

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ТАМБОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*На правах рукописи*

*Воронин*

**Воронин Николай Владимирович**

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ  
МАГНИТО-ТЕРМИЧЕСКОГО АРМИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ  
ДЕТАЛЕЙ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ И УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ  
ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОСИСТЕМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

Специальность 4.3.1. –

Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса  
(технические науки)

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Родионов Юрий Викторович

Мичуринск-Наукоград, 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....  | 4  |
| ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....  | 10 |
| 1.1 Факторы, влияющие на эксплуатационные характеристики деталей машин и оборудования АПК.....   | 10 |
| 1.2 Полимерные материалы, используемые для изготовления деталей машин и оборудования АПК.....  | 16 |
| 1.3 Способы металлизации и упрочнения полимерных изделий.....  | 21 |
| Выводы по главе 1.....   | 36 |
| ГЛАВА 2 ТЕХНОЛОГИЯ МАГНИТО-ТЕРМИЧЕСКОГО ПОВЕРХНОСТНОГО АРМИРОВАНИЯ И РАСЧЕТ КОНТАКТНЫХ И ИЗГИБНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ АПК..... | 39 |
| 2.1 Описание технологии магнито-термического поверхностного армирования.....   | 39 |
| 2.2 Основные силы воздействия на ферромагнитную частицу в процессе магнито-термического армирования.....   | 42 |
| 2.3 Математическое моделирование процесса внедрения ферромагнитных частиц в поверхностный слой полимера.....                                       | 49 |
| 2.4 Моделирование контактных и изгибных напряжений на примере лопаток рабочего колеса и лопаток корпуса жидкостнокольцевого вакуумного насоса..... | 55 |
| Выводы по главе 2.....   | 71 |
| ГЛАВА 3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....   | 73 |
| 3.1 Программа экспериментальных исследований.....  | 73 |
| 3.2 Экспериментальное оборудование.....  | 74 |

|   |  |     |
|---|--|-----|
| 3.3   | Методика проведения экспериментов.....   | 82  |
| 3.4   | Выбор исходных материалов для исследований.....  | 84  |
| 3.5   | Проведение экспериментов и обработка полученных результатов.....                                     | 86  |
| ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОДБОР МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОБОРУДОВАНИЯ.....                      |  | 89  |
| 4.1   | Расчет значений сил, оказывающих воздействие на ферромагнитную частицу.....                          | 89  |
| 4.2   | Исследование градиентов теплового и магнитного полей.....  | 93  |
| 4.3   | Исследование характеристик полученных образцов.....  | 99  |
| 4.4   | Метрологическая оценка достоверности.....  | 112 |
|   | Выводы по главе 4.....   | 114 |
| ГЛАВА 5 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ МАГНИТО-ТЕРМИЧЕСКОГО ПОВЕРХНОСТНОГО АРМИРОВАНИЯ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ..... |  | 116 |
| 5.1   | Варианты установок магнито-термического армирования.....   | 116 |
| 5.2   | Оценка эффективности технологии магнито-термического поверхностного армирования и оборудования ..... | 118 |
| 5.3   | Практические рекомендации по использованию результатов работы.....                                   | 126 |
|   | Выводы по главе 5.....   | 126 |
|   | ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....  | 127 |
|   | БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....  | 129 |
|   | ПРИЛОЖЕНИЯ.....  | 145 |

## ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации различных машин и агрегатов их детали и узлы подвергаются влиянию множества факторов (атмосферные осадки, кислоты, влажность воздуха и многие другие), которые приводят к заметному износу и, как следствие, снижению надежности и работоспособности. Вместе с этим растёт степень применяемости полимерных материалов в различных узлах машин и агрегатов [1]. К примеру, лопасти рабочих колёс жидкостных насосов, уплотнители, лопасти воздуходувок во многих случаях изготавливаются из различного рода полимеров. Вместе с этим низкая поверхностная твёрдость и износостойкость зачастую переводят пластмассовые детали в разряд расходных, а замена некоторых изношенных деталей требует проведения длительной и дорогостоящей разборки и последующей сборки узлов, где эта деталь установлена [2].

В связи с этим одним из перспективных направлений в АПК является улучшение эксплуатационных характеристик деталей машин и оборудования из полимерных материалов различными методами – физическими, механическими, химико-электрическими и т.д. Также становятся актуальны комплексные исследования, направленные на разработку и совершенствование технологий упрочнения деталей из полимерных материалов, используемых в АПК, с целью улучшения их эксплуатационных параметров.

### **Степень разработанности темы.**

Вопросам, касающимся исследований характеристик полимерных материалов и композитов на их основе, изготовления деталей машин из них, а также восстановления изношенных деталей сельхозтехники, посвящены труды Баронина Г.С., Жачкина С.Ю., Ли Р.И., Завражнова А.И., Кирсанова Ф.А., Родионова Ю.В., Бузника В.М., Кербера М.Л., Столина А.М., Крыжановского В.К., Котина А.В., Кузнецова В.В., Величко С.А., Гончаровой Ю.А. и многих других отечественных ученых [3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13].

Полимерные материалы и композиты на их основе широко используются в АПК для изготовления различных деталей машин и механизмов – элементов насосного оборудования, уплотнителей и т.д. Помимо самих полимеров и композитов, широко применяются и металлизированные различными способами пластики. Однако вопрос все еще остается недостаточно проработанным, так как большинство таких способов либо имеют низкую технологичность, либо являются сложными в реализации или высокотоксичными.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-33-90298/20 «Разработка метода магнито-термического упрочнения полимеров ферромагнитными порошками различной дисперсности для деталей машин широкого спектра применения» на кафедре «Механика и инженерная графика» Тамбовского государственного технического университета (приложение А).

#### **Цель исследования.**

Повышение надежности лопаток рабочих колес и уплотнительных элементов гидросистем сельскохозяйственных машин, изготовленных из полимерных материалов, с помощью метода магнито-термического поверхностного армирования.

#### **Задачи исследования:**

- оценить актуальность технологий упрочнения и металлизации полимерных деталей, используемых в АПК;
- разработать математическую модель процесса магнито-термического поверхностного армирования, а также методику расчета действующих на лопатку жидкостно-кольцевого вакуумного насоса сил;
- провести сравнительный анализ свойств различных ферромагнитных материалов и полимеров для реализации процесса магнито-термического армирования, а также установления теоретических границ их применимости;

- провести экспериментальные исследования физико-механических характеристик армированных образцов и проверку корреляции теоретического анализа с полученными результатами;

- определить технологические параметры получения армированного слоя поверхности полимерной детали, полученного методом магнито-термического армирования, а также определить соответствующее оборудование и оптимальные режимные параметры технологического процесса армирования полимерных деталей АПК;

- провести оценку технико-экономической эффективности применения технологии и внедрения в производство.

#### **Научная новизна результатов исследования:**

- технология и режимы магнито-термического армирования для улучшения эксплуатационных характеристик полимерных лопаток рабочих колес и уплотнительных элементов гидросистем сельскохозяйственных машин;

- математическая модель, описывающая процесс внедрения ферромагнитных частиц в поверхность полимерных деталей;

- исследование влияния характеристик полимеров, армирующего материала и параметров технологического процесса армирования полимерных лопаток рабочих колес и уплотнительных элементов гидросистем сельскохозяйственных машин на структуру и свойство получаемого армированного слоя;

- исследование прочностных характеристик армированных деталей;

- проработка различных вариантов реализации технологии магнито-термического поверхностного армирования поверхности лопаток рабочих колес и уплотнительных элементов гидросистем сельскохозяйственных машин из термопластов и реактопластов.

#### **Теоретическая значимость работы.**

Теоретическая значимость работы заключается в:

- обосновании повышения механических свойств поверхности полимерных лопаток рабочих колес и уплотнительных элементов гидросистем сельскохозяйственных машин после магнито-термического армирования;
- разработке установки, реализующей процесс магнито-термического поверхностного армирования полимерных лопаток рабочих колес и уплотнительных элементов гидросистем сельскохозяйственных машин;
- использовании результатов исследований в реальных условиях эксплуатации насосного оборудования АПК.

**Практическая значимость** заключается в разработке технологии магнито-термического поверхностного армирования лопаток рабочих колес и уплотнительных элементов гидросистем сельскохозяйственных машин, изготовленных из полимерных материалов, частицами ферромагнетиков различной дисперсности и проработке технологической оснастки для использования данной технологии, а также повышении ключевых критериев надежности армируемых деталей.

**Объект исследования.** Технология магнито-термического поверхностного армирования; образцы и детали, армированные магнито-термическим способом; установка для магнито-термического поверхностного армирования.

**Предмет исследования.** Механические свойства деталей, армированных магнито-термическим методом; влияние армирующих элементов, конструктивных и технологических параметров установки магнито-термического поверхностного армирования на механические свойства армирующих покрытий полимерных деталей.

**Методология и методы исследования.** Методологическая, теоретическая и эмпирическая базы исследований представлены теоретическими исследованиями на основе математического моделирования, теории прочности и долговечности полимерных материалов, экспериментальными исследованиями деформационно-прочностных, триботехнических свойств армированных полимерных деталей.

**Положения, выносимые на защиту:**

- теоретические предпосылки повышения механических характеристик поверхности полимерных деталей лопаток рабочих колес и уплотнительных элементов гидросистем сельскохозяйственных машин при использовании технологии магнито-термического поверхностного армирования;
- результаты экспериментальных исследований влияния технологических факторов на структуру и свойства армированного поверхностного слоя полимеров;
- технология магнито-термического поверхностного армирования полимерных деталей насосного оборудования АПК и оценка ее технико-экономической эффективности.

**Степень достоверности и апробация результатов исследования** подтверждается использованием современных методик и оборудования, достаточным количеством экспериментов, соответствием экспериментальных данных теоретическим исследованиям, публикацией результатов в журналах, изучением работ других авторов.

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на конференциях (приложение Б):

XI Национальная научно-техническая конференция (г. Москва, 2021); XIV межвузовская научная студенческая конференция «Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития» (г. Тамбов, 2019); II Международная научно-практическая конференция "Цифровизация агропромышленного комплекса" (г. Тамбов, 2020); X Международный промышленный форум «Инженеры будущего – 2022» (в рамках XII Национальной научно-технической конференции); заседания кафедры «Механика и инженерная графика» (г. Тамбов, 2018-2023).

**Личный вклад автора.** Выбор темы работы обусловлен наблюдающейся в последние годы тенденцией к оптимизации и снижению металлоемкости производства, в связи с чем расширяется использование полимерных материалов. В данной работе автором выполнены теоретические и



экспериментальные исследования – литературный обзор, создание математической модели, проведение экспериментов по нанесению металлического покрытия и проверке характеристик металлизированных изделий, а также анализ результатов исследований и разработка рекомендаций по внедрению разработанной технологии.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 4.3.1. – Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки), пункты 6, 20 и 21.

**Публикации.** По результатам выполненной работы опубликовано 22 печатных работы, в том числе 3 публикации, включенные в систему цитирования Scopus/Web of Science, 6 публикаций в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК Министерства науки и высшего образования, и 3 патента на изобретение и полезные модели РФ. Общий объем публикаций составляет 15,94 п.л., автору принадлежит 9,45 п.л.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 161 странице машинописного текста, содержит 43 рисунка, 6 таблиц, 132 литературных источников. Приложения включают 15 наименований и представлены на 15 страницах.

## ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В рамках литературного обзора определено современное состояние научных исследований в области технологий и оборудования для переработки и поверхностной металлизации деталей машин и оборудования АПК из полимерного материала. Сделаны основные выводы об актуальности проводимых исследований и определены направления работы.

### 1.1 Факторы, влияющие на надёжность деталей машин и оборудования АПК.

В любой отрасли промышленности, в том числе АПК, работает очень много деталей, работающих на трение и контактные напряжения – например, лопатки рабочих колес насосов, уплотнения, и т.д. [6,14,15].

При этом на эксплуатационные характеристики деталей вне зависимости от материала изготовления влияет ряд факторов:

- форма и габаритные размеры детали;
- различные виды механизмов разрушения детали;
- состояние поверхностного слоя материала детали;
- возникновение и развитие разрушения из-за процессов, происходящих в поверхностном слое детали.

Надёжность является основным критерием, который необходимо учитывать для создания максимально качественных конструкций машин и механизмов при рациональном использовании материала [16,17,18,19].

Согласно [20,21] надёжность – комплексная характеристика, описывающая способность изделия выполнять заданные функции, сохраняя рабочие показатели в заданных пределах в течение определённого времени, в частности и способность изделия сопротивляться хрупкому разрушению при

возникновении ударных нагрузок, что важно, например, для крыльчатки насосов.

Появлению хрупкого разрушения изделия способствует, как правило, работа в условиях низких температур, наличие поверхностных трещин и повышенных остаточных напряжений. Также его появлению способствует развитие коррозии и усталостных процессов.

Работоспособность изделия определяют следующие критерии [22,23]:

- прочность;
- жесткость;
- износостойкость;
- теплостойкость;
- коррозионностойкость;
- вибростойкость;
- кавитационная стойкость.
- температурные пороги хладноломкости;
- трещиностойкость;
- ударная вязкость;
- пластичность;
- живучесть.

Другой составляющей надежности является долговечность [24].

Долговечность зависит от условий работы, а именно – факторов, вызывающих медленное разрушение и не влекущих за собой аварийных отказов (усталости материала детали, процессов износа, коррозии и других факторов).

Критериями долговечности являются износостойкость, контактная и усталостная прочность, сопротивление коррозии.

Помимо этого, некоторые детали, в частности рабочие колеса насосов разрушаются под действием кавитации, равно как и другие детали, работающие в гидродинамических системах. Также разрушение деталей вследствие

кавитации происходит и на водном транспорте – от маленьких лодок и гидроциклов до подводных лодок, танкеров и военных кораблей.

Сама по себе кавитация - гидродинамическое явление, возникающее в насосном оборудовании центробежного типа. Начало кавитации определяется физическими свойствами перекачиваемой жидкости. Так, когда давление становится равным, либо меньшим давления насыщенного пара, в потоке образуются заполненные паром и растворёнными газами полости.

Выделяют 3 стадии кавитации:

- 1) Начальная (область кавитации еще отсутствует);
- 2) Развитая (появляются гравитационные пустоты, или каверны);
- 3) Суперкавитация (обтекаемый элемент полностью располагается в области гравитационной каверны).

С точки зрения физики кавитацию можно объяснить неизбежным растворением в любой жидкости определенного объема газа.

Гидродинамические характеристики рабочих органов насосного аппарата также могут обуславливать кавитацию. Так, например, отклонение линий тока от стандартных траекторий вызывает увеличение частоты вращения или сжатия потока. При этом данное явление возникает не только на движущихся, но и на неподвижных зонах проточной части оборудования. Кавитация находится на втором месте среди самых частых причин поломки оборудования (первое место занимает неправильная центровка вала) [25,26].

Принимая во внимание особенность конструкции гидравлических насосов, более подробно причину кавитации можно объяснить следующим образом. В их конструкции выделяются стороны всасывания и нагнетания рабочей среды. При падении давления на первой из них до давления насыщения паров (может быть значительно меньше атмосферного), в жидкости образуются заполненные газом полости. Иными словами, жидкость начинает «кипеть». При этом количество возникающий полостей находится в обратно пропорциональной зависимости от показателя давления.

После этого жидкость поступает в зону нагнетания, где давление уже превышает атмосферное, что приводит к «схлопыванию» пузырьков с образованием ударной волны, давление от которой зачастую превышает 10 тысяч атмосфер. При этом кинетическая энергия частиц трансформируется в энергию упругой деформации. Поскольку при проектировании насосные агрегаты не рассчитываются на такую нагрузку, неизбежно возникают повреждения лопаток, непосредственно контактирующих с жидкостями (рисунок 1).



Рисунок 1. Поврежденная из-за кавитации крыльчатка насоса

В насосных устройствах кавитация недопустима даже в небольших масштабах, поскольку её разрушительное действие оказывает значительное влияние на исправность работы. Схлопывание образованных при кавитации пустот вызывает шум или характерное потрескивание на входе в рабочее колесо и вибрациям, при определённых режимах совпадающих с собственными частотами резонанса деталей насосов и вызывающих их быстрое разрушение. Причём с увеличением габаритных размеров насоса эти показатели также будут увеличиваться.

В зависимости от коэффициента быстроходности (КБ) конкретного насоса его характеристики будут снижаться по-разному: в случае высокого КБ снижение будет постепенным, низкого – резким. Полное занятие кавитационной областью сечения канала вызывает прекращение подачи насоса [25,26].

Продолжительная работа насосов в кавитационных условиях вызывает так называемый питтинг, то есть точечные разрушения поверхностных слоёв материала, из которого изготовлены детали насосного оборудования. Причём это явление может происходить уже на начальных этапах кавитации.

Различают разрушение кавитацией от коррозионного и эрозийного воздействия. Так, коррозия это химическое или электролитическое воздействия рабочей среды на материал - металл, из которого, как правило, изготавливается насос. В тоже время эрозия является отрывом металлических частиц другими твердыми веществами, которые находятся в перекачиваемой жидкости (песок и т.д.).

Явление кавитации в насосном оборудовании необходимо предупреждать. Для этого разработаны различные методики, основой которых являются технические и конструкционные решения, базирующиеся на данных эмпирических формул расчета. Они базируются на предположениях, что вероятность возникновения кавитации уменьшается при увеличении высоты подпора, поскольку снижение высоты всасывания приводит к возрастанию давления на поверхности жидкой среды. Для каждого агрегата вводится свой кавитационный запас, а плотность жидкости увеличивает вероятность появления кавитации. Однако стоит отметить, что при всех своих отрицательных характеристиках явление кавитации используют, к примеру, в теплогенераторах различной конструкции, применяемых для обогрева промышленных помещений. Также вопросам исследования положительных аспектов кавитации посвящены работы Промтова М.А. [27-30].

В настоящее время для производства деталей широкого спектра бытового назначения и различного сельскохозяйственного оборудования применяется широкая номенклатура технологических материалов, от различных металлов и их сплавов до полимеров и композитов на их основе. Однако до сих пор не было получено материалов, которые были бы абсолютно стойки к кавитационному эффекту. Так или иначе происходит разрушение детали, работающей в условиях кавитации, различие состоит только в длительности их сопротивления кавитационным явлениям [31,32,33,34,35]. Широкое распространение при изготовлении рабочих колёс гидравлических насосов получила бронза. Она является более стойкой к кавитации, поскольку обладает не только механической прочностью, но и химической устойчивостью. С целью изготовления рабочих колёс не рекомендуется использовать углеродистую сталь и чугун, поскольку они подвержены кавитационному разрушению достаточно сильно (так у чугуна разрушение происходит за счет быстрого удаления включений графита в его составе). Использование кавитационностойких материалов обеспечивает непродолжительную работу, в частности насосного устройства при частичной кавитации.

Для уменьшения физических последствий явления кавитации, производителями применяются закалка наиболее уязвимых элементов насоса, а также различные твёрдые напыления. Но следует отметить, что данные способы применяются достаточно редко ввиду низкой эффективности и дороговизны, что является нецелесообразным с учетом количества производимого насосного оборудования. По данным за 2021 и 2022 год, объем производства насосов различного назначения превысил 600 тысяч единиц, средний ресурс – не менее 10000 часов, но при использовании различных низкоэффективных и дорогих технологий обработки деталей стоимость оборудования и запасных частей неизбежно повысится, что приведет к снижению спроса, даже несмотря на увеличенный на 15-20 процентов срок службы. Стоит отметить, что это относится не только к насосам, но и вообще к любой технике, в том числе и применяемой в агропромышленном комплексе.

## 1.2 Полимерные материалы, используемые для изготовления деталей машин и оборудования АПК

Агропромышленный комплекс является одним из крупнейших потребителей полимерных материалов. Их применение в этой отрасли промышленности обуславливает значительный технико-экономический эффект.

Одной из главных целей применения полимерных материалов в АПК является снижение металлоемкости и удешевление продукции. Вместе с этим улучшаются и другие важные технико-экономические характеристики машин и оборудования: снижается масса, повышается надежность и т.д. [33]. Еще одним положительным моментом во внедрении полимеров можно назвать увеличение доступных ресурсов металла, а при уменьшении количества отходов при переработке значительно повышается коэффициент использования материалов: к примеру, данный коэффициент у полимеров в среднем вдвое выше, чем у металлов.

Полимерные материалы, используемые для изготовления деталей сельскохозяйственных машин и оборудования, имеют следующие основные преимущества:

- высокое отношение прочности к плотности, что важно с точки зрения транспортировки;
- износостойкость;
- химическая инертность, позволяющая использовать полимеры для работы в контакте с различными агрессивными веществами, такими как кислоты, щелочи и т.д.;
- полимеры обладают высокими диэлектрическими свойствами;
- возможность управления свойствами полимера в широких пределах благодаря их модификации, т.е. можно получить материал с широким комплексом свойств или же наоборот, узкоспециализированным [36,37,38].



