибольшего повышения износостойкости ПД и достижения наибольшей производительности технологического процесса маслonaполнения.

В связи с тем, что процесс оптимизации нужно произвести для двух параметров технологического процесса, необходимо формирование двух целевых функций для двух параметров [42, 80, 116].

Для оценивания степени достижения цели данного исследования наиболее важным параметром является качество ПД, наименее важным – производительность технологического процесса.

Касаемо качества полиамидной детали, согласно проведенному анализу в первой главе, в тяжелых условиях эксплуатации важной эксплуатационной характеристикой является износостойкость. Чем выше износостойкость, тем меньше скорость износа ПД, тем больше ресурс ее эксплуатации. С точки зрения решения задачи оптимизации необходимо рассмотреть скорость износа, а для практического применения технологического процесса важен факт снижения износостойкости. Исходя из этого, для критерия оценивания параметра качества необходимо использовать скорость абразивного износа по ГОСТ 11012 – 2017 – она должна стремиться к минимальному значению, целевая функция данного параметра будет выглядеть следующим образом (4.1)

$$u_{и}(T, \mu) \rightarrow \min, \quad (4.1)$$

где: $u_{и}$ – скорость износа, мм/мин; T – температура полиамидной детали, °C; μ – вязкость наполнителя, Па·с.

Целевая функция параметра производительности заключается в обеспечении заданной глубины пропитки масла в кратчайшие сроки, исходя из этого, необходимо, чтоб скорость пропитки была максимальна, данный критерий необходим для оценивания параметра производительности. Данный критерий также зависит от температуры полиамидной детали и вязкости наполнителя согласно пропорциям гексана и масла в смеси. Исходя из этого, целевая функция параметра производительности будет иметь следующий вид (4.2)

$$u_{и}(T, \mu) \rightarrow \max. \quad (4.2)$$

Исходя из поставленной цели диссертационного исследования, а именно повышения износостойкости ПД, целевая функция оптимизационной задачи имеет следующий вид (4.3)

$$F(u_{и}) = u_{и}(T, \mu) \rightarrow \min. \quad (4.3)$$

Далее необходимо установить пределы изменений условий режимов технологического процесса. Согласно разработанному технологическому процессу маслonaполнения возможными пределами изменения температуры полиамидной детали и вязкости наполнителя будут являться (4.4)

$$T_{норм.} < T < T_{исп.}; \mu_{гекс.} < \mu < \mu_{масла}, \quad (4.4)$$

где: T – температура полиамидной детали, соответствующая нормальным условиям и допустимой температуре до испарения гексана (режим), °C; μ – вязкость гексана и масла, Па·с (условие).

Согласно определенным ранее условиям, данные границы параметров целевой функции будут иметь вид (4.5):

$$35^{\circ} C < T < 75^{\circ} C; \mu_{гекс.20\%} < \mu < \mu_{гекс.60\%}, \quad (4.5)$$

Где $\mu_{гекс.20\%}$, $\mu_{гекс.60\%}$ – вязкость наполнителя при содержании гексана в нем при 20% и 60% соответственно.

4.2 Решение оптимизационной задачи

Решение оптимизационной задачи осуществлялось графическим методом, в котором используется визуализация функции для определения её минимума [39, 82, 130]. В данном случае функция двух переменных (температура ПД, вязкость наполнителя) представлена в виде трехмерного графика (рисунок 4.1).

По полученным результатам, представленным на рисунке 3.11, было принято решение разработать двумерную целевую функцию подбора оптимальных условий и режимов обработки. Данные рекомендации строятся на основе ранее полученных результатов с ограничением значения абразивного износа до 1 мм (пунктирная, линия рисунок 3.11) и времени достижения этого предела для образцов, обработанных при различных условиях и режимах. Результаты расчета скорости абразивного износа представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Зависимость скорости абразивного износа до 1 мм от температуры полиамидного образца и содержания гексана в наполнителе

Содержание гексана в наполнителе, %	Температура полиамидного образца, °С	Время износа до 1 мм, мин	Скорости абразивного износа до 1 мм, $v_{и}$, мм/мин
20	35	39,9	0,0251
20	50	52,0	0,0192
20	75	43,0	0,0233
40	35	47,0	0,0213
40	50	50,2	0,0199
40	75	63,0	0,0159
60	35	35,5	0,0282
60	50	34,0	0,0294

Трехмерное изображение зависимостей содержания гексана в масляном наполнителе и температуры при наполнении смесью от скорости абразивного износа полиамидного образца размерами 50x50 мм до 1 мм представлено на рисунке 4.1.

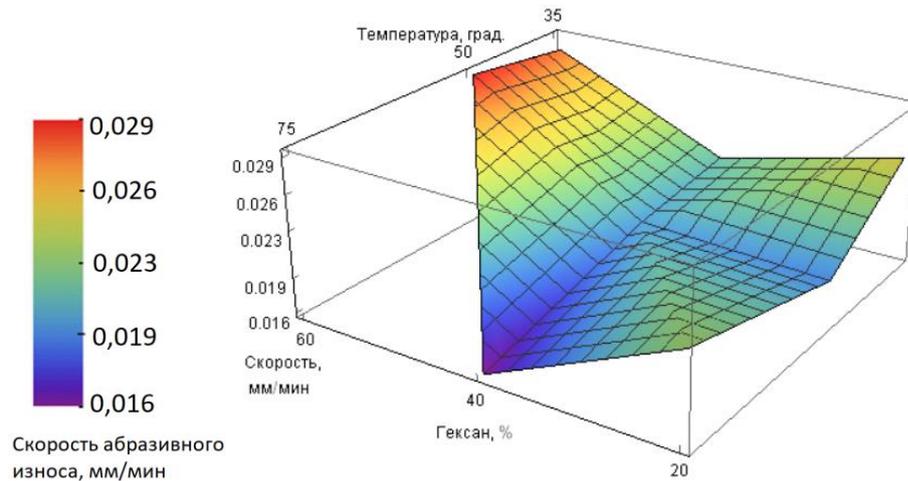


Рисунок 4.1 – Зависимость абразивного износа ПД от условий и режимов технологического процесса высокочастотного маслonaполнения полиамидных изделий при испытании по ГОСТ 11012 – 2017

Для решения задач оптимизации технологического процесса маслonaполнения с точки зрения уменьшения абразивного износа разработана двумерная целевая функция для достижения максимума или минимума эффективности повышения качества поверхностного слоя полиамидного изделия. Построенная поверхность определяется проектными параметрами: содержание гексана в масле и температура наполнения для определения значения скорости абразивного износа полиамидного образца до 1 мм размерами 4x50x50 мм.

Дальнейшим действием стало составление двумерной целевой функции подбора оптимальных параметров условий и режимов обработки для повышения производительности технологического процесса. По полученным ранее экспериментальным данным по определению скорости пропитки, представленных на рисунке (3.5), было принято решение взять для составления двумерной функции значения скорости пропитки до 2 мм согласно нормативной документации [98, 99], данная граница указана вертикальной пунктирной линией. Итоговые значения скорости пропитки до 2 мм в зависимости от условий и режимов технологического процесса маслonaполнения указаны в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результат определения скорости пропитки на глубину 2 мм полиамидного образца (ПО), мм/с

Содержание гексана в наполнителе, %	Температура ПО, °С		
	35	50	75
	Скорость пропитки, u_p , мм/с		
20	0,10	0,16	0,11
40	0,27	0,12	0,22
60	0,45	0,47	–

По определенным данным построена двумерная целевая функция для определения скорости пропитки полиамидного образца наполнителем, представленная на рисунке 4.2.

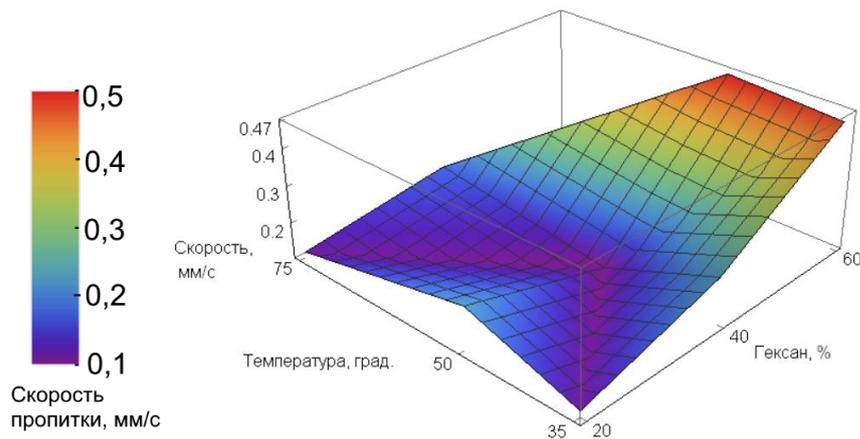


Рисунок 4.2 – Зависимость скорости пропитки ПД от условий и режимов технологического процесса маслonaполнения полиамидных изделий

Для решения задач оптимизации технологического процесса маслonaполнения с точки зрения увеличения скорости пропитки разработана двумерная целевая функция для достижения максимума или минимума эффективности повышения производительности технологического процесса маслonaполнения. Построенная поверхность определяется проектными параметрами: содержание гексана в масле и температура наполнения для определения скорости пропитки полиамидного образца масляным наполнителем до 2 мм размерами 4x50x50 мм.

Анализ по представленной на рисунке 4.1 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 $u_n(T_{пд}, \mu)$ для любой глубины пропитки $h_{проп}$, основываясь на экспериментальных данных, представленных на рисунке 6 (пример для $h_{проп}=2$ мм см. рисунок 4.2). Используя данную зависимость определяется скорость пропитки ($u_n=0,22$ мм/с) и основное время операции маслonaполнения ($t_o=h_{проп}/u_n=9,1$ с).

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

4.3 Практическое использование и внедрение результатов исследования

По итогу полученных данных по разработанной технологии маслonaполнения полиамидных деталей проведена ее апробация в компании ООО «АВИЛЕС» (приложение Ж). Проведенная работа позволила решить проблему высокого износа полиамидных втулок подшипников скольжения шарнирного соединения манипуляторов Palfinger Epsilon C70 L22, Palfinger Epsilon M100 L80, используемых для перевалочно–разделочных операций, производимых на нижних лесных складах при отгрузки готовой продукции на лесовозный автопоезд.

Для осуществления проведения процесса маслonaполнения компанией было закуплено промышленное оборудование УЗП-2500, после была проведена работа по ее модернизации согласно гл. 3, п. 1. Проведенная работа включала в себя: разработку дополнительной оснастке необходимо для размещения полиамидной втулки в рабочей области оборудования (ванна–электрод с термодатчиком и трубкой); установка электроники, необходимой для контроля и управления технологическим процессом маслonaполнения, согласно схеме, представленном на рисунке 3.4.

Благодаря внедренной технологии в компании ООО «АВИЛЕС» были решены следующие задачи:

– выполнено импортозамещение подшипников скольжения, необходимых для проведения ремонта и технического обслуживания погрузочных манипуляторов;

– выполнено снижение повышенного износа полиамидных втулок и нарушения кинематической точности узлов сопряжения, работающих в условиях высоких контактных давлений, динамических и вибрационных нагрузок, режимах частого пуска и остановки оборудования, загрязненности абразивом, недостаточной смазки.

Все вышеперечисленные мероприятия позволили увеличить межремонтный период дорогостоящего нижнескладского оборудования.

Годовой экономический эффект от внедрения технологии маслонаполнения полиамидных втулок составляет 321 539 руб.

Также полученные результаты исследования внедрены в теоретические материалы учебной программы обучения студентов федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ИрГУПС) на кафедре Автоматизация производственных процессов (приложение Ж).

Результаты диссертационного исследования включены в курсы дисциплин: «Технология производства изделий из композиционных материалов» специальности 15.03.05 Конструкторско–технологическое обеспечение машиностроительных производств (бакалавриат) и «Технология обработки полимеров» специальности 23.05.03 Подвижной состав железных дорог (уровень специалитета).

Внедрения полученных результатов исследования доказывают практическую и теоретическую значимость диссертационной работы в области технологий обработки полиамидных материалов.

Выводы по главе 4

1. Анализ использования результатов математического моделирования процесса маслонаполнения полиамидных деталей и экспериментальных исследований определил необходимость формулирования и решения задачи оптимизации.

В предложенной целевой функции двух параметров выявлено, что наиболее важным параметром является качество полиамидной детали (износостойкость). Пределы изменения параметров этой целевой функции, в том числе температуры полиамидной детали (от 35 до 75 °С) и вязкости среды (с содержанием гексана от 20 до 60%), определены исходя из минимизации потерь гексана в смеси при его испарении, предельных температур разогрева смеси и ее проникающей способности.

2. В данной главе предложено решение оптимизационной задачи с использованием двух 3D диаграмм:

– зависимости скорости абразивного износа до 1 мм (при испытании по ГОСТ 11012 – 2017) от температуры полиамидной детали и содержания гексана в смеси в пределах граничных условий;

– зависимости скорости пропитки на глубину 2 мм от температуры полиамидной детали и содержания гексана в смеси в пределах граничных условий.

3. В процессе решения оптимизационной задачи получены следующие результаты: оптимальными режимом и условием технологического процесса являются температура полиамидной детали 75 °С, содержание гексана в технологической жидкости с пониженной вязкости – 40% при ее кинематической вязкости – 9,4 мм²/с.

4. Оптимизированный технологический процесс и полученные научные результаты были использованы:

– лесобработывающей компанией «АВИЛЕС» для модернизации готовых полиамидных втулок подшипника скольжения шарнирных соединений манипуляторов Palfinger Epsilon C70 L22, Palfinger Epsilon M100 L80. Годовой экономический эффект от внедрения технологии маслonaполнения полиамидных втулок составил 321 539 руб.;

– ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения» в учебном процессе дисциплин: «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, заключающемся 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 пропитки 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 ПАб, 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 «запечатывания» поверхностей, после реализации процесса маслonaполнения полиамидных деталей путем оплавления или покрытием, что позволит исключить выход масла из открытых пор при хранении и транспортировке; формирование технологического справочника для определения режимов процесса маслonaполнения различных полимерных и композиционных материалов.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ПД – деталь из полиамида марки ПА6

ЭХ – Эксплуатационная характеристика

ТЖПВ – Технологическая жидкость с пониженной вязкостью

УПО – условный полиамидного образца

ТД – Термодатчик

РЖ – Рабочая жидкость

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Bader H. High frequency drying of porous materials // *Drying Technology*. 1996. Vol. 14. P. 1499-1523.
- 2 Bhagat S., Babu N. R., Saikia L. C., Chiranjeevi T. A review on various secondary controllers and optimization techniques in automatic generation control // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2023. Vol. 64. P. 759-768.
- 3 Chen X., Hou Y., Chen S., Liu X., Zhong X. Characteristics of frictional pressure drop of two-phase nitrogen flow in horizontal smooth mini channels in diabatic/adiabatic conditions // *January Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 162. P. 114-121.
- 4 Eltahir Y., Saeed H., Xia Y., He Y., Yimin W. Mechanical properties, moisture absorption, and dyeability of polyamide 5,6 fibers // *The Journal of The Textile Institute (China)*. 2015. Vol. 107(2). P. 1-7.
- 5 Junhao Y., Suya G., Wenchuan L., Tairan C., Timothy L. Experimental study of flash boiling spray with isooctane, hexane, ethanol and their binary mixtures // (2021) *Fuel* 292(3). 2021. P. 415-420.
- 6 Kang S., Chung D. Синтез и фрикционные свойства блочных полиамидов (капролонов), пропитанных смазкой // Издательство Elsevier Science S.A. Южная Корея. 2018. С. 244-250
- 7 Laurati M., Sotta P., Long D., Fillot L., Arbe A. Dynamics of water absorbed in polyamides // *Macromolecules*. 2012. Vol. 45(3). P. 1676-1687.
- 8 Lyons P. W., Hatcher J. D., Sunderland J. E. Drying of porous medium with internal heat generation // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 1972. Vol. 15. P. 897-905.
- 9 Makhmudov J., Usmonov A., Kuljonov J. Solution of the anomalous filtration problem in two-dimensional porous media // In book: *Current Problems in Applied Mathematics and Computer Science and Systems June 2023*. 2023. P. 68-80.
- 10 Malea C. I., Nițu E. L. Optimization of the technological process and equipment of complex profiled parts // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering* 916. (Romania). 2020 Vol. 926. P. 1890-1899.

- 11 NTC термистор-MF52A-103J/3950 NTC 10Kom // EPCOS : электронный каталог. 2024. URL: http://tec.org.ru/board/mf_52_ntc_10kom/115-1-0-4349 (дата обращения: 07.06.2024).
- 12 Qing F., Shuai Z., Haoming L., Mingyuan D., Fuchuan H. Review of polymer self-lubricating coatings // IOP Conference Series Earth and Environmental Science (India). 2020 Vol. 526. P. 120-127.
- 13 Tan S., Luo Y., Yang J., Baoguang Jia W. W. Mechanism of thermoviscoelasticity driven solid-liquid interface reducing friction for polymer alloy coating // Friction (China). 2023. Vol. 11. P. 1-18.
- 14 Varun V., Venoor V., Park J. H., Kazmer D., Sobkowicz M. J. Understanding the effect of water in polyamides: a review // December 2020 Polymer Reviews. 2020. Vol. 61(3). P. 31-49.
- 15 Александров А. А. Математическое моделирование остаточных напряжений при производстве заготовок из алюминиевых сплавов // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. 2016. № 16. С. 21-25.
- 16 Александров А. А. Прогнозирование динамики охлаждения заготовок из алюминиевых сплавов при термообработке // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2014. № 1. С. 140-145.
- 17 Алямовский Л. Л. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи. Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2012. 18 с.
- 18 Баканин Д. В., Лобанчиков И. А., Филатова С. Н. Использование высокочастотной энергии при изготовлении топливных брикетов // Эволюция современной науки : сборник статей Международной научно-практической конференции: в 4-х частях, Киров, 05 апреля 2016 года. Том Часть 3. Киров: Общество с ограниченной ответственностью "Аэтерна". 2016. С. 6-11.
- 19 Барабанов В. Л. Эмпирические параметры модели противоточной капиллярной пропитки горных пород // Геофизические исследования. 2014. № 1. С. 27-52.
- 20 Баурова Н. И., Зорин В. А. Методы оценки эксплуатационных свойств деталей из полимерных композиционных материалов. Москва : МАДИ, 2017. 84 с.

- 21 Башта Т.М. Машиностроительная гидравлика. Москва : Машиностроение, 1971. 672 с.
- 22 Богданов А. Пластики на рельсах. Пластик: сырье и добавки // ООО «Информационный центр». 2013. №8. С. 17-22.
- 23 Борхович С. Ю., Пчельников П. В., Колесова С. Б. Подземная гидромеханика : учебно–методическое пособие. Ижевск : Удмуртский университет, 2017. 176 с.
- 24 Буторин Д. В., Лившиц А. В., Филиппенко Н. Г. Автоматизация процесса контроля фазовых и релаксационных превращений в полимерных материалах // Информационные системы и технологии. 2017. № 1(99). С. 44-53.
- 25 Буторин Д. В., Чукай И. В., Филиппенко Н. Г. Технология маслonaполнения полимерных и композитных антифрикционных материалов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы Седьмой международной научно–практической конференции, посвященной 355–летию со дня основания города Иркутска, 29 марта 01 апреля 2016 г. Иркутск: в 2 т., Т.2. Иркутск: ИрГУПС. 2016. С. 490-495.
- 26 Бухмиров В. В. Тепломассообмен : учебно–методическое пособие бакалавров. Иваново : Ивановский гос. энергетический ун–т им. В. И. Ленина, 2014. 359 с.
- 27 Бычковский В. С. Технологический процесс исследования маслonaполнения деталей из полиамидных материалов // iPolytech Journal. 2023. № 3. С. 472-481.
- 28 Бычковский В. С., Филиппенко Н. Г., Лившиц А. В. Автоматизированный способ контроля наполнения маслом полимерных и композиционных материалов // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. № 4. С. 9-16.
- 29 Бычковский В. С., Филиппенко Н. Г., Попов С. И., Попов А. С. Термовакuumное нанесение самосмазывающихся покрытий полимерных материалов узлов трения машин и механизмов транспортного машиностроения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. №2. С. 58-64.
- 30 Вельтищев Н. Ф., Жупанов В. Д. Эксперименты по численному моделированию интенсивной конвекции // Метеорология и гидрология. 2008. № 9. С. 30-44.
- 31 Вкладыш трения поглощающего аппарата автосцепки железнодорожного транспорта и вагонов метро из композиционного полимерного антифрикционного

материала. пат. 2595135, Рос. Федерация. заявл. 28.07.2015 : опубл. 20.08.2016 / Моторин С.В. ; заявитель Моторин Сергей Васильевич. 26 с.