Однако полимерные материалы имеют и достаточно серьезные недостатки, к которым можно отнести:

- высокая склонность к деструкции из-за старения и воздействия некоторых внешних факторов, что приводит к необратимому (в некоторых случаях – обратимому) структурному разрушению под воздействием неблагоприятных параметров внешней среды при переработке, эксплуатации или хранении [39,40,42];

- ползучесть (деформация под нагрузкой при постоянной температуре);

- прочностные характеристики полимеров зависят от режимов нагружения (время, температура, давление и т.д.) [41];

- сравнительно низкая теплостойкость;

- относительно высокий температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) [43];

- помимо теплового расширения, полимеры могут расширяться под воздействием влаги или агрессивных сред [44-47].

Из полимерных материалов изготавливают широкий спектр деталей и технологической оснастки сельскохозяйственной техники, и выбор конкретного полимера зависит от назначения конечного изделия. Необходимо отметить, что наиболее распространенным классом полимеров являются термопласты (в свою очередь, реактопласты занимают всего 15% от общей доли не только российского, но и общемирового рынка полимеров) [48,49].

По данным статистики, за 2019-2022 год в нашей стране объем рынка полимерных материалов составляет более 6,8 млн. тонн. Основу подавляющего количества производимых в России реактопластов составляет фенолформальдегидная или эпоксидная смола. Её количество на рынке равняется примерно 1 млн. тонн. На импорт уходит примерно 1,35 млн. тонн полимеров, вывозится за рубеж более 320 тыс. тонн.

В России и в мире первое место по распространённости и объёмам производства (более 2 млн. тонн.) занимает полиэтилен (ПЭ), а также его производные высоко- и сверхвысокомолекулярный полиэтилен (ВМПЭ и

СВМПЭ). Отличительной особенностью полиэтилена является высокая химическая стойкость. Это свойство позволяет использовать изделия из этого материала в различных агрессивных средах. Лидерами производства полиэтиленов в нашей стране являются «ЗапСибНефтехим», «Казаньоргсинтез», «НижнекамскНефтехим», и «Газпром Нефтехим Салават».

Второе место среди самых распространённых полимеров занимает полипропилен (ПП). В Российской Федерации суммарные объёмы его производства составляют приблизительно 1,35 млн. тонн. Химическая стойкость полипропилена несколько меньше в сравнении с полиэтиленом. Наиболее крупными производителями полиэтилена в России являются «Тобольск-полимер», «Ставролен», «Полиом».

Такие материалы как полистирол (ПС), поливинилхлорид (ПВХ) и полиэтилентерефталат (ПЭТФ) располагаются на третьем месте по распространённости. Суммарный объём производства этих трёх видов полимеров составляет 2 млн. тонн, почти половину которого занимает ПВХ (860 тыс. тонн). Далее следуют ПЭТФ плёночного и волоконного назначения (630 тыс. тонн) и полистирол вкупе с АБС-пластиком (500 тыс. тонн). Наиболее известные производители - «Нижнекамскнефтехим» (ПС), «Сибур-Химпром» (ПС), «Русвинил» (ПВХ), «Сибур-ПЭТФ» (ПЭТФ) [48,49].

Как уже было упомянуто ранее, из полимерных материалов изготавливают широкий спектр различных изделий, используемых в АПК. К примеру, для транспортировки зерна применяются шнеки, на рабочую поверхность которых наносят покрытия из фторопласта-4, полиуретана и поликапролактама. Преимуществом таких покрытий в этом случае является сниженный коэффициент трения, что увеличивает производительность процесса транспортировки приблизительно на 25% и значительно уменьшает повреждение зерна.

В областях переработки рыбы, производства консервов, молочных продуктов и т.д. широко используют транспортерные ленты со звеньями из полиамидов либо полиэтилена, обладающих сравнительной легкостью и

высокой коррозионной стойкостью. Подшипники для таких лент также изготавливают из полиамидов и фторопласта-4, а смазываться они могут водой, что сохраняет неизменными органолептические характеристики пищевой продукции. В случае работы с агрессивными пищевыми средами возможно использование аппаратуры из стеклопластиков, прошедших плакирование с использованием химически стойких термопластичных полимеров – винипласта, фторопластов, полиолефинов.

Детали машин и оборудования, применяемые в производстве молочных продуктов, консервов, а также в винодельческой и пивоваренной промышленности, изготавливают из так называемых «пищевых» видов резины или пластика.

Для различных сушилок, пастеризаторов и других аппаратов, где пищевые жидкости стерилизуются при температуре от 393 К и более, используют теплостойкие резины на кремнийорганической или бутадиен-нитрильной основе.

Также в АПК активно используются жидкостнокольцевые вакуумные насосы (ЖВН) для откачки различных газов или воздуха (рисунок 2). Также они активно используются, к примеру, в доильном и сушильном оборудовании. Вопросам использования и модификации ЖВН посвящены работы Родионова Ю.В., Зорина А.С., Никитина Д.В. и других ученых [50-54].

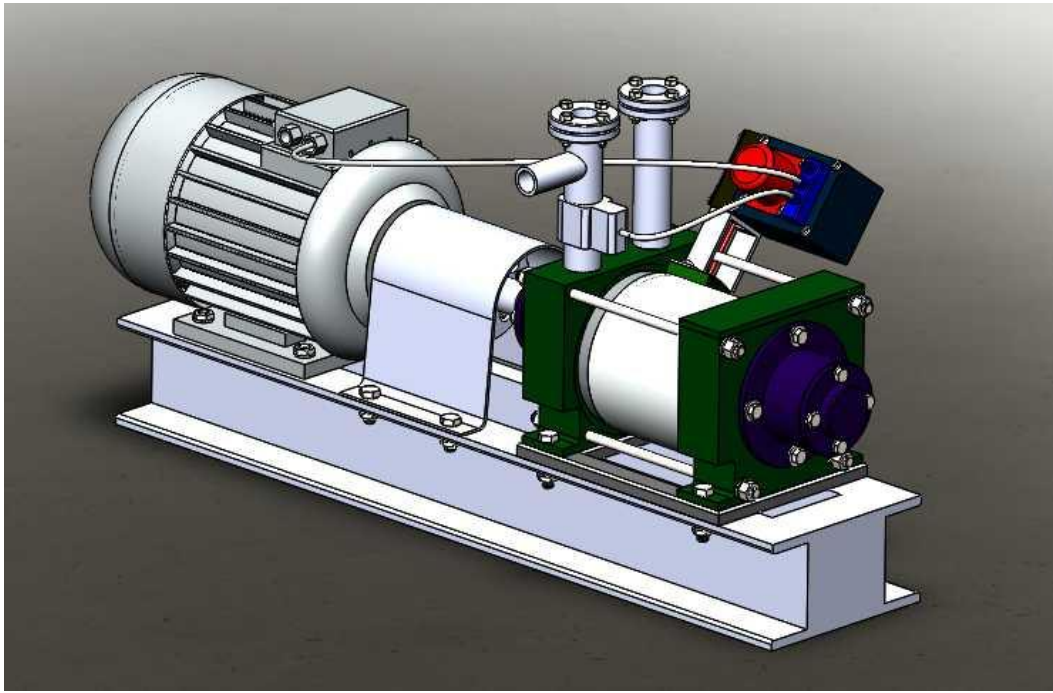


Рисунок 2. Трехмерная модель жидкостнокольцевого вакуумного насоса

Различные зубчатые и червячные колеса могут изготавливаться из полиамида, пентапластов, древесных пластиков. При создании подшипников качения применяют детали из поликарбоната и полиформальдегида. Для изготовления рабочих органов насосов, вентиляторов и гидромашин используют полиэтилен, поливинилхлорид, полипропилен, поликарбонаты, стеклопластики и т.д. Однако, несмотря на высокое соотношение прочности к плотности, полимеры по подавляющему большинству параметров уступают металлам, с связи с чем возникает вопрос об улучшении их эксплуатационных характеристик, в частности, поверхностной твердости и износостойкости. Данная задача может быть решена созданием на поверхности полимерного изделий металлического слоя, составляющего с ней монолитную структуру и обладающего твердостью и износостойкостью металла.

### 1.3 Способы металлизации и упрочнения полимерных изделий

Все способы металлизации условно делятся на три большие группы:

1) Механические. Это самые старые и наиболее простые способы металлизации. Необходимое покрытие (как правило, металлическая пластина) формируется заранее и затем соединяется с деталью. Первоначально таким образом покрывали изделия из дерева или другого металла, но с развитием технологий стало возможным покрывать и полимерные изделия [55].

Для получения с помощью механической металлизации изделий небольших размеров наиболее удобными являются такие виды, как обволакивание, огибание или заклепывание (рисунок 3, поз. 1-3). Дополнительно при использовании этих и других механических видов нанесения металлического покрытия возможно использовать переработанные (в том числе и многократно) пластмассы. Однако это не отменяет основного недостатка этих видов металлизации в виде большого количества расходуемого на само покрытие и на отходы металла. Еще одним несущественным недостатком является обязательная шлифовка и полировка готовых изделий для придания им приемлемого товарного вида.

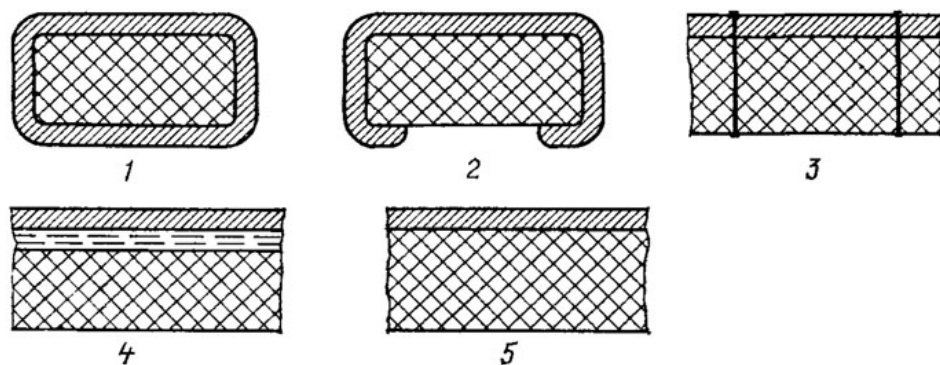


Рисунок 3. Механические способы крепления металлического покрытия к пластмассе: 1 - обволакивание, 2 - огибание, 3 - заклепывание, 4 - склеивание, 5 - горячее тиснение или заливка (сварка).

Одним из широко распространенных материалов, металлизированных механическим способом, можно назвать фольгированные пластики. Их получают наклеиванием, к примеру, медной фольги, толщиной 35-50 микрон на основу из асбо- либо стеклотекстолита или гетинакса. Изделия из таких материалов применяются для изготовления компонентов компьютерной техники, а также различных электрорадиотехнических устройств. На данный момент существует более 20 марок фольгированных слоистых пластиков. Отдельно можно выделить декоративные изделия, покрытые золотой фольгой толщиной до 100 нм. Однако в современном производстве относительно редко используется этот вид металлизации пластмасс, даже с учетом небольшого расхода золота – порядка 2-5 г/м<sup>2</sup>.

Еще один метод – тиснение (рисунок 3, позиция 5) – используют для нанесения декоративных тонких металлических пленок, получая таким образом плоские и объемные рисунки на бумаге, пленках из бумаги, пластмасс и других материалов.

Время получения покрытия – 2-5 секунд, сам процесс заключается в местном придавливании штампом металлизированной фольги при усилии 2-9 Мпа и температуре штампа 373-453 К. Также допускается прилипание слоя металла к размягченной поверхности пластмассы. Дополнительно фольгу могут покрыть грунтовочными лаками, что отражается в техническом паспорте изделия или характеристике самой фольги.

Известен также метод металлизации, основанный на прилипании металлических частиц к размягченному поверхностному слою пластмассы. Однако в этом случае покрытие получается рыхлым и матовым, вследствие чего данный метод широко не распространен. Если рыхлое покрытие все же необходимо, то нужный металлический порошок скрепляют с пластмассовым изделием с помощью клея.

Для малосерийного производства теплоизоляционных панелей, антенн и других изделий, где требуется высокая точность размеров криволинейной поверхности может быть использован метод металлизации с применением

гальваники [56,57]. Однако данный метод также не получил широкого распространения из-за некоторых ключевых недостатков:

- для получения такого покрытия необходимо большое количество времени;
- покрытие, предварительно нанесенное на пресс-форму, должно быть шероховатым, чтобы обеспечить прочное сцепление с пластмассовой заготовкой.

2) Физические (рисунок 4). В данном случае наносимый на поверхность металл переводят в пар или в жидкость, а после нанесения металл кристаллизуется и образует покрытие с необходимыми параметрами [55]. Такие способы сложнее механических, и для их реализации необходимо наличие специального оборудования. Исключение здесь составляют окунание и намазывание жидкого металла либо амальгамы. Однако на данный момент они практически не используются вследствие необходимости применения пластмасс, которые устойчивы к высоким температурам и хорошо смачиваются расплавом металла. Тем не менее часто именно этим способом получают покрытия на стекле, керамике и различных металлах.

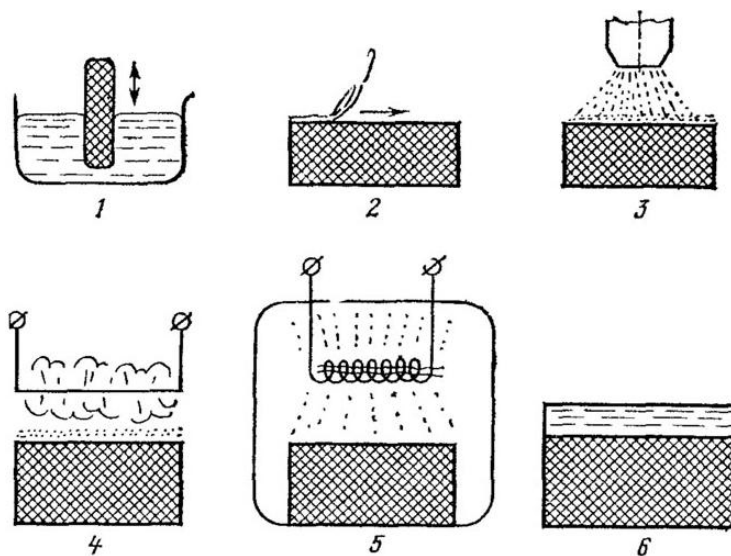


Рисунок 4. Физические способы нанесения металлических покрытий: 1 - окунание, 2 - намазывание, 3 - обрызгивание, 4 - взрывание, 5 - напыление (напаривание), 6 – окрашивание.

Также металлические покрытия на пластмассы и ткани наносят методом обрызгивания жидким металлом. Суть метода заключается в расплавлении пламенем газовой горелки либо электрической различных металлов (олова, алюминия и т.д.) и последующем разбрызгивании частиц жидкого металла (50-60 микрон) с оплавлением и прилипанием к покрываемой поверхности. Так получают шероховатые покрытия толщиной до 1000 микрон. Однако данный метод применяется в основном в декоративных целях либо для защиты деталей.

Одним из вариантов исполнения данного метода можно назвать металлизацию взрывом [58]. Ее суть заключается в пропускании электрического тока большой силы через металлическую проволоку, что приводит к взрыву металла из-за моментального нагрева до плавления. При этом металлизуемую деталь или поверхность помещают рядом с нагреваемой проволокой. Однако на сегодняшний день данный метод металлизации не применяется достаточно широко.

Самыми распространенными методами металлизации можно назвать объединяемые понятием «вакуумная металлизация» напыление и напаривание металла, происходящие, как правило, при давлении от 0,06 до 1 Па [59]. Применение такого вакуума позволяет увеличить свободный путь испарившихся из тигля или со спирали (изготавливаемых из графита, молибдена либо вольфрама) атомов. Дополнительным возможным эффектом является минимизация или же полное отсутствие соударений испарившихся атомов с другими молекулами. Катодное распыление (используется бомбардировка металла положительными ионами) также применяется при давлении до 1 Па.

Такие методы металлизации обладают двумя важными преимуществами:

- данные методы универсальны;
- безвредны по отношению к окружающей среде и персоналу;

Вместе с этим данные методы имеют и ряд недостатков:

- необходимость использования сложной аппаратуры;



- поверхность пластмассовой заготовки должна пройти специальную подготовку;
- после окончания процесса металлизации требуется покрыть деталь защитным лаком.

Толщина полученного таким образом слоя металла (как правило, алюминия) составляет 0,01-1 мкм с учетом того, что весь процесс имеет продолжительность от 10 до 30 секунд. Упрочняемая поверхность не приобретает свойства используемого металла, меняется лишь ее цвет.

Размер деталей, покрываемых с помощью вакуумной металлизации либо напыления, варьируется от нескольких миллиметров до 1 метра в длину. Помимо полимерных деталей, такими способами покрываются ткани и пленки, которые перематываются из одного рулона в другой непосредственно в вакуумном аппарате.

Специальные вакуумные установки с объемом рабочей камеры от 1 до 800 м<sup>3</sup> использовались в СССР для напыления или напаривания большого числа металлов – от относительно легкоплавкого алюминия до хрома, никеля и других. Только в Европе ежегодно более 25 тыс. т. пластмасс декорируют посредством вакуумной металлизации.

Сейчас происходит освоение технология толстослойной вакуумной металлизации, толщина упрочняемого слоя при которых доходит до 2 мкм. Для такого процесса применяются твёрдые хром и никель, а поверхности после такой операции можно не обрабатывать защитным лаком. Однако в качестве заготовок можно использовать только выдерживающие высокие температуры (423-473 К) пластмассы. Также стоит отметить, что нанесение покрытия таким способом весьма затратно с финансовой точки зрения, что ограничивает его применение.

Один из самых частых случаев использования вакуумной металлизации – изготовление декоративных изделий (пуговиц, сувениров, рефлекторов вспышек и т.д.), где нет необходимости в большой прочности. Также этот способ металлизации широко применяется:

- в радиоэлектронике для создания различных частей микромодулей или других ответственных мелких изделий;

- нанесения металла как на большие зеркала и отражатели телескопов, так и для изготовления бытовых зеркал (здесь полимеры применяются при создании небьющихся зеркал).

Тем не менее долговечность таких изделий весьма низкая, так как они, вследствие низкого значения твердости, быстро покрываются царапинами.

Еще одним физическим способом металлизации можно назвать окрашивание с помощью металлических красок, имеющих в своем составе ультрадисперсные частицы различных металлов (толщина частиц варьируется от 0,1 до 2 мкм, диаметр – до 100 мкм), выступающие в роли пигмента [60]. Такими красками покрывают, к примеру, радиаторы отопления, вагоны-рефрижераторы, бумагу и т.д.

Данный метод прост и удобен, однако он не дает никакого улучшения поверхностных прочностных характеристик изделий, но в ряде случаев его применение более рационально, чем использование вакуумной металлизации. Дополнительно порошки можно применять как базу для различных электропроводящих клеев, используемых для создания токопроводящих дорожек на микросхемах, при соединении деталей либо при восстановлении нитей накаливания (системы обогрева автомобильных стекол) [60,61].

Помимо всего прочего, при использовании физической металлизации также предполагается преобразование в металлические покрытия и сопутствующие отходы порошков, получаемых из руд этих металлов либо сплавов на их основе. Однако это требует дополнительных энергозатрат, что несущественно в рамках одного производственного процесса, но при суммировании приводит к высоким энергопотерям. Поэтому более предпочтительна химическая металлизация, позволяющая уменьшить потери металла и энергии при получении металлического покрытия.

3) Химические или химико-электролитические. Основой для применения и классификации данной группы методов металлизации являются различные

металлогенные реакции (рисунок 5). Химико-электролитические методы дополнительно характеризуются тем, что слой металла, получаемый химическим способом или с помощью гальваники, осаждается на предварительно образованный на поверхности изделия проводящий слой [55].