32 Вязкость смесей URL: https://tau-rus.com/vyazkost_zhidkosti_sst (дата обращения: 07.06.2024).

33 Гайдамака А. В. Роликоподшипники букс вагонов и локомотивов: моделирование и усовершенствование : монография. Харьков : НТУ «ХПИ», 2011. 312 с.

34 Гексан: свойства и применение в промышленности. URL: <https://avaproviding.ru/news/geksan-svoystva-i-primenenie-v-promyshlennosti/> (дата обращения: 07.06.2024).

35 Гидродинамические критерии подобия. URL: <https://poznayka.org/s12027t1.html> (дата обращения: 07.06.2024).

36 Глуханов Н. П. Физические основы высокочастотного нагрева. Ленинград : Машиностроение, 1979. 61 с.

37 Горлов И. В., Болотов А. Н. Изменение свойств полимерных узлов трения при низких температурах // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. 2019. № 12. С. 54-58.

38 ГОСТ 11012 – 2017. Пластмассы. Метод испытания на абразивный износ = Plastics. Method of test for resistance to abrasion : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 9 августа 2017 г. № 848–ст: введен впервые : дата введения 2018.07.01 / разработан АНО «Стандарткомпозит» и Объединением юридических лиц «Союз производителей композитов». Москва : Стандартинформ, 2017. 11 с.

39 Гребенникова И. В. Задача оптимального управления сингулярно возмущенной системой с запаздыванием при интегральных квадратичных // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2012. Т. 12, № 4. С. 3-11.

40 Гребенникова И. В. Методы оптимизации : учеб. пособие. Екатеринбург : УрФУ, 2017. 148 с.

- 41 Данилова-Третьяк С. М., Евсеева Л. Е., Танаева С. А., Николаева К. В. Тепловое поведение полимерных композитов на основе полиамида // Полимерные материалы и технологии. 2017. Т. 3, № 3. С. 44-49.
- 42 Двумерные функции для оптимизации. URL: <https://habr.com/ru/companies/skillfactory/articles/549472/> (дата обращения: 07.06.2024).
- 43 Доманский В.К., Крепс В. Л., Калягина Л. В. Построение целевой функции для оценки экономических ситуаций на основе экспертного ранжирования // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2006. № 3. С. 38-48.
- 44 Елисеева Н. Н., Зубов А. В., Гусев В. Н. Применение методов поисковой оптимизации при решении геодезических задач // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2020. Т. 64, № 5. С. 491-498.
- 45 Еренков О. Ю., Ивахненко А. Г., Ри Х., Гаврилова А. В. Обработка полимерных материалов резанием на основе обеспечения стабильности технологической системы и предварительных внешних воздействий на заготовки : монография. Владивосток : Федеральное государственное унитарное предприятие «Издательство Дальнаука», 2011. 270 с.
- 46 Еренков О. Ю., Ковальчук С. А. К вопросу о формировании шероховатости поверхности полимерных материалов при обработке резанием // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению. Материалы международной научно-практической конференции, Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет. 2018. С. 77-79.
- 47 Кацнельсон М. Ю., Балаев Г. А. Пластические массы: Свойства и применение : справочник. 3-е изд., перераб. Ленинград : Химия, 1978. 384 с.
- 48 Кинематическая вязкость распространенных в гидравлике жидкостей. URL: <https://www.engineerhelper.ru/html/pipelines/viscosity.html> (дата обращения: 07.06.2024).
- 49 Классификатор технологических операций машиностроения и приборостроения : справочник. Москва : Издательство стандартов, 1987. 72 с.
- 50 Коленкина Е. И., Никитин В.Ф., Логвинов О. А., Смирнов Н. Н. Фильтрационные течения в пористых средах: монография. Москва : ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН,

2020. 73 с.

51 Кондаков Л. А. Рабочие жидкости и уплотнения гидравлических систем. Москва : Машиностроение, 1982. 215 с.

52 Крыжановский В. К., Бурлов В. В., Паниматченко А. Д., Крыжановская Ю. В. Технические свойства полимерных материалов : учеб. пособие. Санкт-Петербург : Профессия, 2003. 240 с

53 Кузнецов Г. В., Шеремет М. А. Разностные методы решения задач теплопроводности : учеб. пособие. Томск : ТПУ, 2007. 172 с.

54 Курзина А. М., Колмаков А. Г., Филиппов В. Н. Демпфирующие композиты из материалов с различающимися упруго-гистерезисными свойствами для сэндвич-амортизаторов железнодорожного транспорта // Материаловедение. 2020. № 1. С. 25-32.

55 Ларченко А. Г., Лившиц А. В., Филиппенко Н. Г. Высокочастотный метод диагностики полиамидных сепараторов подшипников буксового узла // Сб. статей IV Всероссийской научно-практической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири». Иркутск: Изд-во ИрГТУ. 2014. С. 206-211.

56 Ларченко А. Г., Филиппенко Н. Г., Грамаков Д. С. Диагностика изделий из полимерных материалов на транспорте // Молодая наука Сибири. 2020. № 2(8). С. 200-208.

57 Лившиц А. В. Автоматизация научных исследований высокочастотной обработки полимеров // Science and practice: new discoveries: материалы Международной научной конференции, Чехия, г. Карловы Вары Россия, г. Москва. 2015 г. С. 106-114.

58 Лившиц А. В. Автоматизированная система научных исследований высокочастотной электротермии // Проблемы машиностроения и автоматизации. М. : Изд-во НИАТ. 2015. № 4. С. 54-60.

59 Лившиц А. В. Управление технологическими процессами высокочастотной электротермии полимеров // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2015. № 3. С. 120-126.

- 60 Лившиц А. В., Машович А. Я., Филиппенко Н. Г. Аспекты электротермической обработки материалов электромагнитным полем высокой частоты // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Иркутск: ИрГУПС. 2011. № 2. С. 135-140.
- 61 Лившиц А. В., Филиппенко Н. Г., Каргапольцев С. К. Высокочастотная обработка полимерных материалов : монография. Иркутск : ИрГУПС, 2013. 172 с.
- 62 Лившиц А. В., Филиппенко Н. Г., Попов С. И., Ларченко А. Г. Исследование влияния диэлектрических элементов рабочего конденсатора высокочастотной электротермической установки на процесс обработки полимерных материалов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 3(39). С. 270-275.
- 63 Майстренко А. В., Савчук В. Л., Светлаков А. А., Старовойтов Н. В. Цифровое дифференцирование сигналов в реальном масштабе времени с применением скользящей линейной аппроксимации // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. 2009. № 2. С. 71-77.
- 64 Манасян С. К., Цугленок В. Н., Манасян Г. С., Куликов Н. Н. Автоматизация технологического процесса сушки зерна // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2011. №1. С. 149-152.
- 65 Марков А. В., Юленец Ю. П. Многофункциональный контроль параметров технологического процесса в электротермической установке высокочастотного диэлектрического нагрева // Электротехника. 2007. № 7. С. 60-64.
- 66 Маркова Т. Э. Современное состояние и направления развития полимерной индустрии // Экономические науки. М. 2014. № 6. С. 94-98.
- 67 Масло М8В: технические характеристики и преимущества. URL: <https://www.1001maslo.ru/blog/sovety-pokupatelyam/maslo-m8v-tekhnicheskie-kharakteristiki-i-preimushchestva/> (дата обращения: 07.06.2024).
- 68 Маслонаполненный 1,2-полибутadiен, способ его получения, его композиция и формованное изделие : пат. 2266917, Японоия: заявл. 13.02.2002; опубл. 27.12.2005 / Маеда Масаки, Коудзина Дзундзи, Морино Кацуаки, Аояма Теруо, Окада Коудзи, Фуруити Минору; заявитель Джей Эс Эр КОРПОРЕЙШН (JP). 15 с.

- 69 Механическая обработка Капролона. URL: <https://polimer1.ru/mechanicheskaya-obrabotka/mechanicheskaya-obrabotka-kaprolona> (дата обращения: 07.06.2024).
- 70 Милютин Н. В., Лысенкова Е. Н. Технологии и автоматизации производства РЭС и ЭВС (ТАПР). Основы технологии ГКП : учеб. пособие. Харьков : Харьковский национальный университет радиоэлектроники, 2008. 32 с.
- 71 Некоторые сведения из гидравлики трубопроводов и реологии нефтепродуктов. URL: <https://studfile.net/preview/5661685/> (дата обращения: 07.06.2024).
- 72 Нелсон У. Е. Технология пластмасс на основе полиамидов : пер. с англ. под ред. А. Я. Малкина ил. Лондон, Бостон, 1976. Москва : Химия, 1979. 256 с.
- 73 Нигматуллин Р. Г., Костенков Д. М., Хафизова А. Г. Экспресс-устройство для определения степени разбавления моторных масел топливом и изнашивания двигателя // Химия и технология топлив и масел. 2012. № 1. С. 52-53.
- 74 Нильсен Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций : пер. с англ. канд. техн. наук П. Г. Бабаевского ил. 149. Нью-Йорк, 1974. Москва : Химия, 1978. 312 с.
- 75 Образец-свидетель для исследования трехмерной детали, изготовленной методом селективного лазерного плавления : пат. 174368, Рос. Федерация. № 2016151922 : заявл. 28.12.2016; опубл. 11.10.2017 / Береговский В. В., Третьяков Е. В., Щуренкова С. А. ; заявитель Акционерное общество "Научно-производственное объединение "Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения" АО "НПО "ЦНИИТМАШ" (RU). 5 с.
- 76 Ольшанский А. И., Голубев А. Н. Исследование тепло- и массообмена в процессе конвективной термообработки и сушки теплоизоляционных материалов, и приближенное уравнение кривой сушки // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 5. С. 461-477.
- 77 Опорное кольцо поглощающего аппарата автосцепки железнодорожного транспорта и вагонов метро из композиционного полимерного антифрикционного материала на основе полиамида : пат. 2581889, Рос. Федерация. № 2015111084/11 : заявл. 27.03.2015; опубл. 20.04.2016 / Моторин С. В. ; заявитель Моторин Сергей

Васильевич (RU). 15 с.

78 Определение режимов движения жидкости URL: <https://studfile.net/preview/950162/page:3/> (дата обращения: 07.06.2024).

79 Орлов М. Е. Теоретические основы теплотехники. Теплообмен: учеб. Пособие. Ульяновск : УлГТУ, 2013. 204 с.

80 Основы системного подхода. Научная основа создания электронной аппаратуры. Целевая функция и ее формы. URL: <https://studfile.net/preview/3653064/page:6/> (дата обращения: 07.06.2024).

81 Охлопкова А. А., Петрова П. Н., Попов С. Н., Федоров А. Л. Триботехнические материалы на основе политетрафторэтилена, модифицированные жидкой смазкой // Трение и износ. 2008. № 2. С. 177-180.

82 Пен Р. З., Пен В. Р. Статистические методы моделирования и оптимизации технологических процессов // Международный журнал экспериментального образования. 2017. № 2. С. 81-83.

83 Петрова П. Н., Федоров А. Л. Исследование механизмов формирования износостойких маслonaполненных композитов на основе политетрафторэтилена, полученных путем пропитки пористых заготовок // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. Якутск: СВФУ имени М. К. Аммосова. 2010. №4. С. 52-58.

84 Пивень А.Н., Гречаная Н. А., Чернобыльский И. И. Теплофизические свойства полимерных материалов. Киев : Издательское объединение «Вища школа», 1976. 179 с.

85 Пластмассы СПб. Железнодорожный транспорт. URL: <http://www.plastspb.ru/zheleznodorozhnyj-transport> (дата обращения: 07.06.2024).

86 Показатель качества. URL: <https://www.calltouch.ru/blog/glossary/pokazatel-kachestva/> (дата обращения: 07.06.2024).

87 Полиамид 6 (ПА 6). URL: <http://www.anid.ru/poliamid> (дата обращения: 07.06.2024).

88 Попов С. И., Лившиц А. В., Филиппенко Н. Г. Восстановление подшипников буксовых узлов подвижного состава // Сборник научных трудов Sworld. Материалы

международной научно–практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2012», 2–12 октября 2012г. Том 2. Транспорт, Физика и математика. Одесса. 2012. С. 39-43.

89 Попов С. И., Лившиц А. В., Филиппенко Н. Г. Экспериментальные исследования возможности восстановления изделий из полимерных материалов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: Материалы третьей всероссийской научно–практической конференции с международным участием. 13–17 мая 2013 г. Иркутск: ИрГУПС. 2013. С. 430-437.

90 Пошарников Ф. В., Усиков А. В., Серебрянский А. И. Применение композиционного материала на основе полимера в узлах трения лесобрабатывающего оборудования // Лесотехнический журнал. 2011. № 1. С. 51-55.

91 Применение полимеров в машиностроении. URL: <https://mplast.by/encyklopedia/primenenie-polimerov-v-mashinostroenii/> (дата обращения: 07.06.2024).

92 Программное обеспечение «PowerGraph». URL: <http://www.powergraph.ru/> (дата обращения: 07.06.2024).

93 Программный модуль автоматизированной системы управления технологическим процессом контроля пропитки полимерных материалов Ver.1.2 : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023660267, Рос. Федерация. № 2023619348: заявл. 11.05.2023: опублик. 18.05.2023 / Филиппенко Н. Г., Лившиц А. В., Бычковский В. С. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения».

94 Программный модуль обеспечения автоматизированного проведения экспериментов по определению теплофизических свойств и фазовых превращений в полимерных и композитных материалах : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018663940, Рос. Федерация. № 2018660862: заявл. 09.10.2018: опублик. 07.11.2018 / Баканин Д. В., Филиппенко Н. Г., Лившиц А. В., Бычковский В. С. [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный

университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ИрГУПС).

95 Программный модуль обеспечения автоматизированного процесса исследования вакуумного наполнения углеводородами эластомерных композитных материалов : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021668392, Рос. Федерация. № 2021667777: заявл. 08.11.2021: опубл. 15.11.2021 / Филиппенко Н. Г., Лившиц А. В., Чумбадзе Т. Т., Бычковский В. С. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения».

96 Программный модуль обеспечения автоматизированного процесса научного исследования процесса агрегатных превращений и деструкции полимерных материалов : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021668394, Рос. Федерация. № 2021667811: заявл. 08.11.2021: опубл. 15.11.2021 / Филиппенко Н. Г., Лившиц А. В., Баканин Д. В., Бычковский В. С. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения».

97 Программный модуль управления автоматизированной системой научных исследований при изучении электрофизических параметров полимеров и композитов : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019665505, Рос. Федерация. № 2019664188: заявл. 11.11.2019: опубл. 25.11.2019 / Баканин Д. В., Филиппенко Н. Г., Лившиц А. В., Бычковский В. С. [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ИрГУПС).

98 РД 055 ПКБ ЦЛ–2010. Вагоны пассажирские. Руководство по деповскому ремонту / Проектно–конструкторское бюро пассажирского хозяйства (ПКБ ЦЛ ОАО «РЖД») (утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 30.01.2012). 260 с.

99 РД 32 ЦВ 082–2018. Общее руководство по ремонту "Тележки трехэлементные грузовых вагонов со скользунами постоянного контакта с осевой нагрузкой 23,5 тс моделей 18–578 и 18–9771» (утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 23.11.2018 N 2471/р) (ред. от 18.06.2020). 25 с.

- 100 Савельев А. Г., Михайловская В. А., Лагунов С. А. Составление и обоснование системы показателей целевых функций оценки эффективности и оптимизации структурных схем и стержневых систем рабочего оборудования дорожно–строительных машин (РО ДСМ) и их конфигураций // Строительные и дорожные машины. 2020. № 8. С. 37-43.
- 101 Свойства математических моделей. URL: <https://studfile.net/preview/3001845/page:2/> (дата обращения: 07.06.2024).
- 102 Севостьянов Н. В., Бурковская Н. П. Современные аспекты развития триботехнического материаловедения тяжело нагруженных узлов сухого трения (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 10. С. 76-89.
- 103 Семчиков Ю. Д. Высокомолекулярные соединения. Москва : Академия, 2003. 368 с.
- 104 Сербиновский М. Ю., Попова О. В., Шкуракова О. Э., Финоченко Т. А. Исследование водопоглощения полиамидными композитами, наполненными графитовыми материалами из лигнина // Журнал прикладной химии. 2021. № 10. С. 1303–1308.
- 105 Сидельников К. А., Лялин В. Е. Моделирование двумерной двухфазной фильтрации методом трубок тока // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2006. №1. С. 267-271.
- 106 Сияхаков С. М., Сафаров М. М. Исследование плотности подсолнечного масла от концентрации n гексана // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. 2016. № 4. С. 261-265.
- 107 Скачков А. Н., Юхневский А. А., Мешков В. В., Горлов И. В., Горлов А. И. Триботехнические испытания нового материала для вкладыша скользуна пассажирского вагона // Транспорт Российской Федерации. 2015. №3. С. 69-71.
- 108 Скворцов Ю. В., Глушков С. В. Анализ прочности элементов авиационных конструкций с помощью CAE- системы MSC.Patran-Nastran [Электронный ресурс] / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Самара, 2012. – 1 CD-ROM.

- 109 Скрылева Е. И., Никитин В. Ф., Логвинов О. А., Смирнов Н. Н. Фильтрационное течения в пористых средах : учеб. Пособие. Москва : Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова. 2017. 72 с.
- 110 Способ высокочастотной обработки конструктивно–сложных изделий из полимерных материалов : пат. 2717804 Российская Федерация, МПК В29С 65/04, F26В 7/00, F26В 19/00, H05В 6/46.: № 2019117685: заявл. 05.06.2019: опубл. 25.03.2020 / Филиппенко Н. Г., Лившиц А. В., Каргапольцев С. К., Бычковский В. С. [и др.] ; заявитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Иркутский государственный университет путей сообщения (ФГБОУ ВО ИрГУПС). 14 с.
- 111 Степановских Е. И., Брусницына Л. А., Виноградова Т. В. Физическая химия для инженеров. Екатеринбург : Изд-во Урал, ун-та, 2022. 264 с.
- 112 СТО ИНТИ S.70.2–2022. Упрочнение поверхности химико-термическим методом / Разработан ООО «Ионные технологии» и АНО «Институтом нефтегазовых технологических инициатив». 4 с.
- 113 Сумм Б. Д., Горюнов Ю. В. Физико–химические основы смачивания и растекания : монография. Москва : Химия, 1976. 229 с.
- 114 Тагер А. А. Физикохимия полимеров : монография. 4-е изд., перераб. и доп. Москва : Научный мир, 2007. 576 с.
- 115 Тагера А. А., Цилипоткиной М. В. Пористая структура полимеров и механизм сорбции // Журнал «Успехи химии». 1978 году. 1978. № 1. С. 152-164.
- 116 Глустенко С. Ф., Коптев А. Н. Методология оптимизации целевых функций технологических систем производства летательных аппаратов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2020. № 6. С. 36-42.
- 117 ТУ 2224–029–00203803–2002 Капролон (полиамид-6 блочный) маслонеполненный стержень, круг. Документ № 59.55.20.222.Т.000343.04.08 от 15 апреля 2008. Экспертное заключение о соответствии санитарным правилам проектной документации ФГУЗ "Центр гигиены и эпидемиологии в Пермском крае " № 185 от 08.04.2008 г. 2 с.
- 118 Федоров А. Л., Петрова П. Н. Износостойкие композиты на основе ПТФЭ,

полученные модифицированием моторными маслами // Известия Самарского научного центра РАН. Самара: СамНЦ РАН. 2011. №1. С. 404-406.

119 Физические величины. Вязкость жидкости. URL: https://www.areopag-spb.ru/maintenance/reference/svedeniya_o_vyazkosti/ (дата обращения: 07.06.2024).

120 Филиппенко Н. Г. Автоматизированная система управления процессом высокочастотной обработки полимерных материалов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Иркутск: ИрГУПС. 2012. №4(32). С. 50-55.

121 Филиппенко Н. Г., Беломестных А. А., Чумбадзе Т. Т. Автоматизированное исследование процесса набухания уплотнений сливных приборов вагонов-цистерн // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2021. № 2. С. 62-68.

122 Филиппенко Н. Г., Ларченко А. Г., Попов С. И., Лившиц А. В. Адаптивное управление высокочастотным нагревом // Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте: сб. науч. Трудов. Иркутск: ИрГУПС. 2013. С. 155-163.

123 Филиппенко Н. Г., Лившиц А. В., Каргапольцев С. К. Контроль и управление высокочастотной электротермией. Новые аспекты : монография. Saarbrücken, Deutschland : LAP Academic Publishing AV Akademikerverlang GmbH & Co. KG Heinrint-Bocking-Str.6-8, 66121, 2013. 157 с.