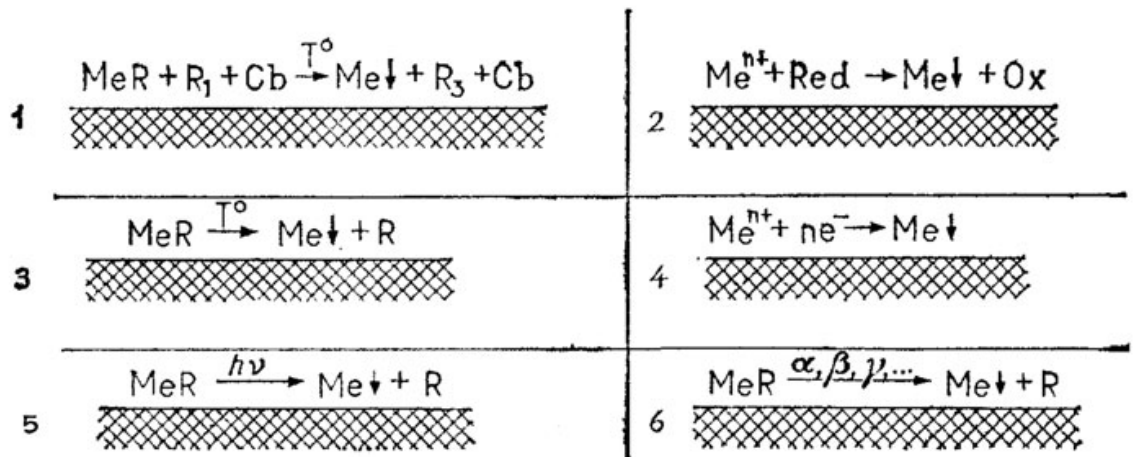


Рисунок 5. Химические способы получения металлических покрытий: 1 - вжигание, 2 - восстановление, 3 - разложение, 4 - электролиз, 5 - фотолиз, 6 – радиолиз

Одним из самых старых методов химической металлизации является вжигание. Как вариант, данный метод можно использовать для получения золотых или серебряных покрытий на стекле либо фарфоре.

Вначале проводится обжигание заготовок при температуре до 1300 К с предварительным нанесением на определенные места специальных составов, именуемых люстрами. Они имеют в своем составе легкоплавкие компоненты органического и неорганического происхождения, а также соль требуемого для металлизации металла. Органические составляющие выступают восстановителями, а неорганические образуют слой, прочно связанный с основой и имеющий металлический блеск. Одним из широко известных вариантов применения вжигания является получение токопроводящих слоев на керамической основе. Для металлизации полимерных изделий данный метод неприменим потому, что до сих пор не разработаны подходящие люстры.

Восстановление можно назвать еще одним методом получения металлических покрытий различного состава, так как для их получения можно использовать как газофазные, так и жидко- и твердофазные металлогенные реакции. Однако в случае применения данного метода аппаратура неизбежно загрязняется по причине образования металлического шлама, когда процесс протекает во всем объеме реакционной смеси, из-за чего металл покрывает не только нужные места на поверхности заготовки. Главным условием избежания этого является автокаталитический характер используемой металлогенной реакции.

Известна технология металлизации в газовой среде. Её используют в тех случаях, когда покрытие из желаемого металла невозможно получить другим способом. Металлогенная реакция в данном случае проходит при высокой температуре (несколько сотен кельвинов), а водород здесь выступает одним самых часто используемых восстановителей. С помощью газовой металлизации получают покрытия из довольно большого количества различных металлов. Однако для распределенного дозирования газовой смеси и ее нагрева требуется специальная аппаратура, что и ограничивает применение.

Помимо варианта, изложенного выше, также известно термическое разложение с использованием легкоразлагаемых карбониллов (железа, никеля и других металлов). При разложении высвобождается монооксид углерода CO (который затем повторно используется для получения карбониллов – никеля, железа, вольфрама и т.д.), а сам металл осаждается на поверхности покрываемого изделия. Применение такого варианта газовой металлизации, помимо удобства в производстве, позволяет свести к минимуму загрязнение окружающей среды и почти не требует дополнительных реактивов.

Также используется разложение (например, комплексного гидрида алюминия) в растворах для нанесения покрытий на диэлектрики и полимеры. Данный метод не получил широкого применения по причине неудобств работы с растворителями органического происхождения и низкой распространённости большого числа используемых для реализации метода веществ. В случае

водных растворов возможно применение гипофосфита натрия, формальдегида и других соединений в качестве восстановителей. Еще один известный способ – использование поверхности самих полимеров (по аналогии с иммерсионными способами) для осаждения, при этом одновременно происходят как травление, так и покрытие поверхности слоем металла.

Методы электрохимии или гальванотехники широко используют при осаждении металлов, получаемых с помощью электролиза их водных растворов либо расплавов солей. Из этих двух групп наиболее развитым и технически обеспеченным можно уверенно назвать гальванотехнические, так как на сегодняшний день существует большое количество основного и вспомогательного оборудования, а также различных реактивов и композиций, применяемых с целью корректировки состава электролитов и самого оборудования.

Тем не менее, гальванотехника имеет один существенный недостаток, заключающийся в том, что в случае металлизации диэлектриков их поверхность нуждается в специальной предварительной подготовке.

Помимо всех вышеперечисленных методов, металлизация путем разложения содержащих нужный металл соединений возможна также при использовании фотолиза, или разложения с помощью света. Таким способом получают медные золотые или серебряные покрытия, причем существует возможность наращивания слоя с помощью гальваники или электрохимии. Фотолиз используют главным образом в микроэлектронике.

Известен также радиолит, позволяющий получать металлические покрытия путем облучения  $\alpha$ - и  $\beta$ -частицами, быстрыми электронами либо  $\gamma$ -лучами. Данный метод активно используется в создании активных и пассивных элементов электротехники [62], а также позволяет покрыть металлом нужный участок с гораздо более высокой точностью (2-5 ангстрем), чем любой из вышеупомянутых методов. Дополнительно с помощью радиолита можно получать различные легированные пленки.

Фотолиз и радиолиз широкого распространения не получили и применяются в большинстве своём в случаях, когда другим способом воспользоваться невозможно. Это можно объяснить рядом серьёзных технологических недостатков, а именно:

- низкой производительностью;
- большими затратами энергии;
- сложной и дорогостоящей аппаратурой.

Также сюда можно добавить малую степень разработанности темы, но это применимо в большей степени к радиолизу.

Данное разделение методов металлизации является условным и недостаточно полным. К примеру, в группу химических методов выделены, как уже говорилось ранее, вжигание, разложение, восстановление, электролиз, фотолиз и радиолиз. Однако для последних трех методов более применим термин «физико-химические методы металлизации» из-за отсутствия активных физических воздействий при их реализации. Еще стоит упомянуть о том, что эти методы можно комбинировать. Ярким примером будет химико-гальваническая металлизация, при которой сначала химически осаждают электропроводящий слой, а затем электрохимически получают отделочное покрытие. Подбор нужной комбинации методов зависит от сложности оборудования, необходимой мощности и требуемых свойств готовых изделий.

Из всех трех групп наибольшее распространение получили три способа: напыление жидкого металла, вакуумное напыление и химико-электролитическая металлизация (ХЭМ). При использовании первого способа производят нанесение расплавленного металла с помощью сжатого воздуха, применяется весьма ограниченно по причине того, что нанесенный металл имеет слабое сцепление с поверхностью, конечная поверхность является весьма грубой и неравномерной.

Для нанесения тонких плёнок (0,1-1,0 мкм) слоёв металла весьма эффективным является способ вакуумной металлизации, при котором пары металла конденсируются на поверхности покрываемого изделия. Детали

обрабатываются насыпью в барабане. Однако, такие покрытия обладают плохой износоустойчивостью. Такой способ проигрывает ХЭМ, поскольку имеет больший расход материалов и электроэнергии [63-66].

При классической технологии ХЭМ, пластмассовые детали обрабатываются в растворах, благодаря чему химически получают токопроводящий слой, который после этого гальванически и/или химическим восстановлением металла затягивают до необходимой толщины. Благодаря ХЭМ можно получать широкий ассортимент различных по видам и толщинам покрытий. Этот способ металлизации не требует сложного оборудования. Покрытия получаются равномерные по толщине, при этом обеспечивается хорошее их сцепление с основой.

В качестве проводящего подслоя можно использовать различные средства, а не только осаждённые металлы. Например, сульфиды металлов, осаждённые из металлов проводящие порошки и т.д. Таким образом выделяется классическая технология ХЭМ, а также многообразные альтернативные ей технологии.

Гальванопокрытие можно нанести на практически любой диэлектрик. Однако при этом необходимо соблюдения ряда условий [55]:

- основа и наносимое покрытие должны иметь достаточно прочное сцепление;
- покрытие и диэлектрик должны обладать определёнными физико-механическими свойствами, обуславливающими их совместное применение;
- химические свойства диэлектрика должны позволять легко его обрабатывать в нужных растворах и оборудовании;
- процесс нанесения покрытий должен быть экономически эффективным, а материалы доступны.

При этом весьма ограниченная номенклатура диэлектриков в полной мере удовлетворяет этим требованиям. Поэтому в большинстве случаев для получения защитно-декоративных покрытий используют только специально изготовленные для этих целей модифицированные пластмассы.

Под металлизацию наибольшее применение получили АБС (ABS) пластики. Однако, при этом постоянно расширяется область применения полипропилена ПП (PP).

Стоит отметить полисульфон и поликарбонат в качестве пластиков, используемых для металлизации. Среди их преимуществ можно выделить высокую прочность сцепления, повышенную теплостойкость и ударную вязкость, из-за чего их обычно применяют для изготовления деталей специального назначения.

Полифениленоксид также используется для нанесения гальванических покрытий. Он отличается самым низким коэффициентом теплового расширения среди известных пластмасс, также обладает высокой термостойкостью и стойкостью к перепаду температур. Однако, применяется он только в особых случаях.

Известен полистирол, который по свойствам близок к АБС пластикам, однако широкого распространения не получил из-за недостаточного сцепления покрытия с основой. Применение полистирола возможно, но только в тех случаях, когда деталям не предъявляются высокие требования по термостойкости и механическим свойствам.

Покрытия могут наноситься для специальных целей на полиэтилен, полиэферы, полиацетали, полиамиды (в том числе нейлон), полиакрилаты, полиуретан, карболиты, эпоксидные компаунды, поливинилхлорид, фенолформальдегидные и эпоксидные стеклопластики, гетинакс.

При этом номенклатура диэлектрических материалов, применяемых для нанесения на них металлопокрытий, непрерывно расширяется. Также в роли покрытий могут выступать не только металлы в чистом виде, но и их соединения. Так, в работах Жачкина С.Ю. [67-69] рассмотрено нанесение покрытий из карбида титана методом газоплазменного напыления. Однако стоит отметить, что данный метод неприменим для металлизации полимерных изделий, так как находящийся в жидком состоянии металл расплавит полимер в процессе нанесения покрытия.



Помимо этого, в качестве покрытия активно выступают и сами полимеры. Такие покрытия используют для защиты металлических изделий от коррозии, придания им антифрикционных свойств и т.д. – например, в работах Ли Р.И. и Кирсанова Ф.А. [70-73] показано использование полимерных покрытий для восстановления подшипников и корпусных деталей автотракторной техники.

В настоящее время существует множество различных методов упрочнения полимеров, каждый из которых применяется в зависимости от поставленной задачи. В рамках данной работы предполагается рассмотреть самые распространённые методы упрочнения, не затрагивая узкоспециализированные.

1) Ориентационное упрочнение (ориентационная вытяжка). При использовании данного метода макромолекулы полимера ориентируются в направлении вытяжки. При этом температура, при которой производится процесс, выше, чем температуры стеклования используемого полимера. Упрочнение происходит также в направлении вытяжки и может быть, как одноосным, так и двухосным (для плёнок). При помощи данного метода производят высокопрочные полимерные волокна. В направлении ориентирования прочность повышается в 2...5 раз, модуль упругости до 2 раз (в случае одноосной ориентации). Однако, в направлении, перпендикулярном направлению вытяжки, прочность снижается на 30...50%, что является основным недостатком этого способа [74,75,81,86].

2) Экструзия. Несмотря на то, что в большинстве случаев под экструзией понимается именно метод формования полимеров, некоторые её вариации используются для улучшения механических характеристик [77,78,80].

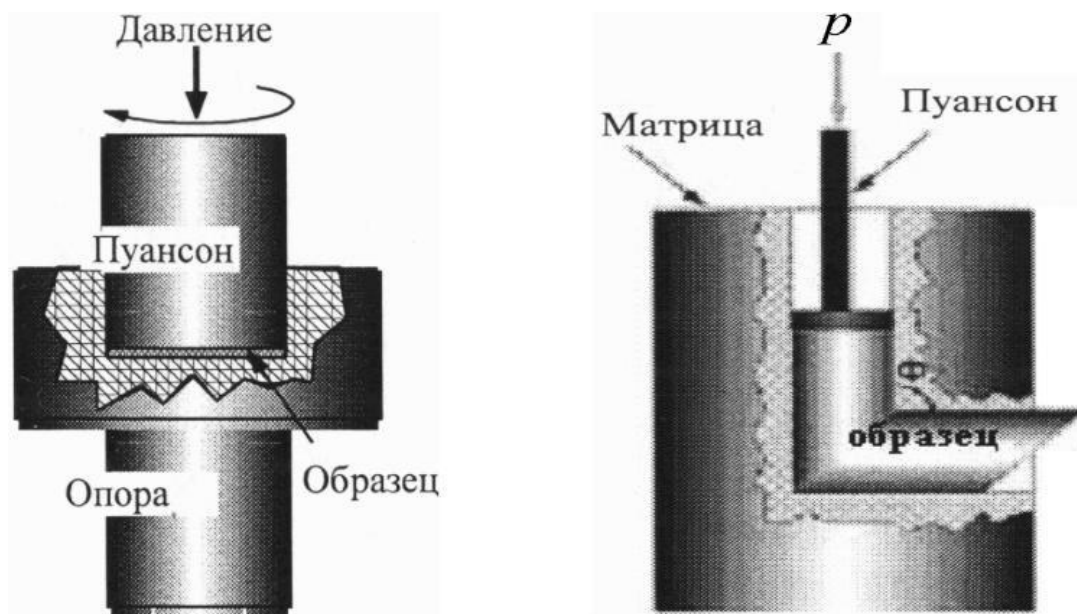


Рисунок 6. Общая схема метода РКУЭ

Одной из них является равноканальная угловая экструзия (РКУЭ). Основным недостатком экструзионных методов упрочнения (и, в частности РКУЭ) является наличие больших сил трения в рабочем канале (рисунок 6). Это приводит к значительному снижению производительности. Также отсутствует возможность изготовления полимерных изделий сложной формы. Исследователи научно-образовательного центра ТамБГТУ-ИСМАН «Твердофазные технологии» активно занимались изучением твердофазной вариации этого процесса [4,7,74-76,79,80].

3) Термическая обработка. В конструкционных изделиях полиэтилена низкого давления и полипропилена также возникают внутренние остаточные напряжения, для снижения которых обязательно применение термической обработки. В общем виде данный способ упрочнения ничем не отличается от аналогичного способа улучшения свойств металлов. Изделия из полимеров также подвергаются закалке, отжигу, нормализации и отпуску, только при выборе режима термической обработки полимерной детали необходимо учитывать температуру стеклования полимера. Недостатками этого способа являются:

- возможное усиление анизотропии свойств обработанного полимера;

- не все полимеры (например, полистирол) можно улучшить таким образом из-за токсичных выделений при нагреве [84-86].

4) Упрочнение полимеров высокодисперсными частицами. Используется для создания полимерных композиционных материалов (ПКМ). Один из самых популярных методов улучшения характеристик полимерных материалов. Для упрочнения полимера данным способом в основу (или матрицу) вводятся высокодисперсные частицы (наполнитель). Подбирая различные матрицы и наполнители, удаётся достигнуть лучших физико-механических характеристик, нежели у исходного полимера [78,81]. При этом процентное соотношение вещества матрицы и наполнителя находится в достаточно узком диапазоне, поскольку превышение критического значения снижает прочность композита, а слишком низкое может не дать никакого упрочняющего эффекта. Также, если размер частиц наполнителя будет больше критической величины увеличится вероятность появления крупных трещин при гораздо меньших нагрузках, чем при меньшем размере частиц. Однако, большинство ПКМ создаются именно таким способом [82,83,88]. В дополнение необходимо отметить работы Гончаровой Ю.А. в области полимерных композитов и 3D-печати, а также методов переработки полимеров [89,90,91].

Однако возможны случаи, когда нет необходимости в том, чтобы создавать новый ПКМ для конкретной цели, и достаточно нанести слой металла на поверхность полимерного изделия. Гальванические покрытия для этого не подходят из-за недостаточной стойкости к истиранию и токсичности производства. Поэтому в рамках настоящей работы был разработан новый метод магнито - термического упрочнения полимерных термопластичных материалов [92,93]. Сущность этой технологии состоит в сочетании воздействия на заготовку из полимерного материала теплового потока и мощного магнитного поля с внедрением диспергированного до нужной фракции металлического материала в поверхность (приложение В). При этом на поверхности упрочняемого изделия формируется поля из внедрённых частиц, что способствует приобретению заготовкой высокой поверхностной

твёрдости и износостойкости. Упрочнённые таким образом полимерные изделия могут использоваться в насосах, механических передачах и других механизмах транспортных машин и установок подобного назначения. Экономичность и широкая применимость (таким способом можно упрочнять практически все виды термопластичных полимеров) делают возможным использование данной технологии в агропромышленном комплексе. Следует отметить, что ранее исследования магнито-термических эффектов [94,95,96] использовались только для магнитной сепарации, исследования углеродных нанотрубок или построения моделей каких-либо процессов [97-99]. А для упрочнения полимерных материалов данное явление не использовалось [100,101].

На данном этапе использование этой технологии позволяет обрабатывать лишь небольшие поверхности деталей. При этом порошок для упрочнения должен быть изготовлен из ферромагнитного материала (сталь, никель и т.д.).

Также стоит отметить, что существуют теоретические предпосылки для создания метода упрочнения полимеров нуль - мерными наполнителями. При таком способе в необходимом месте заготовки (к примеру, около поверхности) создаётся повышенная концентрация частиц металла. В этом случае речь может вестись о своего рода «направленной ликвации», для отработки работоспособной технологии которой планируется проводить исследования.

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

Литературный обзор позволил выявить технический уровень разработки, основные тенденции в области оборудования и технологий, применяемых для получения деталей машин и оборудования АПК с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Установлено, что на сегодняшний день широко представлены полимерные материалы, технологии и оборудование для изготовления деталей машин и оборудования АПК, машиностроения и т.д. Тем не менее практически

отсутствуют оборудование и технологии поверхностного упрочнения полимерных деталей с относительно низкой металлоемкостью и сохранением стабильности поверхностных свойств (износостойкость, твердость и пр.) в течение длительного времени (как уже готовых деталей, так и находящихся на стадии производства), либо технологии и оборудование находятся на уровне лабораторных исследований.

В результате анализа выявленной проблемы сформулированы цель и задачи исследований.

#### **Цель исследования.**

Повышение надежности лопаток рабочих колес и уплотнительных элементов гидросистем сельскохозяйственных машин, изготовленных из полимерных материалов, с помощью метода магнито-термического поверхностного армирования.

#### **Задачи исследования:**

- оценить актуальность технологий упрочнения и металлизации полимерных деталей, используемых в АПК;
- разработать математическую модель процесса магнито-термического поверхностного армирования, а также методику расчета действующих на лопатку жидкостно-кольцевого вакуумного насоса сил;
- провести сравнительный анализ свойств различных ферромагнитных материалов и полимеров для реализации процесса магнито-термического армирования, а также установления теоретических границ их применимости;
- провести экспериментальные исследования физико-механических характеристик армированных образцов и проверку корреляции теоретического анализа с полученными результатами;
- определить технологические параметры получения армированного слоя поверхности полимерной детали, полученного методом магнито-термического армирования, а также определить соответствующее оборудование и оптимальные режимные параметры технологического процесса армирования полимерных деталей АПК;

- провести оценку технико-экономической эффективности применения технологии и внедрения в производство.

## ГЛАВА 2 ТЕХНОЛОГИЯ МАГНИТО-ТЕРМИЧЕСКОГО ПОВЕРХНОСТНОГО АРМИРОВАНИЯ И РАСЧЕТ КОНТАКТНЫХ И ИЗГИБНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ АПК

### 2.1 Описание технологии магнито-термического поверхностного армирования

Армирование поверхности детали из термопластичного полимера (полипропилена, полиэтилена и др.) производится с помощью металлизации порошком никеля или других ферромагнитных материалов (железо, кобальт либо сплавы на их основе). Схема процесса армирования изображена на рисунке 7.