124 Филиппенко Н. Г., Лившиц А. В., Машович А. Я. Определение эффективных режимов электротермической сушки полимерных материалов // Известия ВУЗов Прикладная химия и биотехнология. Иркутск: ИрНИТУ. 2013. С. 82-88.

125 Флеш-технология изготовления печатей и штампов URL: http://www.pечатim.ru/technology_flash.php (дата обращения: 07.06.2024).

126 Фокин В. М., Бойков Г. П., Видин Ю. В. Основы технической теплофизики : монография. Москва : Машиностроение-1, 2004. 172 с.

127 Хопфф Г., Пакшвера А. Б., Мюллер А., Венгер Ф. Полиамиды : перевод с немецкого проф. Москва : Государственное научное-техническое издательство химической литературы, 1958. 328 с.

- 128 Цубанов А. Г., Синяков А. Л., Сеница С. И., Цубанов И. А., Рябцев А. Б. Теплообмен в производственных процессах АПК : методические указания к практическим занятиям. Минск : Белорусский государственный аграрный технический университет, 2006. 81 с.
- 129 Черника И. М., Болога М. К., Моторин О. В., Кожевников И. В. Интенсификация теплообмена при кипении в электрогидродинамическом потоке // Тепло-массообмен и гидродинамика в закрученных потоках : материалы VIII международной конференции, Москва, 18–21 октября 2021 года. Москва: Издательский дом МЭИ. 2021. С. 263-265.
- 130 Шахрай С. Г., Ржечицкий Э. П., Горовой В. О. Исследование параметров технологических процессов и анализ производительности оборудования // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 3 (51). С. 84-88.
- 131 Шеберстова В. И. Технология изготовления печатных форм. Москва : Книга, 1990. 225 с.
- 132 Шевелько П. С., Акиндеев А. Е., Брага В. Г., Константинов В. Д., Сухпнов С. С., Тихомиров Ю. П. Справочник авиационного техника. 3-е изд., перераб. и доп. Москва : Воен-издат, 1974. 592 с.
- 133 Шиляева Л. П., Судакова Н. Н., Белоусова В. Н., Курзина И. А. Термодинамика растворов неэлектролитов. Томск : Издательский Дом Томского государственного университета, 2015. 168 с.
- 134 Ярославцев В. М. Высокоэффективные технологии обработки изделий из композиционных материалов // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование» МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. №4. С. 1-24.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Программный модуль экспериментального стенда по определению температуры нала испарения гексана из масляного наполнителя

```

const int t0Pin=A9; // вход 9 – термopapa 0
const int t1Pin=A11; // вход 11 – термopapa 1
const int PPin=A12; // вход 12 – потенциометр
const int PinGen=8; // выход 8 – твердотельное реле
void setup() {
  Serial.begin(57600); // нужно настроить скорость порта на 9600 в диспетчере устройств
  pinMode(PinGen,OUTPUT); digitalWrite(PinGen,HIGH); // цепь твердотельного реле замкнута
}
void loop() {
  // read the input on analog pin 0:
  int Tpred= analogRead(PPin)*0.156+40; // в сигнала с аналогового пина и расчет предельной температуры в интервале от 80 до 200 град
  /*int Tpred = analogRead(PPin);
  map (Tpred, 0, 1023, 80, 200);
  constrain(Tpred, 80, 200);
  delay(30);
  */
  int T0= analogRead(t0Pin)*1.0769-554-29; // Считывание сигнала с аналогового пина и расчет температуры 0
  float T1= analogRead(t1Pin)*1.0769-554-28; // Считывание сигнала с аналогового пина и расчет температуры 1
  if(T0>Tpred) // если температура больше 100 град
  {
    digitalWrite(PinGen,LOW); // реле разомкнуть, нагреватель выключится
  }
  else if (T0<(Tpred-5)) // если температура меньше 95 град
  //else if (T0>80&&T0<90) // если температура меньше 95 град
  {
    digitalWrite(PinGen,HIGH); // реле замкнуть, нагреватель включится
  }
  // Вывод данных в com-порт
  /*
  Serial.println("Tpred: "); Serial.print(Tpred);
  Serial.print(", T0: "); Serial.println(T0);
  Serial.print(", T1: "); Serial.println(T1);
  */
  Serial.print(Tpred);
  Serial.print("\t"); // табуляция
  Serial.print(T0);
  Serial.print("\t"); // табуляция
  Serial.println(T1);
  delay(10); // delay in between reads for stability
}

```


ПРИЛОЖЕНИЕ В

Копии 6 свидетельств РФ регистрации программ для ЭВМ и 2 патентов РФ
на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019665505

Программный модуль управления автоматизированной
системой научных исследований при изучении
электро-физических параметров полимеров и композитов

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Иркутский
государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО
ИрГУПС) (RU)*

Авторы: *см. на обороте*



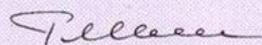
Заявка № 2019664188

Дата поступления 11 ноября 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 25 ноября 2019 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ислюев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018663940

**Программный модуль обеспечения автоматизированного
проведения экспериментов по определению
теплофизических свойств и фазовых превращений в
полимерных и композитных материалах**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Иркутский
государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО
ИрГУПС) (RU)**

Авторы: **см. на обороте**



Заявка № **2018660862**

Дата поступления **09 октября 2018 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **07 ноября 2018 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2717804

**Способ высокочастотной обработки конструктивно-
сложных изделий из полимерных материалов**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
Иркутский государственный университет путей сообщения
(ФГБОУ ВО ИрГУПС) (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2019117685

Приоритет изобретения **05 июня 2019 г.**

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **25 марта 2020 г.**

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает **05 июня 2039 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Иблиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 717 804**⁽¹³⁾ **C1**

(51) МПК
B29C 65/04 (2006.01)
F26B 7/00 (2006.01)
F26B 19/00 (2006.01)
H05B 6/46 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

B29C 65/04 (2020.02); *F26B 7/00* (2020.02); *F26B 19/00* (2020.02); *H05B 6/46* (2020.02)

(21)(22) Заявка: 2019117685, 05.06.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
05.06.2019

Дата регистрации:
25.03.2020

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 05.06.2019

(45) Опубликовано: 25.03.2020 Бюл. № 9

Адрес для переписки:

664074, г. Иркутск-74, ул. Чернышевского, 15,
 ФГБОУ ВО "ИрГУПС", Патентно-
 лицензионный отдел, начальнику отдела, Е.В.
 Хитровой

(72) Автор(ы):

Филиппенко Николай Григорьевич (RU),
 Лившиц Александр Валерьевич (RU),
 Каргапольцев Сергей Константинович (RU),
 Баканин Денис Викторович (RU),
 Попов Александр Сергеевич (RU),
 Бычковский Владимир Сергеевич (RU),
 Курайтис Алексей Сергеевич (RU),
 Буторин Денис Витальевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
 образовательное учреждение высшего
 образования Иркутский государственный
 университет путей сообщения (ФГБОУ ВО
 ИрГУПС) (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
 о поиске: RU 2497673 C2, 10.11.2013. RU
 2497315 C2, 27.10.2013. DE 10050301 A1,
 25.04.2002. US 2009300939 A1, 10.12.2009.

(54) Способ высокочастотной обработки конструктивно-сложных изделий из полимерных материалов

(57) Реферат:

Изобретение относится к способу высокочастотной обработки конструктивно-сложных деталей, которой является, например, полиамидный сепаратор роликового подшипника. Способ осуществляется путем охвата деталей высокопотенциальными и заземленными электродами рабочего конденсатора, подключенного к высокочастотному генератору, при одновременном приложении давления. При этом охват детали электродами осуществляют по верхней, нижней и внутренним боковым поверхностям перегородок, создавая пространственную схему $2 \times n$ рабочих конденсаторов. Для достижения равномерного нагрева как конструктивно-сложных элементов, так и конических элементов конструкции изделий, дополнительно предусматриваются зазоры, создающие воздушные конденсаторы в местах,

где требуется изменить высокочастотное воздействие. Принимая во внимание диэлектрические свойства воздуха ($\epsilon=1,000570$), можно утверждать, что воздействие на полимер (полиамид $\epsilon=3,0-3,6$) в местах с воздушным зазором (в зависимости от величины зазора) уменьшает высокочастотное воздействие. Все конденсаторы одновременно подключают к генератору, тем самым образуют разность потенциалов между соседними электродами и между верхней высокопотенциальной плитой и электродами, подключенными через нижнюю контактную группу к нижней заземленной плите, и нижней заземленной плитой и электродами, подключенными через верхнюю контактную группу к верхней высокопотенциальной плите. Нагрев производят до температуры начала рекристаллизации полиамида. Затем отключают

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 731 272** ⁽¹³⁾ **C1**(51) МПК
G01N 33/44 (2006.01)
G01N 15/00 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01N 33/44 (2020.02); G01N 15/00 (2020.02)

(21)(22) Заявка: 2019145244, 25.12.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
25.12.2019Дата регистрации:
01.09.2020Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 25.12.2019

(45) Опубликовано: 01.09.2020 Бюл. № 25

Адрес для переписки:
664074, г. Иркутск-74, ул. Чернышевского, 15,
ФГБОУ ВО "ИрГУПС", Патентно-
лицензионный отдел, начальнику отдела Е.В.
Хитровой

(72) Автор(ы):

Филиппенко Николай Григорьевич (RU),
Лившиц Александр Валерьевич (RU),
Буторин Денис Витальевич (RU),
Каргапольцев Сергей Константинович (RU),
Фарзалиев Эмиль Физули-оглы (RU),
Бычковский Владимир Сергеевич (RU),
Грамаков Демид Сергеевич (RU),
Баканин Денис Викторович (RU),
Курайтис Алексей Сергеевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования Иркутский государственный
университет путей сообщения (ФГБОУ ВО
ИрГУПС) (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2375294 C2, 10.12.2009. Буторин
Д.В. и др. Автоматизация контроля
структурных превращений в полимерных
материалах при электротермической
обработке / Современные технологии.
Системный анализ. Моделирование, N 1 (49),
2016, стр.117-125.

(54) Автоматизированная система исследования полимерных и композиционных материалов

(57) Реферат:

Настоящее изобретение относится к автоматизированной системе исследования полимерных и композитных материалов, включающей термокамеру, систему программного управления температурой в термокамере, систему сбора, обработки и представления информации, систему программного управления, реализующую автоматизированное выполнение программ исследования, отличающейся тем, что дополнительно введены система определения геометрических параметров образца, система подачи ВЧ-сигнала в термокамеру, система

исполнительных механизмов (например, шагового двигателя) с обратной связью, система бесперебойного энергообеспечения заданного уровня силового и опорного напряжения, система фильтрации сигналов с датчиков на аппаратном и программном уровне, причем термокамера конструктивно выполнена так, что в нее встроены рабочий конденсатор, где размещается испытуемый образец. Настоящее изобретение обеспечивает повышение точности и оперативности определения электрофизических параметров и температурных границ фазово-релаксационных и агрегатных переходов в

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023660267

**Программный модуль автоматизированной системы
управления технологическим процессом контроля
пропитки полимерных материалов Ver.1.2**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Иркутский государственный университет путей
сообщения» (ФГБОУ ВО ИрГУПС) (RU)*

Авторы: *Филиппенко Николай Григорьевич (RU), Лившиц
Александр Валерьевич (RU), Бычковский Владимир Сергеевич
(RU)*

Заявка № 2023619348

Дата поступления 11 мая 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 18 мая 2023 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021668394

**Программный модуль обеспечения
автоматизированного процесса научного исследования
процесса агрегатных превращений и деструкции
полимерных материалов**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Иркутский государственный университет путей
сообщения» (ФГБОУ ВО ИрГУПС) (RU)*

Авторы: *Филиппенко Николай Григорьевич (RU), Лившиц
Александр Валерьевич (RU), Баканин Денис Викторович
(RU), Бычковский Владимир Сергеевич (RU)*

Заявка № 2021667811

Дата поступления 08 ноября 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 15 ноября 2021 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021668392

**Программный модуль обеспечения
автоматизированного процесса исследования
вакуумного наполнения углеводородами эластомерных
композитных материалов**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Иркутский государственный университет путей
сообщения» (ФГБОУ ВО ИрГУПС) (RU)*

Авторы: *Филиппенко Николай Григорьевич (RU), Ливиниц
Александр Валерьевич (RU), Чумбадзе Тамара Тимуриевна
(RU), Бычковский Владимир Сергеевич (RU)*

Заявка № 2021667777

Дата поступления 08 ноября 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 15 ноября 2021 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

RU

2024611775

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства): 2024611775 Дата регистрации: 24.01.2024 Номер и дата поступления заявки: 2024610394 10.01.2024 Дата публикации: 24.01.2024 Контактные реквизиты: нет	Авторы: Филиппенко Николай Григорьевич (RU), Лившиц Александр Валерьевич (RU), Бычковский Владимир Сергеевич (RU) Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ИргГУПС) (RU)
--	--

Название программы для ЭВМ:

Программный модуль автоматизированной системы управления технологическим процессом контроля уровня антифрикционной жидкости при пропитке полимерных материалов

Реферат:

Программа написана для программируемого контроллера семейства AVR 328, 2560. На основе использования кода программного продукта обеспечивается: контроль уровня необходимой для пропитки антифрикционной жидкости за счет автоматической стабилизации начального уровня и контроля его снижения при пропитке. При этом процесс осуществляется с заранее заданной температурой, барическими, объемными параметрами и временными интервалами технологии термовакуумного заполнения полимерных материалов. Процесс осуществляется с регулируемой скоростью, контролем состояния пропитки по изменению объема, автоматизированном измерении динамики пропитки и автоматическом отключении с последующей перезагрузкой системы в случае сбоя при контроле или передачи данных о параметрах работы установки. Тип ЭВМ: IBM PC - совмест. ПК; ОС: Windows XP/7/8, Linux.

Язык программирования: Processing/Wiring

Объем программы для ЭВМ: 3572 КБ

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Программный модуль электротермического маслонаполнения полиамидной детали в экспериментально–исследовательской установке

```

// Установите датчики в соответствующие пины:
const int tokPin=8; // вход 0 – датчик тока
const int t1Pin=A1; // вход 1 – термопара 9 1
const int t2Pin=A2; // вход 2 – термопара 10 2
const int t3Pin=A3; // вход 3 – термопара 11 3
const int t4Pin=A4; // вход 4 – термопара 12 4
const int t5Pin=A5; // вход 5 – термопара 13 5
const int alfPin=A0; // вход 6 – датчик угла поворота регулятора мощности ВЧ–генератора
const int motor_pin_DIR=2; // выход 2 – направление вращения шагового двигателя (ШД), управляющего регулятором мощности (LOW – по часовой, HIGH – против часовой стрелки)
const int motor_pin_STEP=3; // выход 3 – шаг двигателя
const int En=4; // выход 4 – Enable питание ШД (LOW – вкл, HIGH – выкл)
const int PinGen=8; // выход 8 – твердотельное реле (транзистор) для импульсного управления сетчатым током генераторной лампы (выкл/вкл вч–генератора)
const int PinVint=10; // выход 10 – механическое реле управления вентилятором, предназначенным для удаления капель с поверхности полимера
// Задайте основные параметры:
unsigned long v1=5000; // время работы вч–генератора, миллисекунды
const int v2=1000; // время отключенного состояния вч–генератора, миллисекунды (800min)
const int vp=700; // время остаточного паразитного воздействия электромагнитного поля – помехи (700max)
const int Speed=75; // частота вращения двигателя, об/мин (75max)
const float Tok1=0.3, Tok2=0.35; // пределы регулирования анодного тока
// Описание переменных:
float T1; // температура1
float T2; // температура2
float T3; // температура3
float T4; // температура4
float T5; // температура5
float Tok; // анодный ток
int code_adc = 0; // код токового АЦП
int code_RMS = 0; // промежуточное значение кода, ввел из–за того, что не уверен в библиотеках ардуино
int null_code = 0; // код нулевого уровня тока
bool null_factor = true; // флаг обнаружения нулевого уровня
float x; // для степени угла поворота
float Alf; // угол поворота регулятора мощности (от 14 до 0 град.)
float U; // напряжение вч–генератора
int Moch; // мощность вч–генератора
unsigned long releMillis=0; // время начала отсчета для v1 и v2
unsigned long tempMillis=0; // время начала отсчета vp=700 мсек. для вывода температуры (т.к. после выключения вч–генератора электрическое поле создает помехи термодатчику в течение vp=700 мсек.)
int zapusk=0; // флаг на запуск установки оператором
int flag_Off=0; // флаг на отключение установки оператором
int flag_rele = 0; // флаг на включение и выключение вч–генератора

```

```

int ch=0; // счетчик на выключение вч-генератора
int flagP=0; // флаг на вывод данных
float T = 150/Speed; // время между шагами двигателя, мс (1 оборот двигателя = 400 шагов, при
частоте вращения 1 об/мин T=60000/400=150 мс)
int g=0; // флаг направление движения ШД: 1 – по часовой, -1 – против часовой стрелки, 0 –
остановка
int shag=1; // вращение двигателя происходит за счет циклически повторяющейся последователь-
ности из 2-х шагов (1, -1)
unsigned long ShagMillis = 0; // сохраняет время работы программы, начало отсчета времени м/у
шагами двигателя
//_____
void setup() {
  ADCSRA |= (1 << ADPS2); //Биту ADPS2 присваиваем единицу – коэффициент деления 16
  ADCSRA &= ~((1 << ADPS1) | (1 << ADPS0)); //Битам ADPS1 и ADPS0 присваиваем нули
  Serial.begin(57600); // нужно настроить скорость порта на 57600 в диспетчере устройств
  pinMode(PinGen,OUTPUT); digitalWrite(PinGen,HIGH); // цепь твердотельного реле замкнута
  pinMode(PinVint,OUTPUT); digitalWrite(PinVint,HIGH); // цепь механического реле разомкнута
  pinMode(motor_pin_DIR, OUTPUT); digitalWrite(motor_pin_DIR, HIGH); // направление враще-
ния шагового двигателя – против часовой стрелки
  pinMode(motor_pin_STEP, OUTPUT); digitalWrite(motor_pin_STEP, LOW); // шаговый двигатель
остановлен
  pinMode(En, OUTPUT); digitalWrite(En, HIGH); // Enable питание ШД выключено
}
//_____
void loop() {
  Filtr(); // считывание, перевод в натуральную величину и фильтрация показаний датчиков
  while(zapusk==0 && Tok<=0.09)// пока не произошел запуск установки оператором
  {
    Filtr(); // считывание, перевод в натуральную величину и фильтрация показаний датчиков
    Print(); // вывод данных
    releMillis=millis();
    digitalWrite(En, HIGH); // Enable питание ШД выключено
  }
  zapusk=1;
  digitalWrite(PinVint,LOW); // замкнуть реле, вентилятор включится
  // Импульсное воздействие
  if(flag_rele==0 && (millis() – releMillis)>v1) // если истекло время v1
  {
    digitalWrite(PinGen,LOW); // реле разомкнуть, вч-генератор выключится
    flag_rele=1;
    ch++;
    releMillis=millis();
  }
  if(flag_rele==1 && vp<(millis()–releMillis) && (millis()–releMillis)<(v2–1)) // если после выключе-
ния вч-генератора прошло 700 мсек. и до истечения времени (v2–1)
  {
    Print(); // вывод данных
    flagP=1;
  }
  if(flag_rele==1 && (millis() – releMillis)>v2) // если после выключения генератора истекло время
v2
  {
    digitalWrite(PinGen,HIGH); // замкнуть реле, вч-генератор включится

```

```

flag_rele=0;
releMillis=millis();
}
if(ch>0 && flag_rele==0 && Tok<=0.09 && (millis()-releMillis)>100) // если реле сработало, а
вч-генератор не включился (значит установка отключена оператором)
{
ch=0;
flag_Off=1;
tempMillis=millis();
}
if(flag_Off==1 && (millis() - tempMillis)>vp) // если после отключения установки оператором
прошло 700 мсек
{
flag_Off=0;
zapusk=0;
digitalWrite(PinVint,HIGH); // разомкнуть реле, вентилятор выключится
}
// Вывод данных:
if(flagP==0){
Serial.print("\t"); // табуляция
Serial.print(Tok); // вывод тока
Serial.print("\t"); // табуляция
Serial.println(Moch); // вывод мощности
}
flagP=0;
// Управление регулятором мощности
if(Tok<Tok1) g=1;
if(Tok>Tok2) g=-1;
if(Tok>=Tok1 && Tok<=Tok2) g=0;
if(Tok<=0.09) g=0;
if(Alf>=13.5 && g==-1) g=0;
if(Alf<=1 && g==1) g=0;
// Шаговый двигатель, скорость
if((millis() - ShagMillis)>T && g!=0)
{
digitalWrite(En, LOW); // Enable питание ШД включено
ShagMillis=millis();
if(g==1)
{
digitalWrite(motor_pin_DIR, LOW); // направление вращения шагового двигателя – по часовой
стрелке
}
if(g==-1)
{
digitalWrite(motor_pin_DIR, HIGH); // направление вращения шагового двигателя – против ча-
совой стрелки
}
if(shag>0)digitalWrite(motor_pin_STEP, HIGH);
if(shag<0)digitalWrite(motor_pin_STEP, LOW);
}