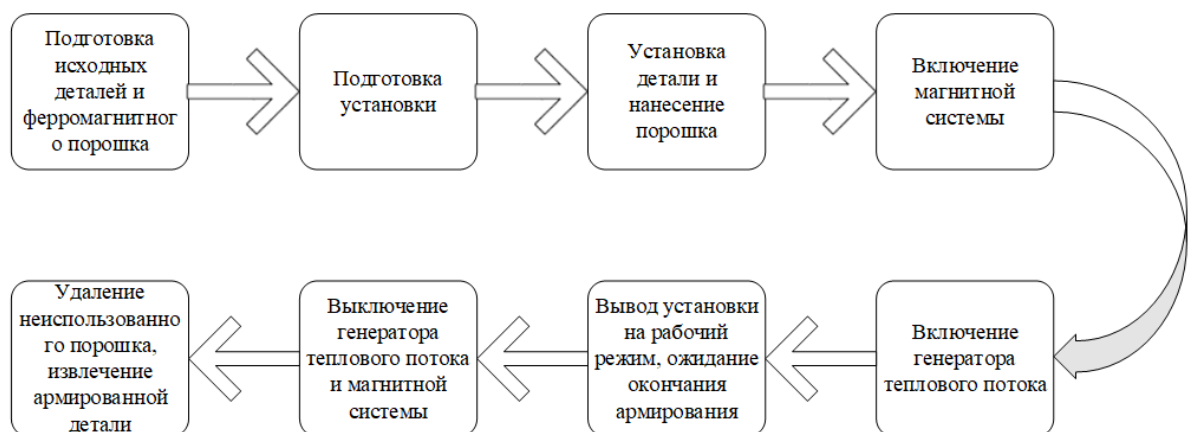


Рисунок 7. Схема процесса магнито-термического армирования

В основе разработанной технологии лежит совместное воздействие теплового и магнитного полей на обрабатываемую деталь и ультрадисперсный ферромагнитный порошок без применения специальных высоколетучих составов для улучшения сцепления частиц порошка с поверхностью детали. В изначальном варианте технологии [92] тепловой поток, создаваемый нагретым воздухом, расплавляет поверхностный слой полимерной детали, превращая его в высоковязкую жидкость, что облегчает внедрение частиц ферромагнитного порошка в поверхность при использовании магнитного поля. В результате

получается металлизированная деталь с более высокими значениями поверхностной твердости и износостойкости, что приводит к общему увеличению надежности и долговечности изделия. Полный процесс металлизации (от нанесения порошка на поверхность детали или формы до получения готового изделия) занимает не более 5 минут, что разработке соответствующего оборудования и технологического процесса позволяет наладить производство большого объема металлизированных деталей.

Примеры деталей, которые можно металлизировать по разработанной технологии, представлены на рисунке 8. Для более сложных по форме деталей необходима модернизация установки, а также дополнительные исследования.

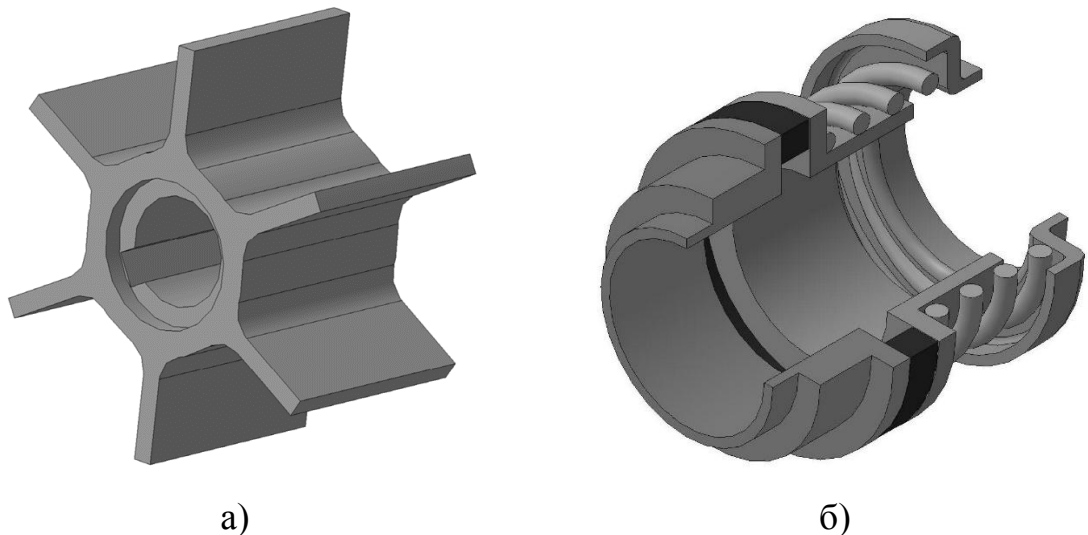


Рисунок 8. Детали, армируемые с помощью технологии магнито-термического армирования: а – лопасти сборной крыльчатки насоса малой мощности; б – дисковое уплотнение вала ЖВН (выделено черным цветом).

Металлизация проводится по следующей схеме: металлизуемая поверхность полимера размещается в горизонтальной плоскости, под ней устанавливается электромагнитная система. Затем на поверхность равномерно наносится ферромагнитный порошок методом ручного насыпания, затем включается электромагнитная система в режиме удержания (на минимальной мощности, т.е. напряжении и силе тока). Далее включается теплогенератор, и



после образования жидкофазного слоя необходимой толщины, электромагнитная система переводится в рабочий режим (или режим внедрения) путем повышения напряжения и силы тока. Уноса частиц при включенной магнитной системе не происходит, так как создаваемой магнитной силы достаточно, чтобы удерживать их в области армирования. По истечении технологического периода источник тепла выключается, электромагнитная система кратковременно включается в режим «дожатия» (значения напряжения и сила тока на 25-30% выше, чем в рабочем режиме), после чего поле отключается, полимерная деталь снимается с установки и удаляется излишек порошка. Вследствие высокой температуры плавления никеля (1726 К) исключается слипание частиц не внедренного порошка после эксперимента. Охлаждение армированной поверхности ведется до естественного конвективного теплоотвода от нагретого изделия в окружающую среду. Слипаяемость частиц никеля между собой отсутствует, вращения частицы также нет из-за действующего магнитного поля (а также из-за того, что частица внедряется в расплавленную поверхность полимера на очень малое расстояние с малой скоростью) [102].

Новизна данной технологии заключается в возможности армирования как уже готовых деталей, так и находящихся в процессе производства. Также с помощью данной технологии (при проведении дополнительных исследований) возможно восстановление изношенных полимерных деталей машин и оборудования. От ближайших аналогов (глава 1, раздел 1.3) магнито-термическое армирование отличается простотой реализации и отсутствием необходимости в подготовке каких-либо специальных составов для ускорения образования покрытия.

## 2.2 Основные силы воздействия на ферромагнитную частицу в процессе магнито-термического армирования

Для более полного понимания процесса магнито-термического армирования определяются и описываются основные силы, действующие на ферромагнитную частицу. Согласно описанию технологии, указанному в разделе 2.1, формирование расплава в поверхностном слое полимера происходит через несколько секунд после достижения нужной температуры в рабочей зоне установки. Это достигается не только за счет потока нагретого воздуха (прямого контакту нагретого воздуха с поверхностью полимера препятствует слой предварительно нанесенного ферромагнитного порошка), но и из-за того, что частица сама постепенно нагревается в процессе внедрения вследствие более высокой, чем полимер, теплопроводности. Какое-либо течение жидкости отсутствует, потому расплав в поверхностном слое полимерной детали, куда внедряются ферромагнитные частицы, представляется в виде высоковязкой ньютоновской жидкости. Силы сопротивления среды и вязкого трения нивелируют вращение частицы. Форма частицы также не имеет значения из-за изменения ее положения под действием магнитного поля, и в результате коэффициент сопротивления среды (в данном случае расплава) получается минимальным [102].

В составе сформированного поверхностного слоя армированной детали находятся полимерная матрица и внедренные в нее ферромагнитные частицы (порошок никеля, стали, кобальта или сплавов на их основе) в пределах нужной площади покрытия. На основании серии оценочно-сравнительных экспериментов установлено, что для обеспечения и сохранения более высоких поверхностных характеристик армированных деталей (твердость и износостойкость) необходимо, чтобы частицы ферромагнетика покрывали более 50% площади рабочей поверхности исходной детали при условии, что длина промежутка между армирующими частицами на поверхности детали составляет не менее половины диаметра частицы. Равномерность

распределения частиц на поверхности полимера задаётся их ориентацией по линиям магнитного поля и её возможно достичь, распределяя частицы вручную при «удерживающем» поле магнитной системы. Возникновению конгломератов дисперсных частиц препятствуют химические свойства и дисперсность никелевого порошка. Характеристики, относящиеся ко всему объёму детали (т.е. пределы прочности и текучести, температуростойкость, ударная вязкость и пр.), практически не изменяются [103,104].

Далее требуется обозначить четыре условия, два из которых - ключевые:

- начальное (первое ключевое): магнитное поле удерживает частицы на поверхности полимерной детали, однако теплопередача от нагретого воздуха к ферромагнитной частице и поверхности полимера как таковая отсутствует, т.е. необходимый размягченный/расплавленный поверхностный слой не начал формироваться (рисунок 9);

- промежуточное: теплопередача присутствует, поверхностный слой расплава сформирован, мощность магнитного поля увеличена для лучшего эффекта при внедрении частицы (рисунок 10);

- дополнительное: допускается, что нагретая ферромагнитная частица формирует дополнительный локальный объем расплавленного полимера и движется в нем, увеличивая объем жидкой фазы по мере приближения к более глубоким слоям термопластичного полимера;

- конечное (второе ключевое): теплопередача также присутствует, но закрепление ферромагнитной частицы в расплаве завершилось после прохождения необходимого расстояния, которое (для надежного закрепления в поверхностном слое) составляет 75% от диаметра частицы и более (рисунок 11).

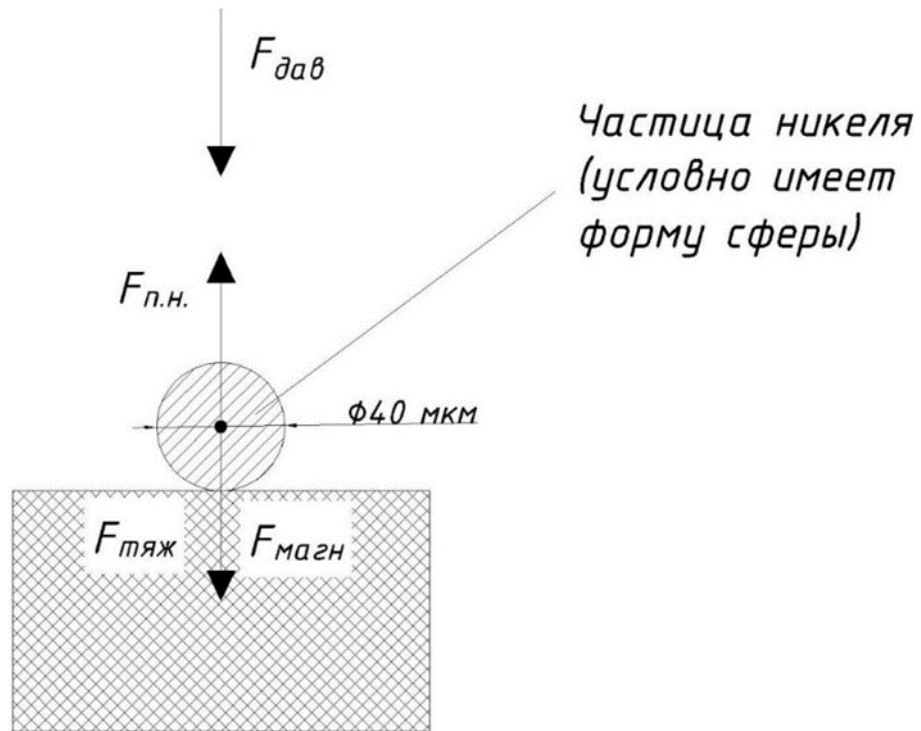


Рисунок 9. Схематическое изображение первого ключевого условия

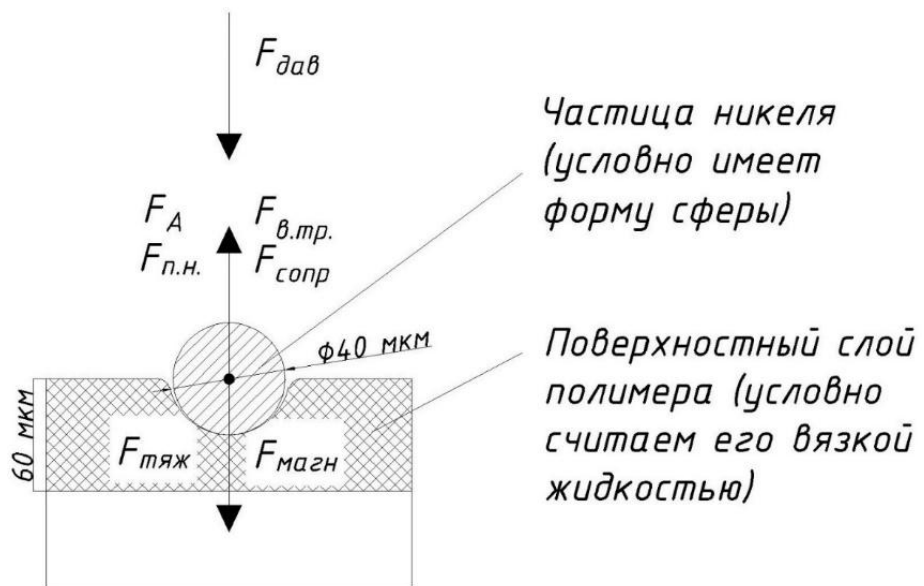


Рисунок 10. Схематическое изображение промежуточного условия

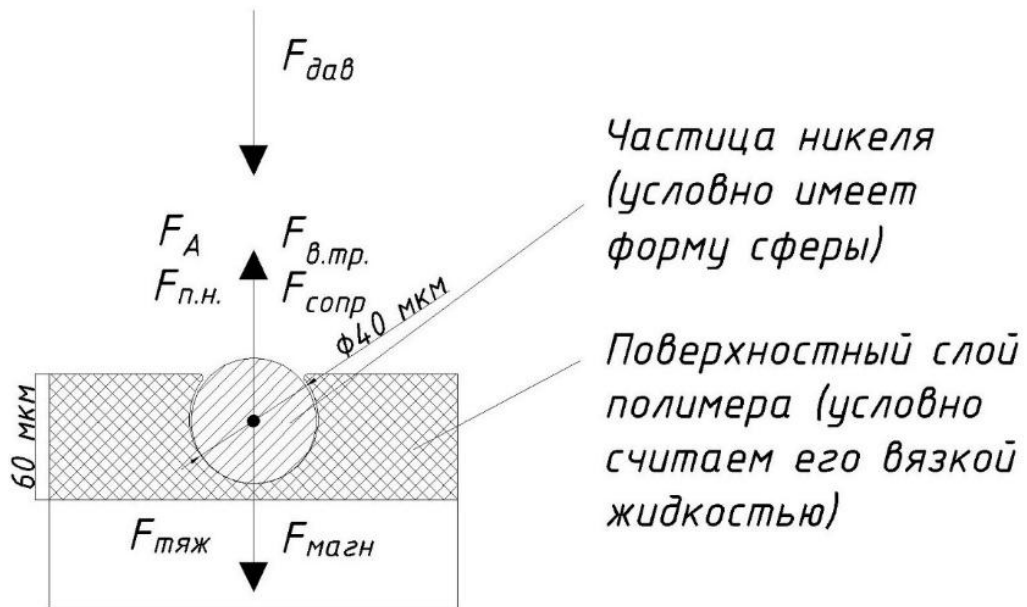


Рисунок 11. Схематическое изображение второго ключевого условия

Далее определяем, какие основные силы оказывают непосредственное действие на частицу (как извне, так и со стороны расплава), и рассчитываем их приближенные значения, принимая толщину расплава равной 60 мкм и считая его жидкой средой:

1) Магнитная сила захвата частицы

Ее можно рассчитать по формуле ниже:

$$F_{\text{магн}} = \mu_0 \cdot V_{\text{ч}} \cdot \chi_{\text{уд}} \cdot H \cdot \text{grad}H = \frac{\chi_{\text{уд}} \cdot V_{\text{ч}} \cdot B \cdot \text{grad}B}{\mu_0}, \quad (1)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;

$V_{\text{ч}}$  – объем частицы, м<sup>3</sup>;

$\chi_{\text{уд}}$  – удельная магнитная восприимчивость никеля, м<sup>3</sup>/кг;

$H$  – напряженность намагничивающего поля, А/м;

$B$  – индукция магнитного поля, Тл;

$\text{grad}H / \text{grad}B$  – градиент напряженности поля / индукции поля.

Затем необходимо привести формулы для расчета объема, массы и удельной магнитной восприимчивости частицы, которые позволят в дальнейшем рассчитать магнитную силу, действующую на частицу. Форму частицы никеля принимаем сферической.

Объем частицы [103] рассчитываем согласно формуле

$$V_{\text{ч}} = \frac{\pi d^3}{6}, \quad (2)$$

где  $d$  – диаметр частицы, м.

Массу частицы  $m_{\text{ч}}$  рассчитываем по формуле

$$m_{\text{ч}} = \rho_{\text{Ni}} \cdot V_{\text{ч}}, \quad (3)$$

где  $\rho_{\text{Ni}}$  – плотность никеля, кг/м<sup>3</sup>;

$V_{\text{ч}}$  – объем частицы, м<sup>3</sup>.

Удельную магнитную восприимчивость  $\chi_{\text{уд}}$  находим по формуле:

$$\chi_{\text{уд}} = \frac{\chi}{\rho}, \quad (4)$$

где  $\chi$  – магнитная восприимчивость вещества (безразмерная величина);

$\rho$  – плотность вещества, кг/м<sup>3</sup>.

Магнитную восприимчивость вещества  $\chi$  рассчитываем по формуле:

$$\chi = \frac{J}{H}, \quad (5)$$

где  $J$  – намагниченность вещества, А/м.

Намагниченность вещества  $J$  рассчитываем согласно формуле [103]:

$$J = \frac{M_q}{V_q}, \quad (6)$$

где  $M_q$  – магнитный момент частицы никеля,  $A \cdot m^2$ ;

$V_q$  – объем частицы,  $m^3$ .

Отсюда

$$M_q = J \cdot V_q. \quad (7)$$

Проведя преобразования формул (5), (6) и (7), получим:

$$\chi_{y\partial} = \frac{M_q}{V_q \cdot H \cdot \rho_{Ni}}. \quad (8)$$

При всех прочих условиях магнитная сила должна преобладать над силой тяжести и силами, препятствующими внедрению частицы вне зависимости от направления их действия, иначе частицы порошка не удерживаются на поверхности полимера в начале процесса армирования из-за их сноса потоками нагретого воздуха (средняя скорость – 7,5 м/с), то есть становится маловероятным применение воздушного потока нужной температуры.

Время нагрева и погружения частицы в расплав осуществляется в течение 90 секунд (данная цифра была принята как средняя на основании оценочно-сравнительных экспериментов), при этом скорость проникновения принимаем равной 20 мкм/мин. Отдельно необходимо отметить, что при нагреве большей продолжительности полимер сначала полностью переходит в жидкую фазу, а затем разлагается [103,104,105].

Далее требуется определить силы, которые не имеют связи с магнитным полем.

2) Сила тяжести. Для ее нахождения можно использовать стандартную формулу:

$$F_{тяж} = m_{ч} \cdot g . \quad (9)$$

Также важной составляющей является сила Архимеда, значение которой также можно определить по известной формуле [103]:

$$F_A = \rho_{ж} \cdot g \cdot V_{ч} , \quad (10)$$

где  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

3) Сила давления потока воздуха на частицу. Ее можно определить по формуле:

$$F_{дав} = c \cdot S_{н.с.ч} \cdot \rho_{возд} \cdot \frac{v_{возд}^2}{2} , \quad (11)$$

где  $S_{н.с.ч}$  – площадь поперечного сечения частицы, м<sup>2</sup>;

$c$  – коэффициент сопротивления частицы (безразмерный);

$v_{возд}$  – скорость потока воздуха, м/с.

4) Сила трения в покоящейся вязкой жидкости. Для ее нахождения используем закон Стокса [103,105]:

$$|F_{тр}| = | -6 \cdot \pi \cdot r_{ч} \cdot \mu_{ж} \cdot v_{ч} | , \quad (12)$$

где  $r_{ч}$  – радиус частицы, м;



$\mu_{ж}$  - динамическая вязкость жидкости, Па·с;

$v_{ч}$  – скорость частицы, м/с.

5) Сила поверхностного натяжения. С учетом ранее принятого допущения для расчета используем формулу:

$$F_{п.н.} = \sigma \cdot l_{вн}, \quad (13)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения расплава полимера, Н/м;

$l_{вн}$  – глубина внедрения частицы, м.

6) Сила сопротивления среды. Ее рассчитаем по формуле [97,99]:

$$F_{сопр} = \rho_{ж} \cdot S_{п.с.ч} \cdot v_{ч}^2 = \beta \cdot v_{ч}^2, \quad (14)$$

где  $\beta = \rho \cdot S$  – коэффициент сопротивления среды.

Расчет по приведенным формулам позволит оценить соотношение действующих на ферромагнитную частицу сил и проверить правильность выдвинутых ранее предположений.