```

```

    shag=-1*shag;
}
// Защита от пробоя:
if(Tok>1) // если ток больше 1 ампера
{
    digitalWrite(PinGen,LOW); // реле разомкнуть, вч-генератор выключится
}
}
//_____
// Функция фильтра,сглаживающего помехи датчиков:
void Filtr() {
    int k=10; // выборка значений 10
    float sT1=0, sT2=0, sT3=0, sT4=0, sT5=0, sTok=0, sAlf=0; // обнуление сумм значений выборки
    for (int i=0; i<k; i++)
    {
// Термопара
/*
        T1=analogRead(t1Pin)*1.0769-554; // считывание и перевод в натуральную величину значения
температуры1
        sT1=sT1+T1; // сумма значений температуры1
        T2=analogRead(t2Pin)*1.0769-556; // считывание и перевод в натуральную величину значения
температуры2
        sT2=sT2+T2; // сумма значений температуры2
        T3=analogRead(t3Pin)*1.0769-557; // считывание и перевод в натуральную величину значения
температуры3
        sT3=sT3+T3; // сумма значений температуры3
        T4=analogRead(t4Pin)*1.0769-556; // считывание и перевод в натуральную величину значения
температуры4
        sT4=sT4+T4; // сумма значений температуры4
        T5=analogRead(t5Pin)*1.0769-557; // считывание и перевод в натуральную величину значения
температуры5
        sT5=sT5+T5; // сумма значений температуры5
    */
// Термистр 100 ком
        T1=-54.42*log(analogRead(t1Pin))+400-1.5; // считывание и перевод в натуральную величину
значения температуры1
        sT1=sT1+T1; // сумма значений температуры1
        T2=-54.42*log(analogRead(t2Pin))+400; // считывание и перевод в натуральную величину значе-
ния температуры2
        sT2=sT2+T2; // сумма значений температуры2
        T3=-54.42*log(analogRead(t3Pin))+400; // считывание и перевод в натуральную величину значе-
ния температуры3
        sT3=sT3+T3; // сумма значений температуры3
        T4=-54.42*log(analogRead(t4Pin))+400; // считывание и перевод в натуральную величину значе-
ния температуры4
        sT4=sT4+T4; // сумма значений температуры4
        T5=-54.42*log(analogRead(t5Pin))+400; // считывание и перевод в натуральную величину значе-
ния температуры5
        sT5=sT5+T5; // сумма значений температуры5
    /*
//термистор 10 кОм
        T1=-35.72*log(analogRead(t1Pin))+255.46; // считывание и перевод в натуральную величину
значения температуры1

```

```

    sT1=sT1+T1; // сумма значений температуры1
    T2=-35.72*log(analogRead(t2Pin))+255.46; // считывание и перевод в натуральную величину значения температуры2
    sT2=sT2+T2; // сумма значений температуры2
    T3=-35.72*log(analogRead(t3Pin))+255.46; // считывание и перевод в натуральную величину значения температуры3
    sT3=sT3+T3; // сумма значений температуры3
    T4=-35.72*log(analogRead(t4Pin))+255.46; // считывание и перевод в натуральную величину значения температуры4
    sT4=sT4+T4; // сумма значений температуры4
    T5=-35.72*log(analogRead(t5Pin))+255.46; // считывание и перевод в натуральную величину значения температуры5
    sT5=sT5+T5; // сумма значений температуры5
*/
// Ток
// считывание и перевод в натуральную величину значения тока
for (int i = 0; i < 20; i++){
    code_adc = analogRead(tokPin);
    code_RMS = code_RMS + code_adc;
}
code_adc = code_RMS/20;
code_RMS = 0;
// настраиваем нулевой уровень
if (null_factor = true){
    null_code = code_adc;
    null_factor = false;
}
// Закончили настройку ноля
Tok = -1*(-code_adc*0.0026+1.44-0.14)-2;//формула
sTok=sTok+Tok; // сумма значений тока
// Угол поворота
x=analogRead(alfPin); // считывание значения угла
//вычисления угла
int ALF_now = 0;
int ALF_RMS = 0;
for (int i = 0; i < 20; i++){
    ALF_now = analogRead(A6);
    ALF_RMS = ALF_RMS + ALF_now;
}
ALF_now = ALF_RMS/20; ALF_RMS = 0;
//Alf=analogRead(A6)*0.0274-14.1; // перевод в натуральную величину значения угла
Alf = ALF_now*0.0274-14.1;
//вычисление alf
sAlf=sAlf+Alf; // сумма значений угла
}
T1 = sT1/k; // отфильтрованное значение температуры1
T2 = sT2/k; // отфильтрованное значение температуры2
T3 = sT3/k; // отфильтрованное значение температуры3
T4 = sT4/k; // отфильтрованное значение температуры4
T5 = sT5/k; // отфильтрованное значение температуры5
Tok = sTok/k; // отфильтрованное значение тока
Tok = constrain(Tok, 0, 2);
Alf = sAlf/k; // отфильтрованное значение угла