### 2.3 Математическое моделирование процесса внедрения ферромагнитных частиц в поверхностный слой полимера

При движении в вязком поверхностном слое разогретого полимера этот процесс представляет собой сложное гидродинамическое движение частицы в поле магнитных сил и тепловых потоков

Движение частицы характеризуется её перемещением в жидкости, являющей собой вязкий поверхностный слой расплавленного термопластичного полимера, при одновременном воздействии на поверхность и саму частицу потока разогретого воздуха. В дополнение к тепловому потоку на частицу действует магнитное поле, на начальном этапе внедрения

удерживающее её на поверхности полимера, а в последующем внедряющее её в полимер.

Важной проблемой, возникающей при теоретическом описании и численном моделировании процессов движения частицы в вязком поверхностном слое расплавленного полимера, является неравномерность температуры и, соответственно, вязкости и поверхностного натяжения полимера в его приповерхностном слое. Также усложняет задачу изменяющееся по мере движения вглубь поверхностного слоя воздействие магнитного поля на движущуюся частицу.

Задача расчета и математической модели состоит в описании движения частицы ферромагнитного материала (например, никеля) в поверхностном (находящемся фактически в состоянии расплава) слое полимера (в данном случае – полипропилена с температурой плавления 433 К и плотностью 910 кг/м<sup>3</sup>) под воздействием сил, действующих на частицу и оказывающих влияние на процесс внедрения [103].

Для математического описания движения частицы ферромагнитного материала в поверхностном слое полимера нами приняты за основу следующие допущения и положения:

1. Массовые силы малы, по сравнению с вязкостным сопротивлением, поэтому ими можно пренебречь;
2. Поверхностное натяжение вследствие малых скоростей прохождения процессов принимается аналогичным для неподвижной жидкости
3. Все частицы имеют одинаковый размер и идеально сферическую форму.
4. Магнитное поле действует на все частицы одинаково, вектор магнитной индукции перпендикулярен поверхности полимера.

Граничными условиями для данной математической модели являются:

- 1) Магнитная сила, действующая на феррочастицу;
- 2) Расстояние, пройденное феррочастицей (расстояние внедрения – 30-35 мкм при диаметре частицы в 40 мкм);

3) Температура процесса на поверхности полимерного изделия (начальная –293 К, конечная зависит от применяемого полимера – в среднем 433 К);

4) Глубина прогрева (60 мкм) до жидкого состояния.

5) Изменение вязкости полимера

6) Расстояние между частицами (не менее половины диаметра внедряемой частицы).

Первым базовым уравнением в данной математической модели стоит считать общее уравнение, показывающее соотношение сил, действующих на ферромагнитную частицу в вязкой среде поверхностного слоя полимера. Оно будет иметь вид

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{1}{2} c S_q \rho \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + \frac{\chi_{yd} \frac{\partial x}{\partial t} B \frac{\partial B}{\partial x}}{\mu_0} + mg - \rho S_q \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} - 6\pi r_q \frac{\partial x}{\partial t} - \sigma l - \rho_{жс} g V_q, \quad (15)$$

где  $m$  – масса частицы, кг;

$V_q$  – объем частицы, м<sup>3</sup>;

$\chi_{yd}$  – удельная магнитная восприимчивость никеля, м<sup>3</sup>/кг;

$B$  – индукция магнитного поля, Тл;

$\rho$  – плотность вещества, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{жс}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$r_q$  – радиус частицы, м;

$\mu_{жс}$  – динамическая вязкость жидкости, Па·с;

$v_q$  – скорость частицы, м/с;

$S_q$  – площадь поперечного сечения частицы, м<sup>2</sup>;

$\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения расплава полимера, Н/м;

$l$  – глубина внедрения частицы, м;

$c$  – коэффициент сопротивления частицы (безразмерный);

При дифференцировании данного уравнения относительно некоторых ключевых величин (индукция, динамическая вязкость, площадь поперечного сечения частицы, поверхностное натяжение и глубина внедрения частицы) получается следующее:

$$\frac{m \frac{dv}{dt}}{dB} = \frac{\chi \frac{\partial x}{\partial t} \cdot \frac{\partial B}{\partial x}}{\mu_0}; \quad (16)$$

$$\frac{m \frac{dv}{dt}}{d\mu_{\text{жс}}} = \frac{\chi \frac{\partial x}{\partial t} \cdot \frac{\partial B}{\partial x}}{\mu_0^2} - 6\pi r \frac{\partial x}{\partial t}; \quad (17)$$

$$\frac{m \frac{dv}{dt}}{dS_{\text{ч}}} = \frac{1}{2} c\rho \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} - \rho \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}; \quad (18)$$

$$\frac{m \frac{dv}{dt}}{d\sigma} = -l; \quad (19)$$

$$\frac{m \frac{dv}{dt}}{dl} = \frac{\chi \frac{\partial x}{\partial t} \cdot \frac{\partial B}{\partial x}}{\mu_0^2} - S_{\text{ч}} \cdot \rho \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}. \quad (20)$$

Далее запишем уравнения, описывающие тепловые процессы, происходящие во время армирования.

Для описания процесса конвективного теплообмена с учетом указанных допущений используем уравнение Фурье-Кирхгофа [104,105,106]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (21)$$

Также необходимо учитывать уравнение неразрывности, которое в случае несжимаемой жидкости принимает вид:

$$\frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \frac{\partial \omega_y}{\partial y} + \frac{\partial \omega_z}{\partial z} = 0. \quad (22)$$

Связь между количеством тепла, передаваемым потоком нагретого воздуха, и поверхностью теплообмена определяется основным уравнением теплопередачи:

$$\Delta Q = K_{л} \Delta S \Delta T \Delta t, \quad (23)$$

где  $\Delta Q$  – количество переданного тепла, Дж;  $K_{л}$  – локальный коэффициент теплопередачи между средами, Вт/(м<sup>2</sup>·град);  $\Delta T$  – разность температур между средами, К;  $\Delta S$  – элемент поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;  $\Delta t$  – время теплообмена, с.

Усредняя по поверхности процесс теплопередачи, основное уравнение теплопередачи запишется в следующем виде:

$$Q_{cp} = K S \Delta S_{cp}, \quad (24)$$

где  $Q_{cp}$  – мгновенный средний расход тепла, Вт (Дж/с);

$K$  – коэффициент теплопередачи средний для всей поверхности, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$S$  – поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>;

$\Delta T_{cp}$  – средняя разность температур между средами, К.

Мощность теплового потока от нагретого воздуха к частице никеля и поверхности полимера определим по формуле:

$$Q = \alpha \cdot S \cdot \Delta T, \quad (25)$$

где  $\alpha = \alpha_k + \alpha_p$ , Вт/(м<sup>2</sup>\*К) – суммарный коэффициент теплоотдачи на границе воздух – поверхность частицы;

-  $\alpha_k$ , Вт/(м<sup>2</sup>\*К) – коэффициент конвективной теплоотдачи;

-  $\alpha_p = \varepsilon \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \left( \frac{(T_{II} + 273,15)^4 - (T_B + 273,15)^4}{T_{II} - T_B} \right)$ , Вт/(м<sup>2</sup>\*К) – коэффициент

радиационной теплоотдачи (теплоотдачи излучением);

-  $\varepsilon$  – степень черноты поверхности;

-  $S$ , м<sup>2</sup> – площадь поверхности частицы;

-  $\Delta T = |T_{II} - T_B|$ , К – разность температур поверхности и воздушной среды;

-  $T_{II}$ , К – температура поверхности частицы;

-  $T_B$ , К – температура воздуха.

Зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры внешней среды можно определить, используя температурный коэффициент поверхностного натяжения:

$$\sigma_T = \sigma_0 - a\Delta T, \quad (26)$$

где  $a$  – температурный коэффициент поверхностного натяжения полипропилена.

Эту же зависимость можно определить также с помощью соотношения (27), используя плотность жидкости (в данном случае – расплава полимера) и динамическую вязкость жидкости:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = -B \left( \frac{\rho}{\mu} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (27)$$

где  $B$  – постоянный коэффициент;

$\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu$  – динамическая вязкость жидкости.

Приняв плотность и динамическую вязкость за постоянные величины, получаем:

$$\partial \sigma = -B \left( \frac{\rho}{\mu} \right)^{\frac{2}{3}} \partial t, \int \partial \sigma = -B \left( \frac{\rho}{\mu} \right)^{\frac{2}{3}} \int \partial t, \sigma = -B \left( \frac{\rho}{\mu} \right)^{\frac{2}{3}} t + C. \quad (28)$$

В качестве исходных данных возьмем значение коэффициента поверхностного натяжения в начальный момент времени  $\sigma(t=0) = 0,032$  Н/м, и  $\sigma(t=120 \text{сек}) = 0,025$  Н/м. Подставим  $\sigma(t=0)$  в уравнение (30), тогда получим

$$\sigma(t=0) = -B \left( \frac{\rho}{\mu} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot 0 + C = 0,032 \Rightarrow C = 0,032$$

#### 2.4 Моделирование контактных и изгибных напряжений на примере лопаток рабочего колеса и лопаток корпуса жидкостнокольцевого вакуумного насоса

Различным механическим тепло- и массообменным процессам, положенным в основу вакуумных технологий, отводится важная роль при переработке растительного сырья. Применение вакуумных технологий позволяет сохранить имеющиеся в растительном сырье биологически активные

вещества (БАВ) [107]. Это достигается за счет создания низкотемпературных режимов, так как в них присутствует вакуумное кипение. Жидкостнокольцевые вакуумные насосы (ЖВН) используются в АПК как основная машина создания вакуума [108,109]. Процессы, где нашли применение ЖВН в АПК: доение, хранение растительной продукции, сушка, выпаривание, транспортирование, и т.д. [110,111].

Преимущества, которые позволяют обосновать применение ЖВН, являются следующими:

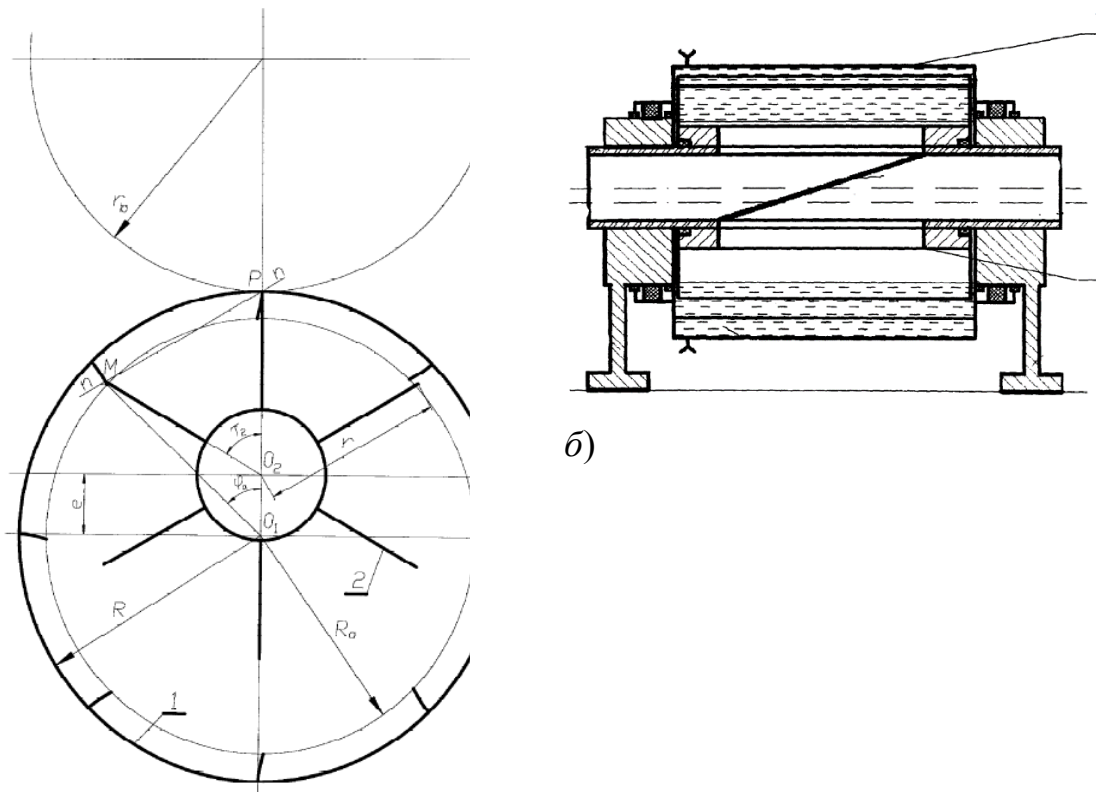
- простота конструкции;
- надежность ЖВН;
- безопасность при работе.

В то же время остаются вопросы, связанные с материалоемкостью и энергоэффективностью насосов данного типа. Тем не менее, неоднократно подтвержден 50%-ный средний коэффициент полезного действия [112].

Важность теоретического анализа, а также корректировки проверочного расчета конструкции ЖВН обусловлена особенностями использования полимерных материалов для повышения кавитационной стойкости, а также снижения металлоемкости и потерь мощности. Для этого используем различные теоретические данные (в том числе по полимерам) [113] и методики расчета, приведенные в курсах: теория упругости [114], теория машин и механизмов [15,115], детали машин и основы конструирования [116-119].

На рисунке 12 представлена спроектированная и изготовленная конструкция ЖВН с кинематическим зацеплением по эвольвенте рабочего колеса с лопатками корпуса. Здесь в качестве ведущего звена может использоваться как рабочее колесо, так и корпус [120].





a)

Рисунок 12. Схема ЖВН с кинематическим эвольвентным зацеплением рабочего колеса с лопатками корпуса: а) поперечный разрез ЖВН; б – продольный разрез ЖВН

Одноступенчатый ЖВН в своей конструкции содержит такие значимые элементы, как:

- 1) вращающийся корпус с лопатками (поз.1);
- 2) рабочее колесо (поз. 2), помещенное в корпус с эксцентриситетом (рисунок 12, а).

Рабочее колесо вращается на неподвижном полом распределительном валу, имеющим внутри перегородку. Перегородка предназначена для организации входного и выходного патрубков с торцов вала.

Расчет радиусов основной окружности лопаток корпуса ЖВН и максимальной окружности-ограничителя длины лопаток рабочего колеса соответственно произведем по формулам [121]:

$$r_b = \frac{2R \cdot \sin \frac{\pi}{z_1} \cdot \sin \left( \frac{\pi}{z_1 u} - \frac{\pi}{z_1} \right)}{\cos \frac{\pi}{z_1 u}}, \quad (29)$$

$$R_a = \sqrt{r^2 + e^2 + 2r \cdot e \cdot \cos(\tau_2 \cdot \varepsilon_\alpha)}, \quad (30)$$

где  $R$  – радиус корпуса ЖВН, мм;

$r$  – максимальный радиус рабочего колеса, мм;

$u$  – передаточное число;

$e = R - r$  – величина эксцентриситета ЖВН, мм;

$\tau_2 = \frac{2\pi}{z_2}$  – угловой шаг лопаток рабочего колеса, рад;

$\varepsilon_\alpha$  – коэффициент перекрытия эвольвентного зацепления.

Для вычисления передаточного числа воспользуемся выражением:

$$u = \frac{z_2}{z_1} = \frac{r}{R}. \quad (31)$$

В процессе работы за счёт зацепления лопаток корпуса и рабочего колеса осуществляется вращение. Это делает возможным сохранение постоянной величины передаточного числа. Угол перекрытия определяем выражением:

$$\varphi_\alpha = \tau_1 \cdot \varepsilon_\alpha, \quad (32)$$

где  $\tau_1 = \frac{2\pi}{z_1}$  – угловой шаг лопаток корпуса, рад.

Введем следующее допущение: лопатки корпуса и рабочего колеса ЖВН аналогичны колесам зубчатой передачи с эвольвентным зацеплением.

Дальнейшую модернизацию ЖВН осуществляем изготовлением зубчатой передачи из полимерных материалов. Данное решение увеличивает межремонтный срок эксплуатации и существенно экономит металл.

Модернизированный вакуумный насос (рисунок 13) работает аналогично стандартным ЖВН. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) является одним из основных материалов для ЖВН КЗ. СВМПЭ имеет высокую стойкость к кавитации и малый коэффициент трения по стали

Модернизированная конструкция одноступенчатого ЖВН, изображенная на рисунке 13, работает аналогично конструкции, показанной ранее (рисунок 12), причем в данном случае она может быть стандартной [121]. В качестве материала вращающегося корпуса с лопатками и рабочего колеса может использоваться сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ). Данный материал обладает высокой стойкостью к кавитации и малым коэффициентом трения [116].

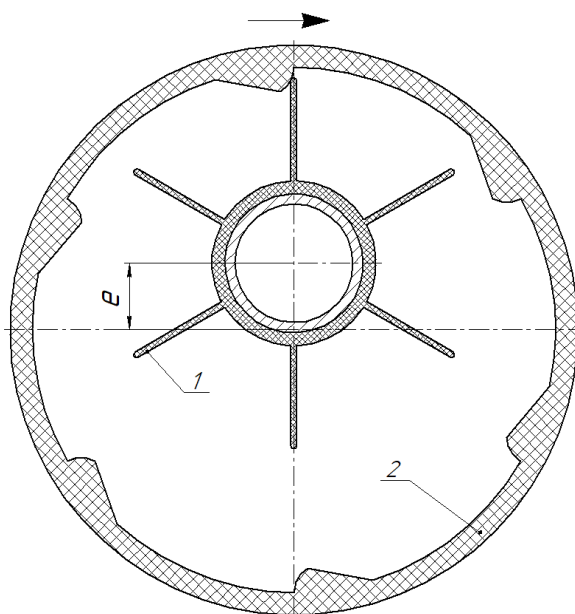


Рисунок 13. Основные детали ЖВН с кинематическим замыканием, изготовленные из СВМПЭ: 1 – рабочее колесо, 2 – корпус.

В зависимости от условий эксплуатации требуются конкретные значения деформаций и методики расчета напряжений для полного соблюдения условия прочности. Однако здесь задача усложняется, поскольку в случае использования полимерных материалов необходимо учитывать их особенности и различия по каким-либо характеристикам, т.е. в одной ситуации наблюдается, к примеру, явная зависимость деформаций от времени, а в другой – отсутствие пропорциональности между деформациями и их отклонениями.

Это означает, что уровень соответствия используемого материала тем законам, которые были приняты, верен. Также для данного расчета устанавливаем параметры используемых полимеров. Это позволяет обосновать использование положений теории упругости при описании возникающих деформаций используемых полимерных материалов.

Также важной задачей расчета является – определение значения условного модуля упругости контактного нагружения. Ошибки при его неправильном определении ведут к существенным ошибкам всех результатов. Дополнительно необходимо и изучить вопрос исследования модуля упругости контактных нагружений зубчатого зацепления эвольвентного профиля в случае изготовления из полимерных материалов. Также требуется учитывать условия прочности зубьев (рабочего колеса и корпуса вакуумного насоса) для контактных и изгибных напряжений. При этом неприемлемо меньшее значение допустимых напряжений по сравнению с расчетными.

При расчете зубьев на контактную прочность проверяем размеры эвольвентного зацепления следующим образом. Во время эксплуатации зубья звеньев не выходят из строя вследствие повреждений и разрушения рабочих поверхностей зацепления [121].

Контактные напряжения вычисляем по формуле:

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{q}{\rho_{np}} \cdot \frac{2E_1E_2}{\pi[E_1(1-\mu_2^2) + E_2(1-\mu_1^2)]}}, \quad (33)$$

где  $\rho_{np} = \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}$  – приведенный радиус кривизны эвольвентного профиля зацепления рабочего колеса и лопаток корпуса вакуумного насоса, мм;  
 $q$  – расчетная распределенная нагрузка зацепления, Н/мм;  
 $E_1, E_2$  – модули упругости материалов, МПа;  
 $\mu_1, \mu_2$  – коэффициенты Пуассона используемых материалов (в рамках данной работы для зуба корпуса и рабочего колеса).

Для расчета кинематического замыкания ЖВН с эвольвентным зацеплением по прочности (с учетом некоторых упрощений) используем методики, указанные в источниках [116,117,121]. При этом сохраняется уровень практической применимости полученных данных.

Для определения контактной прочности рассмотрим соприкосновение зубьев звеньев в полюсе (однопарное зацепление, где происходит выкрашивание). Контакт зубьев в данном случае рассматривается как контакт двух цилиндров. В расчетах принимаем  $\mu_1 = \mu_2 = 0,3$ , тогда формула (33) принимает вид:

$$\sigma_H = 0,418 \sqrt{\frac{qE_{np}}{\rho_{np}}}, \quad (34)$$

где  $E_{np} = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2}$  - приведенный модуль упругости, МПа;

Если при изготовлении зубьев корпуса и лопаток рабочего колеса применены разные материалы, то формула, с помощью которой требуется рассчитать контактные напряжения, подлежит корректировке.

Тогда получаем:

$$\sigma_H = 0,798 \sqrt{\frac{q}{\rho_{np}} \cdot \frac{E_1 E_2}{E_1(1-\mu_2^2) + E_2(1-\mu_1^2)}}. \quad (35)$$

Запишем коэффициенты трения полимеров по стали, приведенные в таблице 1 [121].

Таблица 1. Коэффициенты трения полимеров по стали

| Полимер                                    | Коэффициент трения по стали |
|--|-----------------------------|
| Полиэтилен высокой плотности               | 0,3-0,35                    |
| Полипропилен                               | 0,3                         |
| Полиамид                                   | 0,1-0,2                     |
| Полиацеталь (полиформальдегид)             | 0,25                        |
| Сверхвысокомолекулярный полиэтилен РЕ-1000 | около 0,1                   |
| Фторопласт-4                               | 0,04-0,15                   |

Формула (33) также подлежит корректировке, если используются одинаковые полимеры при создании деталей, при этом не имеет значения, оба они армированные или исходные. Тогда коэффициент Пуассона и модуль упругости принимаем как общие, но в таком случае необходимо проводить дополнительные исследования для их уточнения. Таким образом, формула (33) принимает вид:

$$\sigma_H = 0,5642 \sqrt{\frac{q}{\rho_{np}} \cdot \frac{E_{пол}}{(1-\mu_{пол}^2)}}, \quad (36)$$

где  $E_{пол}$  – модуль упругости армированного полимера, МПа;

$\mu_{пол}$  – коэффициент Пуассона рассматриваемого армированного полимера.

В качестве возможных материалов для изготовления деталей ЖВН допускается выбор полиацетала и полиамида, так как известны диапазоны рабочих температур. Что касается применения полимеров с более высокой молекулярной массой или температурой плавления (тугоплавкостью), то при условии проведения дополнительных исследований (в том числе для выявления их эксплуатационных показателей) и учете сложностей их переработки они также могут быть использованы. В противном случае использование таких полимерных материалов нецелесообразно.

При применении неармированных полимерных материалов одного вида используем аналогичную (33) формулу расчета контактных напряжений. Учитываем дополнительно изменение коэффициента Пуассона из-за нагрева деталей. Кроме этого, принимаем во внимание различные физико-механические свойства используемых полимеров. Так возможно применение не только исходных полимеров, но и композитов на их основе. Это дает возможность применять, например, фторопласт, армированный порошкообразными материалами (кокс, стекловолокно, молибден, углеродистое волокно, дисульфид молибдена).

Также целесообразно применение описанной в разделе 2.1 технологии магнито-термического армирования, позволяющего внедрить ферромагнитные порошкообразные частицы в поверхность полимера с целью повышения твердости и износостойкости. Микроструктура полимера, подверженного армированию, представлена на рисунке 14 [121].

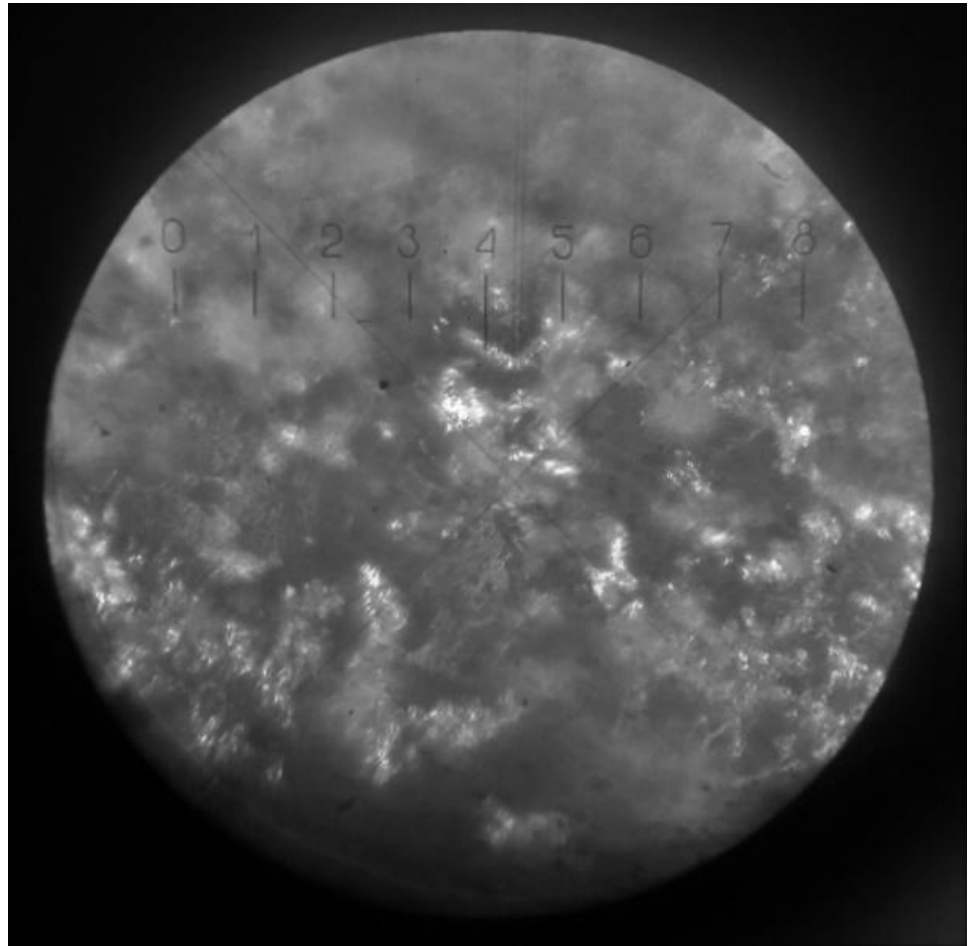


Рисунок 14. Фотографическое изображение микроструктуры поверхности армированной полимерной пластины. Увеличение  $650\times$ .

Приравняем нагрузку  $q$  к максимальной удельной нагрузке, действующая по линии контакта зубьев. При расчетах ЖВН ей соответствует ширина венца колеса  $b_w$ .

На рисунке 15 изображены действующие в полюсе зацепления силы, обусловленные зацеплением зубьев. Введем равнодействующую силу  $F_n$ , вместо распределенной нагрузки в зацеплении. Как видно на рисунке 15, эта сила проходит вдоль линии  $nn$ . Силами трения в зацеплении пренебрегаем.



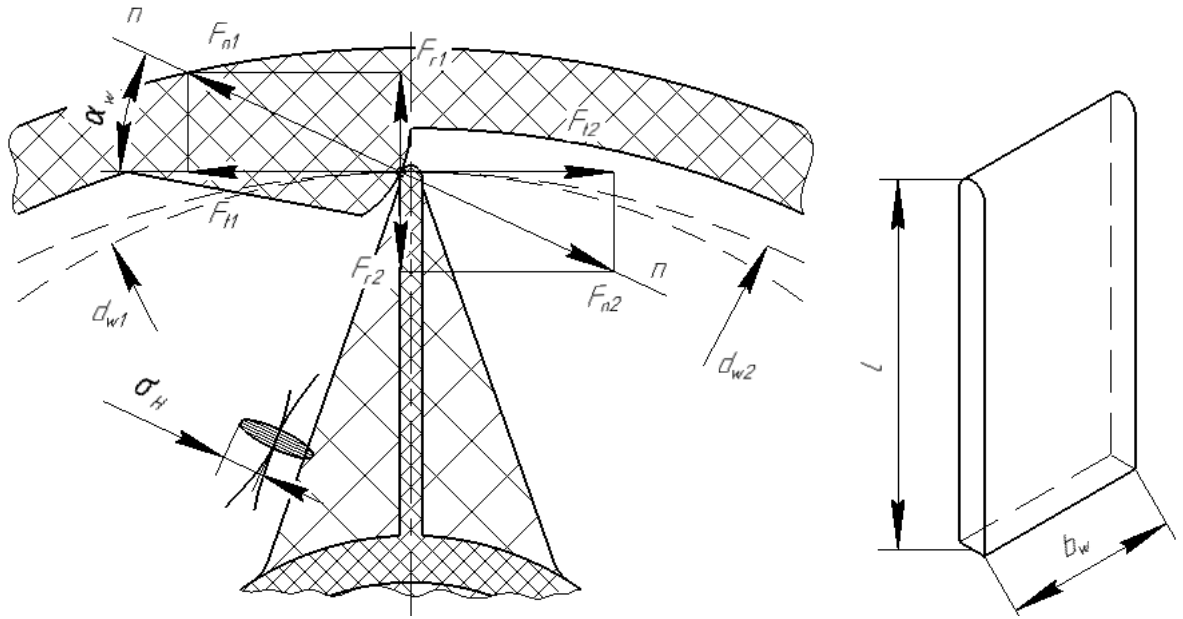


Рисунок 15. Схематичное изображение действующих в зацеплении сил

Нормальные силы  $F_{n1}$  и  $F_{n2}$  раскладываем на тангенциальную и радиальную составляющие.

Тогда формула тангенциальной силы в зацеплении на лопатке корпуса ЖВН будет выглядеть следующим образом:

$$F_{t1} = F_{n1} \cos \alpha_w = \frac{2T_1}{d_{w1}} \quad (37)$$

Для лопаток рабочего колеса:

$$F_{t2} = F_{n2} \cos \alpha_w = \frac{2T_2}{d_{w2}} \quad (38)$$

где  $\alpha_w$  — угол зацепления, рад;

$T_1, T_2$  — вращающий момент корпуса и рабочего колеса, Н·м;

$d_{w1}$ ,  $d_{w2}$  — начальный диаметр корпуса и рабочего колеса, мм;

Радиальная составляющая силы:

от лопаток корпуса

$$F_{r1} = F_{t1} \operatorname{tg} \alpha_w. \quad (39)$$

от рабочего колеса

$$F_{r2} = F_{t2} \operatorname{tg} \alpha_w. \quad (40)$$

Удельную распределенную нагрузку выразим следующим образом

$$q = \frac{F_{t1} K_H}{b_w \cos \alpha_w} = \frac{2T_1 K_H}{d_{w1} b_w \cos \alpha_w}. \quad (41)$$

Коэффициент расчетной нагрузки:

$$K_H = K_{H\beta} K_{Hv}, \quad (42)$$

где  $K_{H\beta}$  — коэффициент концентрации нагрузки;

$K_{Hv}$  — коэффициент динамической нагрузки.

Коэффициент динамической нагрузки считаем зависимостью:

$$K_{Hv} = 1 + \frac{q_v}{q}, \quad (43)$$

где  $q_v$  — удельная динамическая нагрузка, Н/м;

$q$  - удельная расчетная рабочая нагрузка в зоне ее наибольшей концентрации, Н/м.

Радиусы кривизны эвольвентного зацепления в точке контакта лопаток корпуса и рабочего колеса насоса, согласно рисунку 16 [121]:

$$\rho_1 = \frac{d_{w1} \sin \alpha_w}{2}, \quad (44)$$

$$\rho_2 = \frac{d_{w2} \sin \alpha_w}{2}. \quad (45)$$

Тогда

$$\frac{1}{\rho_{np}} = \frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} = \frac{2}{d_{w1} \sin \alpha_w} - \frac{2}{d_{w2} \sin \alpha} = \frac{2}{d_{w1} \sin \alpha} \left( \frac{u-1}{u} \right). \quad (46)$$

Исходя из основного тригонометрического тождества  $\cos \alpha_w \sin \alpha_w = (\sin 2\alpha_w)/2$ , получаем:

$$\sigma_H = 1,18 \sqrt{\frac{E_{np} T_1 K_H}{d_{w1}^2 b_w \sin 2\alpha_w} \left( \frac{u-1}{u} \right)} \leq [\sigma_H]. \quad (47)$$

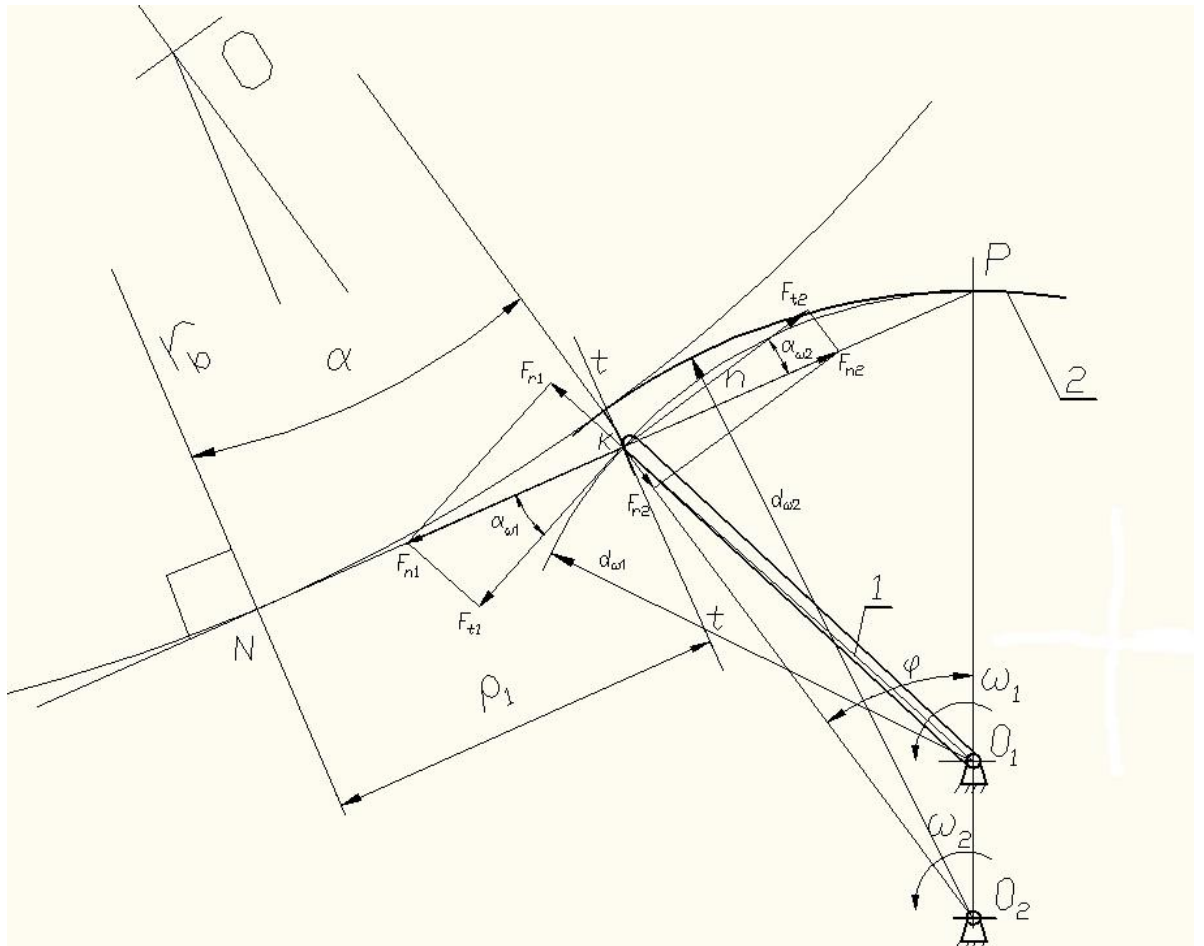


Рисунок 16. Схема определения радиуса кривизны

Контактные напряжения и передаточное число  $u$  не определяются приводом вращающегося звена. Расчет точного значения  $u$  сводит к минимуму вероятность возникновения ошибки при расчете. Расчетные контактные напряжения одинаковы для рабочего колеса и корпуса ЖВН. Поэтому расчет ведется для звена зацепления с наименьшим допускаемым напряжением  $[\sigma_H]$  (как правило, это лопатка корпуса).

Значения крутящих моментов на валу рабочего колеса и корпуса у данного насоса на 35% меньше по сравнению с ЖВН, имеющим неподвижный корпус. Их можно рассчитать по методикам, представленным в литературе [115,117,119].

Введем коэффициент нагрузки  $K_F$ , равный  $K_H$ . Тогда получаем формулу проверочного расчета на изгиб зубьев ЖВН с кинематическим замыканием:

$$\sigma_F = \frac{Y_F K_F F_t}{(b_w \cdot 0,5b_w)} \cdot K_B \leq [\sigma_F], \quad (48)$$

где  $[\sigma_F]$  – допускаемое напряжение изгиба, МПа;

$Y_F$  – коэффициент формы зацепляющей части рабочего колеса;

$K_B$  – коэффициент бандажа

$$Y_F = \frac{6K_t \alpha}{\gamma^2}, \quad (49)$$

где  $\alpha$  – коэффициент формы лопатки по высоте;

$K_t$  – теоретический коэффициент концентрации напряжений;

$Y_F$  – коэффициент формы лопатки по сечению. Величина этого коэффициента нуждается в экспериментальном исследовании. Его можно определять, зная условный модуль зацепления.

Вычислим допускаемые контактные и изгибные напряжения при расчете на усталость [121], используя выражение:

$$[\sigma_H] = \left( \frac{\sigma_{H\lim}}{S_H} \right) Z_N, \quad (50)$$

где  $\sigma_{H\lim}$  – предел контактной выносливости, МПа;

$S_H$  – коэффициент безопасности;

$Z_N$  – коэффициент долговечности.

Контактная выносливость  $\sigma_{H\lim}$  рассчитывается с учетом:

- материала звеньев зацепления;

- средней твердости поверхности зубьев  $H_{cp}$ .

При изготовлении лопаток и корпуса с применением армированного полимера, контактную выносливость следует определять опытным путем. Коэффициент долговечности  $Z_N$ , учитывает влияние срока службы и режим нагрузки передачи. Для его определения воспользуемся формулой:

$$Z_N = \sqrt[6]{\frac{N_{HG}}{N_{HE}}} \geq 1, \quad (51)$$

где  $N_{HG}$  – базовое число циклов;

$N_{HE}$  – эквивалентное число циклов.

Величина  $N_{HG}$  может быть получена по твердости поверхности зубьев корпуса и лопаток рабочего колеса (при применении полимеров требуется проведение дополнительных исследований).

Эквивалентное число циклов  $N_{HE}$  определяется по выражению:

$$N_{HE} = \mu_H N_K, \quad (52)$$

где  $\mu_H$  – коэффициент эквивалентности, определяемый по формуле

$$\mu_H = \sum \left( \frac{T_i}{T_{\max}} \right)^3 \frac{N_i}{N_K}, \quad (53)$$

где  $T_i$  – текущее значение вращающего момента на графике циклограммы моментов нагружения, Н;

$T_{\max}$  – максимальный вращающий момент, участвующий при расчете на усталость, Н;

$N_K$  – ресурс звена, необходимый на частоте вращения  $n$ , мин<sup>-1</sup>.

$$N_K = 60nt_{\Sigma}, \quad (54)$$

где  $t_{\Sigma}$  – суммарный срок службы в часах, именуемый ресурсом зацепления, определим как

$$t_{\Sigma} = L \cdot 365K_{\text{год}} 24K_{\text{сут}}, \quad (55)$$

где  $L$  – количество лет работы ЖВН;

$K_{\text{год}}, K_{\text{сут}}$  – коэффициенты использования насоса в году и сутках.

Определяем допускаемые изгибные напряжения при расчете на усталость:

$$[\sigma_F] = \frac{\sigma_{F\text{lim}}}{S_F} Y_N \quad (56)$$

где  $\sigma_{F\text{lim}}$  – предел выносливости зубьев по напряжениям изгиба, МПа;

$S_F$  – коэффициент безопасности;

$Y_N$  – коэффициент долговечности (рассчитывается аналогично  $Z_N$ ).

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Разработаны базовые модели (физическая и математическая), позволяющие описать процесс внедрения ферромагнитной частицы в поверхностный слой полимерной детали. Определены и описаны основные

силы, действующие на частицу в процессе внедрения. Выведены основные зависимости изменения ключевых параметров внедрения методом частного дифференцирования базового уравнения. Показаны условия проникновения частиц никеля и их удержания в поверхностном слое термопласта.

2. Усовершенствованы методики расчета и проведено моделирование контактных и изгибных напряжений на примере лопаток рабочего колеса и лопаток корпуса жидкостнокольцевого вакуумного насоса. Рассмотрена модификация устойчивого к резонансным колебаниям лопаток насоса с элементами рабочего механизма из модифицированных полимерных материалов с эвольвентным профилем рабочих частей.

3. Выдвинуты предпосылки к получению поверхностно – армированных лопаток насоса с эвольвентным профилем лопаток из полимера.