```

```

Alf = constrain(Alf, 0, 14);
U      =      -0.0444*pow(Alf,5)+2.2143*pow(Alf,4)-43.03*pow(Alf,3)+407.55*pow(Alf,2)-
1907.4*Alf+3999.9; // вычисление напряжения вч-генератора
Moch = U*Ток; // вычисление мощности вч-генератора
}
//-----
// Функция вывода данных:
void Print() {
  Serial.print(T1); // вывод температуры1
  Serial.print("\t"); // табуляция
  Serial.print(T2); // вывод температуры2
  Serial.print("\t"); // табуляция
  Serial.print(T3); // вывод температуры3
  Serial.print("\t"); // табуляция
  Serial.print(T4); // вывод температуры4
  Serial.print("\t"); // табуляция
  Serial.print(T5); // вывод температуры5
  Serial.print("\t"); // табуляция
  Serial.print(Ток); // вывод тока
  Serial.print("\t"); // табуляция
  Serial.println(Moch); // вывод мощности
}

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Блок-схемы алгоритмов

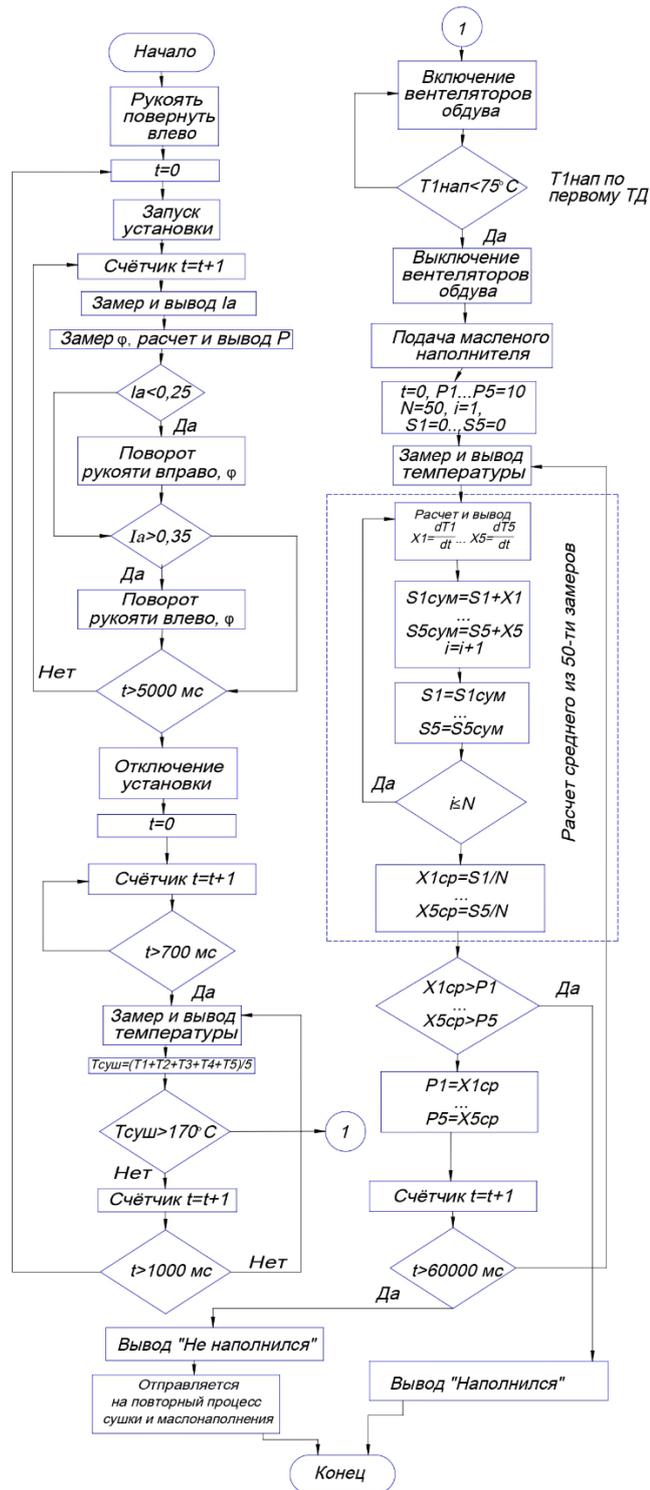


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма автоматизированного исследования технологического процесса маслonaполнения полиамидных материалов

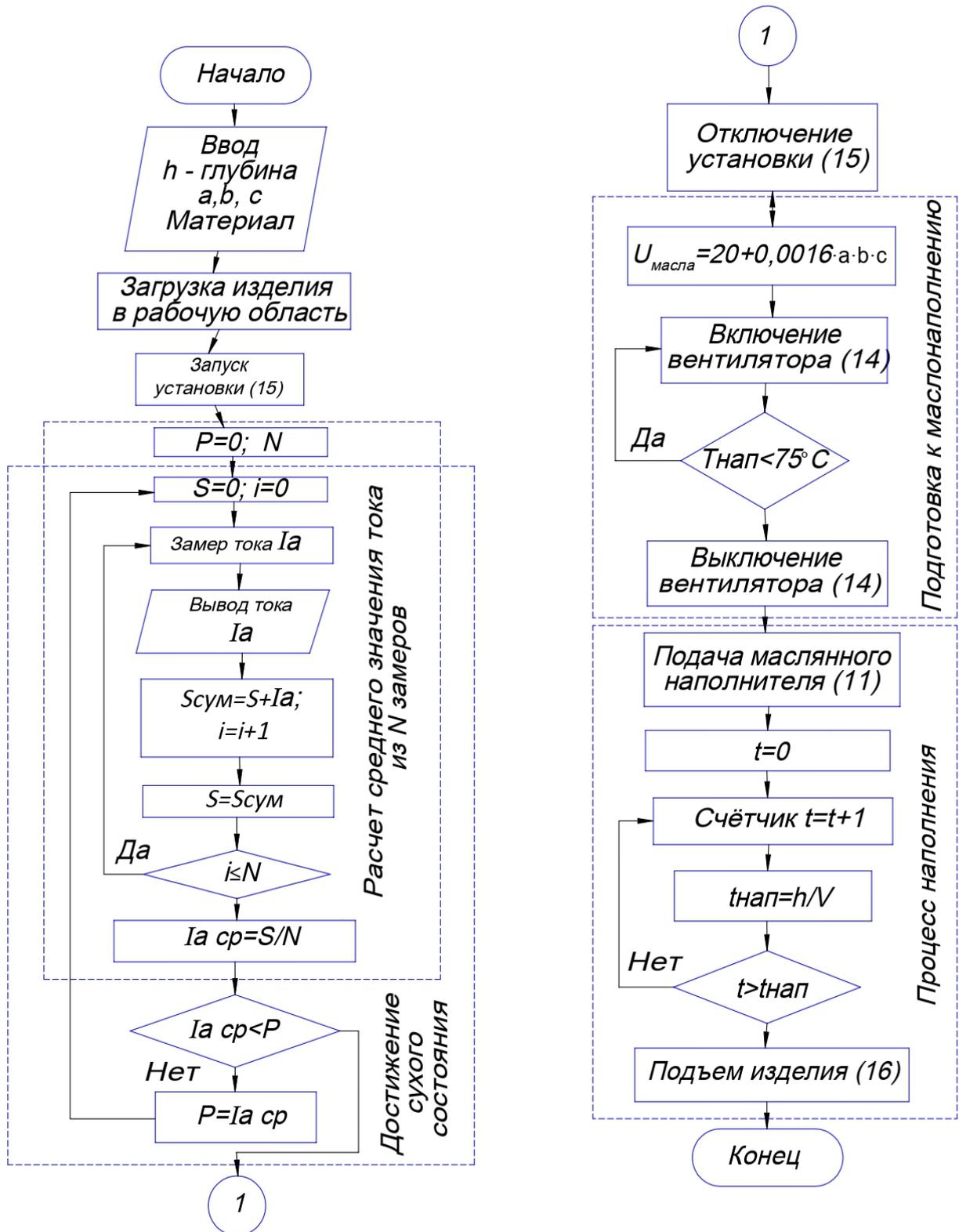


Рисунок 2 – Блок–схема алгоритма выполнения технологического процесса маслonaполнения деталей из полиамида марки ПА6

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Карта контрольной операции испытания образца-свидетеля

ГОСТ 3.1502 – 85										Форма 2		
Дубл.												
Взам.												
Подп.												
Контроль абразивного износа образца-свидетеля										1	1	
Разраб.	Бычковский В.С.			ИрГУПС			27.20.114У			АПП.10100.000		
Провер.	Филиппенко Н.Г.											
Н.контр.	Образец-свидетель, размерами Ø50x15 мм											
Наименование операции						Наименование, марка материала						М Д
Контроль разрушающий: определение абразивного износа						ПА6 ТУ 2224-001-78534599-2006						х.х.х.х
Наименование оборудования				T _о		T _в		Обозначение ИОТ				
Машина марки МПИ-1				580 с		х.х.х.х						
Р	Контролируемые параметры					Абразивный износ, V _i , мм ³ /м	Код средства измерения / средства испытания	Наименование средства измерения / средства испытания	Объем и ПК	T _о /T _в		
	G, г	G _i , г	ρ, г/см ³	L, м	F, Н							
O01	1. Выполнить притирку образца на испытательной машине до появления следов износа на все поверхности образца.										120 с	
T02	АБВ.ХХХХ.ХХ Шкурка шлифовальная ГОСТ 344 - 85											
O3	АБВ.ХХХХ.ХХ Прижим специальный											
P04	10											
O05	2. Очистить образец-свидетель волосяной щеткой от пыли и продуктов износа, срезать «бахрому» по его краям.										80 с	
T06	АБВ.ХХХХ.ХХ Щетка волосяная											
T07	АБВ.ХХХХ.ХХ Нож концевой											
O08	3. Определить параметры образца-свидетеля.										120 с	
T09	АБВ.ХХХХ.ХХ Весы аналитические (точность до 0,0001 г)											
P10	1,3841	1,12										
11	4. Выполнить испытание образца на испытательной машине с новой шкуркой.										60 с	
12	АБВ.ХХХХ.ХХ Шкурка шлифовальная ГОСТ 344 – 85, марки СК19ХW											
13	АБВ.ХХХХ.ХХ Прижим специальный											
14	345 10											
OK	Контроль разрушающий абразивный											

ГОСТ 3.1118 – 82										Форма 16		
Дубл.												
Взам.												
Подп.												
										2		
						27.20.114У			АПП.10100.000			
Образец-свидетель												
Р	Контролируемые параметры					Абразивный износ, V _i , мм ³ /м	Код средства измерения/средства испытания	Наименование средства измерения	Объем и ПК	T _о /T _в		
	G, г	G _i , г	ρ, г/см ³	L, м	F, Н							
O15	5. Очистить образец-свидетель волосяной щеткой.										80 с	
T16	АБВ.ХХХХ.ХХ Щетка волосяная											
O17	6. Определить абразивный износ образца-свидетеля.										120 с	
T18	АБВ.ХХХХ.ХХ Весы аналитические (точность до 0,0001 г)											
P19	1,3841	1,3489	1,12	345		0,091						
20												
21												
22												
23												
24												
25												
26												
27												
28												
29												
30												
31												
32												
OK	Контроль разрушающий абразивный											

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж**Копии актов внедрения результатов диссертационного исследования**

УТВЕРЖДАЮ
ИНН 382/049008
«АВИЛЕС»
Директор ООО «АВИЛЕС»
ОГРН 1153850039780
/Васильев Д.С.
«26» октябрь 2023 г.

АКТ**внедрения технологического процесса маслonaполнения для модернизации полиамидных втулок шарнирных соединений манипуляторов для нижнескладских работ**

Мы, нижеподписавшиеся, инженер по качеству Мишечкин А.В., начальник транспортного цеха Смолянинов А.В., составили настоящий акт в том, что в период с 15.09.2021 г. - 20.05.2022 г. сотрудниками ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ИрГУПС) в составе:

д.т.н., профессор, заведующий каф. АПП А.В. Лившиц,
к.т.н., доцент каф. АПП Н.Г. Филиппенко,
соискатель В.С. Бычковский,

выполнен комплекс работ, направленных на выполнение обработки готовых полиамидных втулок на приобретенном компанией «АВИЛЕС», а после доработанном специальном оборудовании на базе УЗП-2500А, необходимом для выполнения технологического процесса маслonaполнения.

В результате проведенной работы в ООО «АВИЛЕС» внедрена разработанная сотрудниками ИрГУПС технология, позволившая модернизировать готовые полиамидные втулки подшипника скольжения шарнирных соединений манипуляторов Palfinger Epsilon C70 L22, Palfinger Epsilon M100 L80, используемых для перевалочно-разделочных операций, производимых на нижних лесных складах при отгрузке готовой продукции на лесовозный автопоезд.

Благодаря внедренной технологии в компании «АВИЛЕС» были решены следующие задачи:

- выполнено импортозамещение подшипников скольжения, необходимых для проведения ремонта и технического обслуживания погрузочных манипуляторов;

- выполнено снижение повышенного износа полиамидных втулок и нарушения кинематической точности узлов сопряжения, работающих в условиях высоких контактных давлений, динамических и вибрационных нагрузок, режимах частого пуска и остановки оборудования, загрязненности абразивом, недостаточной смазки.

Все вышеперечисленные мероприятия позволили увеличить межремонтный период дорогостоящего нижнескладского оборудования.

Годовой экономический эффект от внедрения технологии маслonaполнения полиамидных втулок составляет 321 539 руб.

Инженер по качеству

 / Мишечкин А.В.

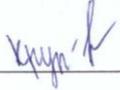
« 26 »  2023 г.

Начальник транспортного цеха

 / Смолянинов А.В.

« 26 »  2023 г.

Главный бухгалтер

 / Крупинская Е.А.

« 26 »  2023 г.





УТВЕРЖДАЮ

Ректор ФГБОУ ВО ИРГУПС

/Трофимов Ю.А.

« 10 » _____ 2023 г.

АКТ

о внедрении (использовании) результатов диссертационного
исследования в учебный процесс

Результаты диссертационного исследования по теме «Технологическое обеспечение повышения эксплуатационных характеристик полиамидных деталей, работающих в сложных условиях», выполненной в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ИРГУПС) на кафедре Автоматизация производственных процессов, внедрены в учебный процесс кафедры Автоматизация производственных процессов на основании заседания кафедры Автоматизация производственных процессов ФГБОУ ВО ИРГУПС, протокол № 1 от « 04 » сентября 2023 г.

Результаты диссертационного исследования включены в курсы дисциплин: «Технология производства изделий из композиционных материалов» специальности 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств (уровень бакалавриата) и «Технология обработки полимеров» специальности 23.05.03 Подвижной состав железных дорог (уровень специалитета).

Проректор по учебной работе

 /Динец Д.А.
« 24 » _____ 10 _____ 2023 г.

Заведующий кафедрой

Автоматизация производственных процессов

 /Лившиц А.В.
« 24 » _____ 10 _____ 2023 г.

Соискатель ученой степени

 /Бычковский В.С.
« 19 » _____ октябрь _____ 2023 г.