## ГЛАВА 3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В рамках разработки методики экспериментальных исследований в первую очередь определяем алгоритм постановки эксперимента и способ обработки полученных при его проведении данных. После этого выбираются методы исследования, определяются обеспечивающие тот или иной метод приборы и оборудование, устанавливается последовательность проведения опытов, уточняются условия проведения, оформление и обработка результатов.

### 3.1 Программа экспериментальных исследований

Целью проведения экспериментальных исследований является проверка результатов теоретического анализа и моделирования, а также определение основных технологических параметров процесса магнито-термического армирования, необходимых для проектирования и доработки в дальнейшем как самой технологии, так и более технологичных установок, ее реализующих. Дополнительная цель - создание экспериментальной установки на основе существующей базы оборудования для получения опытных данных для разработки процесса магнито-термического армирования полимерных композиционных материалов с использованием мелкодисперсных металлических порошков.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Определить оптимальный размер частиц и материал порошка, а также базовый полимер;
2. Исследовать влияние различных параметров экспериментальной установки на качество получаемой поверхности;
3. Исследовать механические и общие эксплуатационные характеристики полученных армированных деталей;

4. Получить экспериментальные данные, необходимые для проектирования и дальнейшей доработки технологии магнито-термического поверхностного армирования, а также теоретического анализа других вариантов технологии для расширения номенклатуры армируемых деталей.

Экспериментальная установка для проведения магнито-термического армирования должна включать следующее оборудование:

- Катушка с ферромагнитным сердечником и соответствующий параметрам лабораторный блок питания для регулирования напряжения и силы тока;
- Генератор теплового потока с возможностью изменения температуры и скорости потока воздуха
- Прибор для контроля температуры поверхности образца
- Приборы для определения физико-механических характеристик полученных образцов.

### 3.2 Экспериментальное оборудование

Лабораторный блок питания P305D (рисунок 17) с регулировкой напряжения и силы тока используем для питания магнитной системы.



Рисунок 17. Лабораторный блок питания P305D

Этот блок питания получил широкое распространение при изготовлении экспериментальных установок для вторичного питания различных радиоэлектронных устройств. Его основная задача - обеспечивать стабилизированным выходным током и напряжением подключаемые устройства. Данный блок питания обладает подходящим для эксперимента диапазоном регулирования напряжения (0-30 В) и силы тока (0-5 А), а также удобным и понятным интерфейсом с возможностью регулировать оба параметра без переключения. Лабораторную катушку с сердечником из электротехнического железа и многослойной обмоткой на 480 витков с номинальным рабочим напряжением 4 В постоянного тока используем для создания магнитного поля внедрения частиц порошка в поверхность полимера. С помощью теплового пистолета LODESTAR L502310 (рисунок 18) с расходом воздуха 350 л/мин осуществляем нагрев частиц внедряемого порошка и поверхности полимера.



Рисунок 18. Тепловой пистолет LODESTAR L502310

Данное устройство имеет широкий спектр применения в различных областях науки и техники, и благодаря своим параметрам, может использоваться в рамках экспериментальных исследований, поскольку имеет

широкий диапазон регулирования температур (373-873 К) и скорости воздушного потока (190-350 л/мин), что позволяет проводить исследования на большом количестве различных режимов и определить наиболее эффективный и экономичный. Также данное устройство обладает LCD-дисплеем для удобства установки и контроля параметров.

Для получения наиболее полной картины параметров эксперимента при проведении исследований необходимость измерять температуру воздушного потока вблизи поверхности образца непосредственно во время процесса, её контроль можно осуществлять вручную. Для этого выбираем универсальное и распространённое устройство на основе мультиметра DT-838 (рисунок 19).



Рисунок 19. Мультиметр DT838 со стандартными щупами и термопарой типа ХК.

В качестве температурного датчика используется совместимая с мультиметром термопара типа ХК (хромель-копель), которая получила наибольшее распространение в настоящее время. Принцип действия данного датчика основан на термоэлектрическом эффекте Зеебека, в результате которого при наличии разницы температур между двумя проводниками в замкнутом контуре возникает электрический ток или, так называемая, термо-

ЭДС. Изменение температуры и величина напряжения находятся в линейной зависимости, что облегчает преобразование показаний для получения значения температуры с возможностью выбора температурной шкалы. Диапазон температур данной термопары – от 273 до 800 К. В случае кратковременного нагрева верхний диапазон температур может смещаться до 1373 К. Для контроля стабильности уровня магнитной индукции катушки используется измеритель магнитной индукции ИМИ-3 (рисунок 20).



Рисунок 20. Измеритель магнитной индукции ИМИ-3

С помощью металлографического микроскопа Carl-Zeiss Iena Neophot 21 (рисунок 21) и микроинтерферометра МИИ-4 (рисунок 22) осуществляется анализ структуры поверхности полимера и оценка шероховатости поверхности на различных этапах эксперимента.



Рисунок 21. Металлографический микроскоп Carl-Zeiss Iena Neophot 21



Рисунок 22. Микроинтерферометр МИИ-4

Для определения предела прочности на растяжение и изгиб, а также поверхностной твёрдости и коэффициента трения используется универсальная испытательная машина Testometric M-350-5AT (рисунок 23) с максимальной нагрузкой 5 кН. Данная машина имеется в распоряжении созданного на базе ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» центра коллективного пользования научным оборудованием «Получение и применение

полифункциональных наноматериалов», где проводятся исследования механических характеристик образцов.



Рисунок 23. Универсальная испытательная машина Testometric M350-5AT

На данной установке возможно испытание широкого спектра материалов, в том числе полимерных. Высокий класс точности данной машины позволяет проводить тонкую настройку и получать высокоточные данные по многим характеристикам, в число которых входит: модуль упругости и пределы прочности при растяжении и сжатии, предел текучести, твёрдость, коэффициент трения и другие. Контроль параметров облегчается благодаря встроенному промышленному компьютеру.

Аналитические весы ВЕСТА АВ210-01 (рисунок 24) применяются для контроля массы образцов до и после эксперимента.

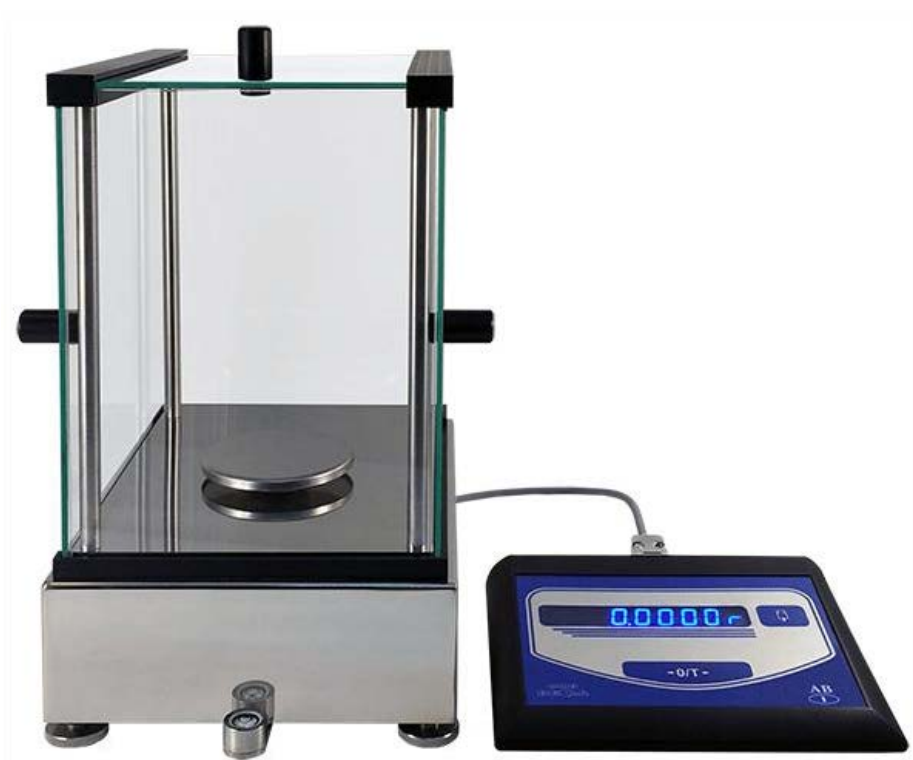


Рисунок 24. Аналитические весы ВЕСТА АВ210-01

Данные весы обладают специальным (I) классом точности. Дискретность аппарата 0,1 мг. Простота работы и удобство оборудования обеспечивается контрастной светодиодной индикацией и малым количеством клавиш управления. Также данные весы обладают возможностью связи с ПК через интерфейс RS232 и специальной компьютерной программой для регистрации и статистической обработки результатов измерений.

Для контроля расстояния от поверхности полимерного образца до сопла термопистолета используется штангенрейсмас GRIFF ШР-250-0,05 (рисунок 25).





Рисунок 25. Штангенрейсмас GRIFF ШР-250-0,05

Все измерительные приборы поверены, поэтому результаты измерений являются правильными и корректными.

Экспериментальная установка, реализующая технологию магнито-термического поверхностного армирования, показана на рисунке 26 [122,123].

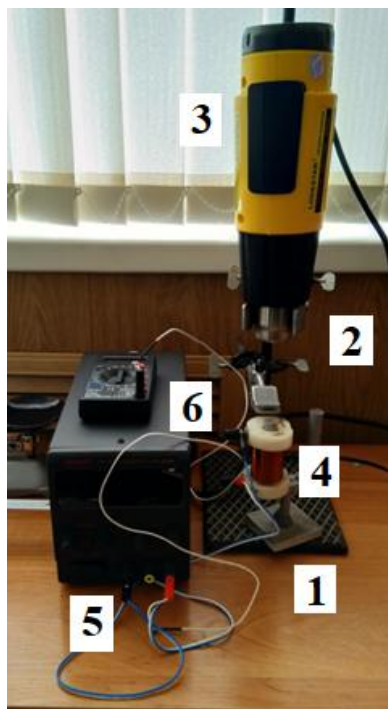


Рисунок 26. Экспериментальная установка для реализации технологии магнито-термического армирования.

Она имеет следующие основные составляющие:

1) Вертикальная штанга (позиция 1) для установки на нее держателей. Помимо этого, с ее помощью можно регулировать расстояние между соплом генератора теплового потока, образцом и электромагнитом;

2) Держатели (позиция 2), посредством которых фиксируются генератор теплового потока и металлизуемая деталь-образец.

3) Термопистолет LODESTAR L502310, выступающий как генератор теплового потока (позиция 3). Его задача состоит в создании и поддержании необходимой температуры в рабочей зоне установки. Также он имеет возможность настройки как температуры, так и расхода воздуха;

4) Катушка-электромагнит на 480 витков (позиция 4). Наряду с генератором теплового потока является одной из главных составляющих установки. Ее задача – создание необходимой магнитной силы для внедрения ферромагнитных частиц;

5) Источник постоянного тока P305D (позиция 5). Путем регулировки выходного напряжения и силы тока он позволяет электромагниту достичь нужного значения магнитной силы;

6) Мультиметр DT-838 с термопарой типа ХК (позиция 6). С их помощью происходит измерение температуры в рабочей зоне установки, а также места контакта ферромагнитных частиц с поверхностью полимера.

### 3.3 Методика проведения экспериментов

Эксперимент для определения параметров технологии металлизации поверхности полимеров проводится следующим образом: металлизуемая поверхность полимера размещается в горизонтальной плоскости, под ней в непосредственной близости устанавливается электромагнитная система. На обмотку электромагнита подаётся «поддерживающее» напряжение и соответствующее значение тока (0,5-1 А) для предотвращения уноса ферромагнитного порошка под воздействием внешних факторов. Затем на

поверхность равномерно наносится ферромагнитный порошок методом ручного насыпания (данный метод приемлем в условиях экспериментальных исследований), затем электромагнитная система переводится в режим «силового удержания» (сила тока – 1-2 А). Далее включается теплогенератор и после достижения на поверхности необходимой температуры (483-513 К), при которой образуется жидкофазный слой толщиной до 60-70 мкм, электромагнитная система включается в режим внедрения (сила тока – 4-4,5 А). Уноса частиц при включенной магнитной системе не происходит, так как создаваемой магнитной силы достаточно, чтобы удерживать их в области армирования. Глубина расплавленного поверхностного слоя составляет 60 мкм, вязкость расплава  $2 \cdot 10^4$  Па·с. Это определяется температурой поверхности, низкой теплопроводностью полимера и временем теплового воздействия. По истечении технологического периода источник тепла выключается, электромагнитная система кратковременно включается в режим «дожатия» (т.е. сила тока увеличена по сравнению с режимом внедрения – 5-5,5 А), после чего поле отключается, полимерная деталь снимается с установки и удаляются не внедренные частицы порошка (так называемый «излишек насыпки»). Вследствие высокой температуры плавления никеля (1726 К) исключается слипание частиц не внедренного порошка после эксперимента. Охлаждение армированной поверхности ведется до естественного конвективного теплоотвода от нагретого изделия в окружающую среду [120,121].

Магнитное поле создается сердечником из электротехнического железа и расположенным вокруг него соленоидом, по которому пропускается ток. Тепловое поле создается тепловой пушкой, имеющей возможность изменения температуры от 373 до 873 К и трехступенчатого регулирования скорости нагретого воздушного потока (9,8...12 м/с). При оптимальных для процесса металлизации параметрах (при которых отсутствуют деструкция поверхности, конгломераты порошка, подплавление глубинных слоёв полимера), определённых из предварительных экспериментов (температура 450-513 К, напряжение магнитной системы – 10 В, сила тока – 4 А), градиент теплового

поля составляет 6 К/см. Площадь поперечного сечения теплового потока составляет 300 мм<sup>2</sup>.

Как отмечалось ранее в главе 2, слипаемость частиц никеля между собой незначительна, вращение частицы отсутствует из-за действующего магнитного поля (а также из-за того, что частица внедряется в расплавленную поверхность полимера на очень малое расстояние с малой скоростью) [122,123].

В качестве дополнительного исследования проводились эксперименты на трение и износостойкость поверхности. В качестве «ответной детали» в опытах использовались деталь из стали 10, а также образцы из эпоксидной смолы. Изменение структуры поверхности после триботехнического воздействия и изучение микроструктуры проводилось с помощью оптического микроскопа МБС-9.

### 3.4 Выбор исходных материалов для исследований

Исходными материалами для экспериментов стали порошки железа ПЖВ (размерность 60 мкм) и никеля ПНК–УТЗ (размерность 40 мкм). Их сравнительные ключевые характеристики приведены в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики исходных ферромагнетиков

| Металл или сплав-ферромагнетик | Температура Кюри, К | Намагниченность насыщения $J_s$ , А/м | Относительная магнитная проницаемость $\mu/\mu_0$ | Средняя цена за 1 г порошка (30-70 мкм), рублей | Условный параметр выбора |
|--------------------------------|---------------------|---------------------------------------|---|---|--------------------------|
| Железо                         | 1041                | $1,735 \cdot 10^6$                    | 7000  | 7   | 1,75                     |
| Никель                         | 631                 | $5,09 \cdot 10^5$                     | 1250  | 8   | 2,25                     |
| Кобальт                        | 1403                | $1,445 \cdot 10^6$                    | 320   | 12  | 1,75                     |

Однако при проведении экспериментов от порошка железа было решено отказаться из-за недостаточной жаростойкости при температурах выше 423 К [122]. Также в таблицу не попали ферромагнитные сплавы на основе никеля,

кобальта или железа по причине высокой стоимости за 1 грамм порошка либо недостаточных данных о механических характеристиках (например, кобальт-самариевого сплава КС-37, в дополнение к его повышенной коэрцитивной силе и остаточной индукции). Выбор никеля в качестве материала для магнитотермического армирования поверхности полимера обоснован его стойкостью к окислению, отсутствием склонности к образованию обширных конгломератов спеченных частиц при хранении и транспортировке, а также высокими значениями совокупности механических и магнитных свойств по сравнению с железом (таблицы 2 и 3). Дополнительно вводим условный параметр выбора, измеряемый в баллах. Он состоит из четырех ключевых критериев: твердость, температура начала окисления, магнитная проницаемость и стоимость 1 грамма порошка. Каждый из критериев оценивается в диапазоне 0-3 балла, затем рассчитывается среднее арифметическое как итоговый балл. Чем больше значение, тем более оптимальным является выбор материала.

Таблица 3. Механические характеристики железа и никеля

| Металл | Твердость по Бринеллю, МПа | Ударная вязкость, кДж/см <sup>2</sup> | Предел текучести, МН/м <sup>2</sup> |
|--------|----------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Железо | 490                        | 2                                     | 40                                  |
| Никель | 710                        | 18                                    | 120                                 |

В качестве исходных полимеров выступают образцы из полипропилена Бален 01270 [123]. Фторопласт-4 не выбран по причине высокой температуры плавления, из-за чего в процессе работы экспериментальной установки возможен перегрев магнитной системы от внешнего источника теплового потока.

В качестве деталей для армирования выбраны съёмная лопасть рабочего колеса экспериментального жидкостнокольцевого вакуумного насоса (ЖВН) и прижимное уплотнение вала.

ЖВН получают широкое распространение в сельском хозяйстве. При помощи данных насосов организуется вакуум в доильных, сушильных, экстракционных, измельчительных и других установках. Их конструкция проста и надёжна и при этом они могут откачивать воздух, содержащий пары, капельную жидкость и твёрдые включения. Лопатки рабочего колеса в таких насосах зачастую съёмные и подлежат замене. Однако, поскольку они испытывают значительные нагрузки, выполнять их из неармированных полимерных материалов не представляется возможным, потому что такая конструкция неработоспособна. При этом посредством магнито-термического армирования можно добиваться достаточной прочности и износостойкости поверхности, чтобы полимерные лопатки можно было устанавливать на рабочее колесо ЖВН. При этом лопатки остаются лёгкими с поверхностной твёрдостью и износостойкостью, сопоставимой с соответствующими значениями армирующего ферромагнитного материала [126]. Насосы с такой модификацией будут дешевле и легче. При этом операция армирования не усложнит производство, что делает такое решение актуальным и эффективным.

Аналогичная ситуация обстоит с прижимными уплотнениями. Операция магнито-термического армирования позволит повысить срок службы изделий, что компенсирует разницу в стоимости относительно неармированного изделия.

### 3.5. Проведение экспериментов и обработка полученных результатов

Для оценки основных технологических параметров армирования поверхности полимеров в первую очередь изменяются параметры температуры воздушного потока, скорости истечения воздуха, расстояния между соплом и поверхностью полимерной детали, а также силы тока и напряжения в электромагнитной системе. Дополнительно с целью определения «технологического коридора» применимости этих параметров определяются их максимальные значения. Оценке также подвергаются такие параметры

металлизированной поверхности полимера, как глубина проникновения частиц (определение ведется по видимому среднему размеру внедряемых частиц порошка относительно значения основной фракции), плотность и равномерность распределения порошка (оценка визуальным сканированием с использованием оптического микроскопа), а также величина полученной шероховатости (микроинтерферометром) и изменение массы при моделировании абразивного и триботехнического воздействия на армированную поверхность (лабораторными весами).

В процессе оценки основных технологических параметров проявляется негативное воздействие малого расстояния (менее 100 мм) от среза сопла теплогенератора до поверхности полимера, так как при включении магнитной системы происходит частичный перенос порошка на металлическое сопло теплогенератора, что недопустимо. Впоследствии определяется технологически минимально допустимое значение данного расстояния в 100 мм, при этом существенно большее расстояние резко снижает эффективность работы теплогенератора. Изменение расстояния проводится взаимным смещением по штанге экспериментальной установки в вертикальной плоскости теплогенератора и полимера с магнитной системой, контроль проводился штангенрейсмасом. Также обнаруживается явление оплавления боковых поверхностей полимерной детали, располагающихся по краям от армируемой области, из-за отсутствия теплоотвода на железный сердечник магнитной системы.

Оценка значений тока и напряжения питания магнитной системы проводится цифровым мультиметром в соответствующих диапазонах измерения параметров непосредственно в местах подключения катушки к кабелю, что исключает неточность из-за потерь в кабеле питания. Дополнительно обнаруживается значительный перегрев катушки при работе в режиме «дожатия» более одной минуты, что технологически сокращает длительность использования данного режима или ведет к необходимости

применения адаптированной к возможным условиям работы модифицированной системы соленоида.

Дополнительная оценка механических параметров армированной поверхности термопласта проводится имитацией работы в режиме сухого трения по металлической и полимерной поверхностям. Образец из поверхностно – армированного термопласта подвергается воздействию трения об сухую поверхность детали из стали 10 с усилием  $10 \text{ Н/см}^2$  со скоростью взаимного перемещения  $0,1 \text{ м/с}$  в течение 30 сек. Также проводятся измерения массы полимерной детали до и после воздействия, а также контролируются изменения микроструктуры поверхности до и после имитации воздействия трением. Дополнительно проводится оценка воздействия поверхности детали из реактопласта на модифицированную поверхность термопласта при их взаимном триботехнологическом воздействии. Оценка работоспособности методики на готовых изделиях проводится периодическим контролем состояния и работы установленных в экспериментальный ЖВН модифицированных лопатки и уплотнения вала.



## ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОДБОР МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОБОРУДОВАНИЯ

В данной главе представлены результаты выполненных в рамках диссертационной работы экспериментальных исследований по определению основных режимов и конструктивных параметров, установлены границы эффективных значений процесса магнито-термического армирования, исследованы триботехнические и поверхностно – прочностные характеристики армированных изделий.

### 4.1 Расчет значений сил, оказывающих воздействие на ферромагнитную частицу

Теоретический анализ сил (глава 2, раздел 2.2) и приведенный ниже расчет преследуют две основные цели [103]:

- определить и описать силы, оказывающие заметное воздействие на внедряемую частицу и поверхностный слой полимерной детали в течение всего процесса армирования;
- показать, что внедрение в поверхностный слой полимерной детали ферромагнитной частицы с одновременным применением термического и магнитного полей является возможным.

При этом требуется учесть соотношение сил, т.е. действующие на частицу извне силы (благодаря которым она и внедряется, помимо магнитной составляющей) в сумме должны превосходить те силы, которые препятствуют внедрению в поверхностный слой, находящийся фактически в жидкой фазе.

Далее рассчитаем значения сил, применяя формулы, указанные в разделе 2.2. Размер частицы принимаем равным 40 мкм как наиболее оптимальным с точки зрения качества покрытия, так как более мелкодисперсные фракции не обеспечивают равномерного покрытия из-за склонности к магнитной

коагуляции при включении «удерживающего» режима магнитной системы, более крупные фракции дают повышенную шероховатость армированной поверхности и требуют её дополнительной механической обработки .

Используя формулу (2), вычислим объем частицы:

$$V_{\text{ч}} = \frac{3,14 \cdot (4 \cdot 10^{-5})^3}{6} \approx 3,35 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3 .$$

Как будет показано далее, при проведении экспериментов по армированию использованы порошки никеля и железа, однако в дальнейшем от порошка железа было решено отказаться (см. главу 3, раздел 3.4). Принимая плотность материала частицы (никеля) равной  $8900 \text{ кг/м}^3$ , искомое значение массы частицы, рассчитанное с помощью формулы (3), составит

$$m_{\text{ч}} = 8,9 \cdot 10^3 \cdot 3,35 \cdot 10^{-14} = 2,9815 \cdot 10^{-10} \text{ кг} .$$

Величину  $J$  принимаем равной  $J_s = 6,084 \cdot 10^{11} \text{ А/м}$  (намагниченность насыщения никеля).

Принимая во внимание все приведенные ранее допущения, определяем магнитный момент  $M_{\text{ч}}$  частицы по формуле (7):

$$M_{\text{ч}} = 6,084 \cdot 10^{11} \cdot 3,35 \cdot 10^{-14} = 2,038 \cdot 10^{-2} \text{ А} \cdot \text{м}^2 .$$

Значение напряженности магнитного поля, как будет показано в разделе 4.2, составляет  $4,2 \cdot 10^4 \text{ А/м}$ . Учитывая данное значение, с помощью формулы (8) получим удельную магнитную восприимчивость частицы никеля:

$$\chi_{\text{уд}} = \frac{2,038 \cdot 10^{-2}}{3,35 \cdot 10^{-14} \cdot 4,2 \cdot 10^4 \cdot 8,9 \cdot 10^3} = 1,252 \cdot 10^3 = 1252 .$$

Далее, с учетом всего рассчитанного ранее, находим  $F_{\text{магн}}$  по формуле (1):

$$F_{\text{магн}} = \frac{1,252 \cdot 10^3 \cdot 3,35 \cdot 10^{-14} \cdot 7,5 \cdot 10^{-2} \cdot 8}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}} = 2,01 \cdot 10^{-5} \text{ Н.}$$

Чтобы рассчитать значения сил, которые не связаны с магнитным полем, предварительно учтем ранее принятое допущение, гласящее, что поверхностный слой полимера представляется как покоящаяся высоковязкая ньютоновская жидкость. Помимо этого, при расчете немагнитных сил требуется принять во внимание значения следующих величин (некоторые из них уже приводились ранее) [103]:

- скорость движения частицы  $v_{\text{ч}} = 20$  мкм/мин или  $0,33 \cdot 10^{-6}$  м/с;
- динамическая вязкость расплавленного полипропилена  $\mu = 2 \cdot 10^4$  Па·с;
- коэффициент сопротивления воздуха для сферы  $c = 0,3$ ;
- плотность воздуха  $\rho_{\text{возд}} = 1,225$  кг/м<sup>3</sup>;
- коэффициент поверхностного натяжения расплава полипропилена  $\sigma = 2,5 \cdot 10^{-2}$  Н/м;
- глубина внедрения частицы  $l_{\text{вн}} = 30$  мкм или  $3 \cdot 10^{-5}$  м;
- плотность расплава полипропилена  $910$  кг/м<sup>3</sup>;
- индекс расплава полипропилена –  $0,02 \dots 0,5$  г/мин;
- показатель текучести расплава полипропилена (ПТР) –  $0,29 \dots 0,35$  г/мин;
- скорость потока воздуха  $v_{\text{возд}} = 7,5$  м/с согласно полученным с помощью анемометра экспериментальным данным;
- площадь поперечного сечения частицы  $S_{\text{н.с.ч}} = 12,56 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>.

Сначала найдем силу тяжести по стандартной формуле (9):

$$F_{\text{тяж}} = 2,9815 \cdot 10^{-10} \cdot 9,81 = 2,925 \cdot 10^{-9} \text{ Н.}$$

Приняв во внимание рассчитанное ранее значение магнитной силы, приходим к выводу, что утверждение о преобладании магнитной силы над силой тяжести является верным, полностью согласовываясь с расчетами, что также подтверждает правильность формулы расчета магнитной силы.

Значение архимедовой силы найдем по формуле (10):

$$F_A = 9,1 \cdot 10^2 \cdot 9,81 \cdot 3,35 \cdot 10^{-14} = 2,99 \cdot 10^{-10} \text{ Н.}$$

Далее рассчитываем силу давления потока воздуха на частицу по формуле (11)

$$F_{\text{дав}} = 0,3 \cdot 12,56 \cdot 10^{-10} \cdot 1,225 \cdot \frac{(7,5)^3}{2} = 1,947 \cdot 10^{-7} \text{ Н.}$$

В соответствии с формулой (12) для нахождения значения силы трения в покоящейся вязкой жидкости расчетное значение составит

$$|F_{\text{тр}}| = |-6 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-5} \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 0,33 \cdot 10^{-6}| = 2,487 \cdot 10^{-6} \text{ Н.}$$

С учетом ранее принятого допущения определяем силу поверхностного натяжения, используя формулу (13):

$$F_{\text{н.н.}} = 2,5 \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{-5} = 7,5 \cdot 10^{-7} \text{ Н.}$$

Далее определим силу сопротивления среды по формуле (14) [101]:

$$F_{\text{сопр}} = 9,1 \cdot 10^2 \cdot 12,56 \cdot 10^{-10} \cdot (0,33 \cdot 10^{-6})^2 = 12,45 \cdot 10^{-20} \text{ Н.}$$

Приведенные результаты расчета полностью согласуются с выдвинутой ранее гипотезой о превосходстве сил внедрения над силами противодействия со стороны расплава полимера, а также показывают, в каком соотношении находятся все обозначенные силы. Значительное превосходство сил внедрения дает возможность максимально надежно зафиксировать ультрадисперсные частицы ферромагнитного материала в поверхностном слое термопластичного полимера, что обеспечивает детали поверхностные характеристики, сопоставимые с таковыми у исходных металлов или сплавов. Такие армированные полимерные детали будут работать в узлах машин и механизмов сельскохозяйственной техники дольше и с меньшим количеством поломок.

#### 4.2 Исследование градиентов теплового и магнитного полей

Известно, что при постоянном расходе воздуха тепломассоперенос может быть описан соответственно как стационарное трёхмерное температурное поле. Это поле в общем случае задаётся уравнением, связывающим значение температур в каждой точке теплового поля со значением координат этой точки и имеет вид соотношения, зависящего от координат пространства по отношению к точке источника тепла:  $t = t(x, y, z)$  [127,128].

В окрестности данной точки – источника тепла (подразумевается выходное отверстие теплового пистолета) температура изменяется во всех направлениях, не совпадающих с касательной к изотерме. При этом наиболее резкое изменение температуры имеет место в направлении по нормали к изотермической поверхности (рисунок 27).

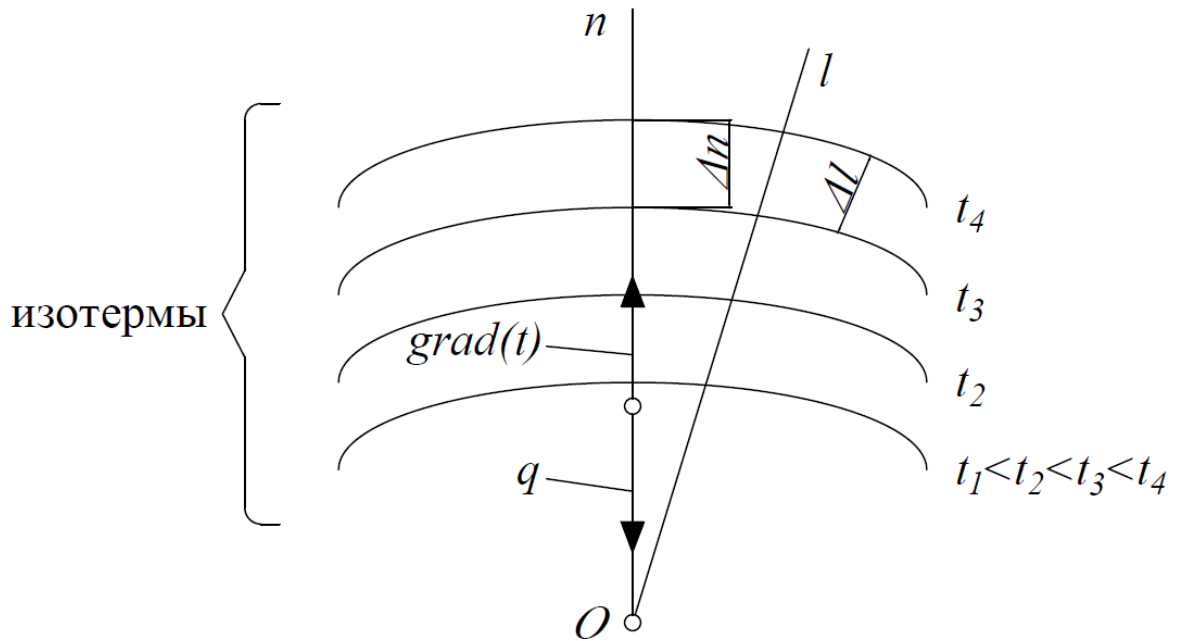


Рисунок 27. Графическое представление изменения температуры при удалении источника тепла от поверхности пластины полимера

Воспользуемся понятием градиента температуры как производной значения  $t$  по нормали к изотермической поверхности:

$$\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta t}{\Delta n} \right) = \frac{\partial t}{\partial n} = \mathit{grad}t. \quad (57)$$

Значение  $\mathit{grad}t$  можно определить из графика (рисунок 28), показывающего изменение температуры в зависимости от расстояния от торцевой поверхности сопла теплового пистолета до поверхности полимерной пластины. При этом площадь поперечного сечения сопла равна  $0,0015 \text{ м}^2$ .

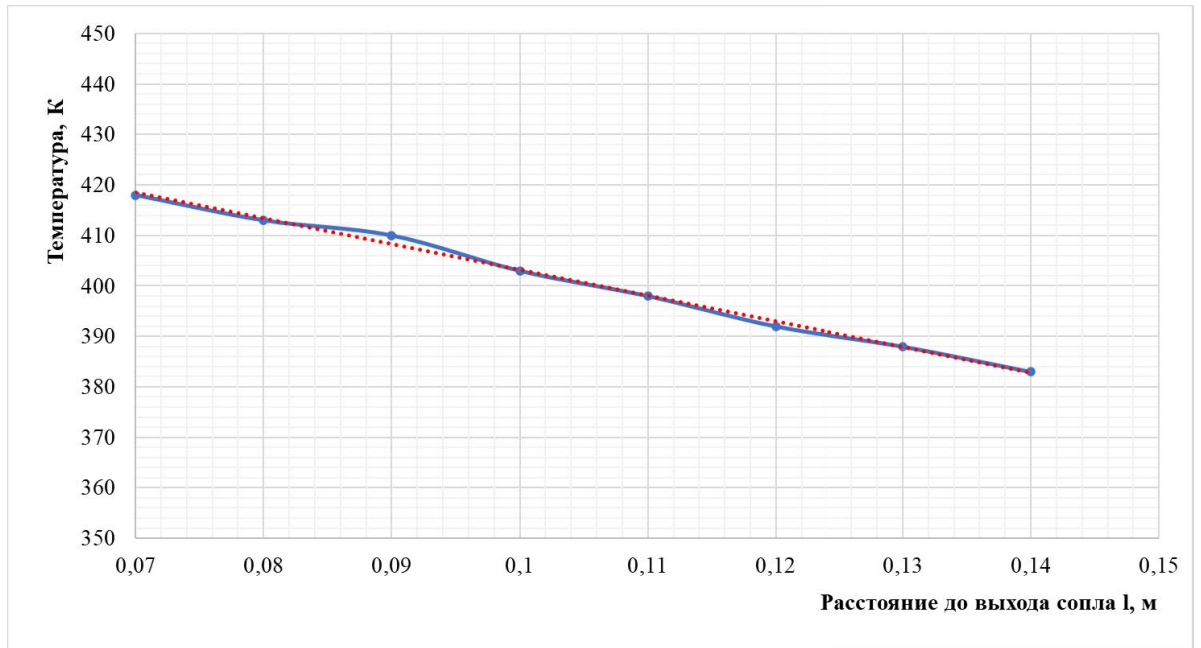


Рисунок 28. Зависимость температуры на поверхности пластины от расстояния до выхода сопла: линия с маркерами – экспериментальные данные, пунктир – рассчитанная зависимость на основе экспериментальных данных.

Оптимальное расстояние от среза сопла до поверхности полимерного образца выбирается в зависимости от свойств полимера и способности металлического порошка удерживаться на поверхности магнитным полем. Исходя из этого, оптимальное расстояние от торцевой поверхности сопла источника тепла при постоянном расходе воздуха 350 л/мин. и температуре у сопла 513 К составляет 100 мм [127,128]. На таком расстоянии сохраняется температура не менее 453 К воздействующего на полимер теплового потока, а обеспечивается достаточное проникновение частиц никелевого порошка со средней дисперсностью частиц 40-60 мкм в поверхность полипропилена, а также практически отсутствует влияние магнитного поля катушки на металлические части теплового генератора.

В ходе эксперимента перпендикулярно цилиндрической поверхности сердечника катушки (на поверхность поперечного сечения) устанавливается образец полимерной пластины, затем на катушку подавался ток и создавалось магнитное поле. Далее на пластину помещаются частицы порошка никеля,

которые тут же захватывались магнитным полем катушки. После включения источник тепла, устанавливается необходимая температура теплового потока. Далее в течение 30-60 секунд осуществляется нагрев частиц порошка никеля и поверхности полимерной пластины с одновременным контролем температуры. Масса полимерных пластинок до и после экспериментов измеряется высокоточными лабораторными весами ВЕСТА АВ210-01.

Поскольку на внедряемый порошок оказывает влияние, помимо температуры, и магнитное поле, то определяется его оптимальные параметры – в частности, напряженность. Для выбора оптимального значения этого параметра рассматривается понятие магнитного поля около проводника (или внутри катушки). Оно тем больше, чем больше ток  $I$  и число витков  $\omega$  катушки. Если число витков катушки остаётся постоянным, озвученная величина зависит от силы тока [127,128].

Напряжённость магнитного поля  $H$  в любой точке пространства тем больше, чем больше произведение  $I \cdot \omega$  и чем меньше длина магнитной линии  $l$  [115]:

$$H = \frac{I \cdot \omega}{l} \quad (58)$$

Также напряженность магнитного поля определяется по следующему соотношению:

$$\bar{H} = \frac{\bar{B}}{\mu_0} - \bar{J} \quad (59)$$

где  $\bar{B}$  – вектор магнитной индукции,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м (Н/А<sup>2</sup>) – магнитная постоянная,  $\bar{J}$  – вектор намагниченности среды в исследуемой точке поля, кА/м.



Исходя из вышеуказанных соотношений, можно рассматривать зависимость индукции магнитного поля от расстояния от торца сердечника катушки с током (рисунок 29).

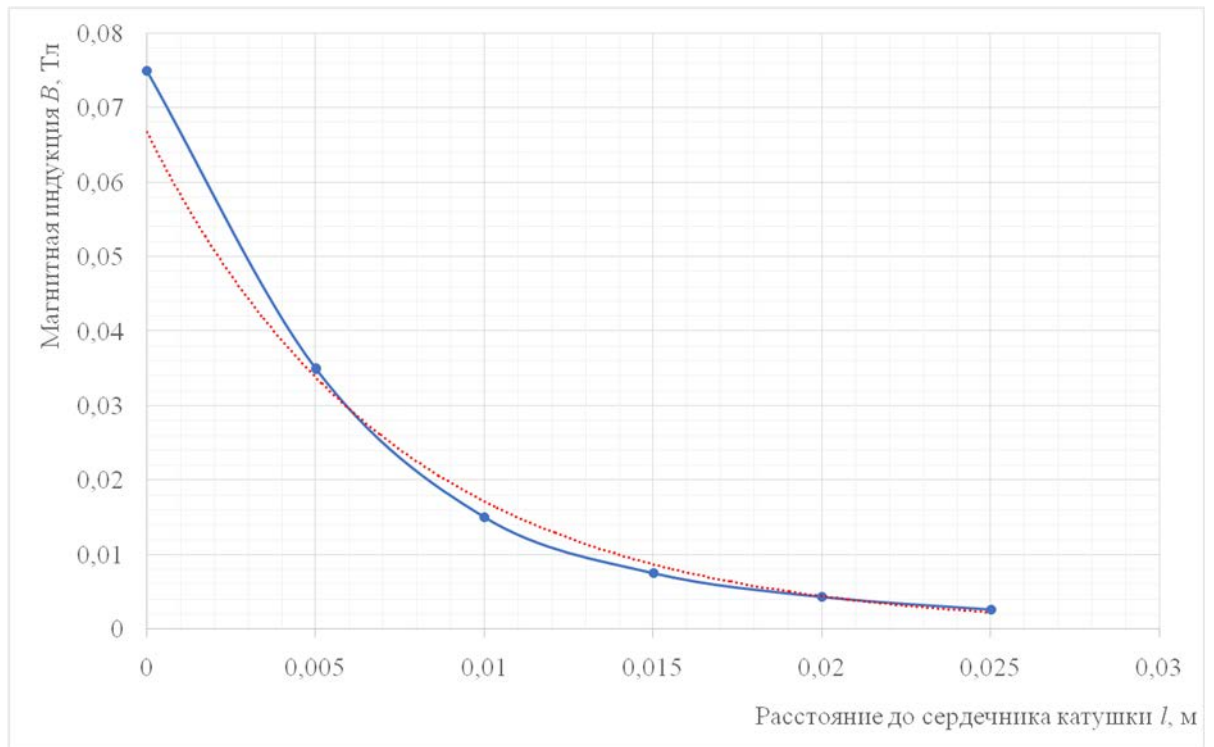


Рисунок 29. Зависимость индукции магнитного поля от расстояния до сердечника катушки: пунктир – расчетная зависимость, линия с маркерами - экспериментальные данные.

Изменение величины магнитной индукции в приближении можно описывать как линейную зависимость. Однако в общем виде при анализе значения индукции во всем диапазоне расстояний зависимость предстает как экспоненциальная, и выводится с помощью программы Excel, встроенной в пакет Microsoft Office, используя прилагающийся инструмент вычисления зависимостей с помощью метода наименьших квадратов:

$$y = 667,64e^{-1,36x}, \quad (60)$$

Градиент в самом общем виде – это величина, численно равная скорости изменения какого-либо параметра в выбранном направлении. Соответственно, с учетом указанного ранее диапазона расстояний (при этом форма детали не имеет большого значения) и приближенно линейной зависимости скорость изменения магнитной индукции рассчитывается по формуле

$$v_{изм.В} = \frac{B_0 - B_l}{l}, \quad (61)$$

где  $B_0$  – магнитная индукция на торце сердечника электромагнита, Тл;

$B_l$  – магнитная индукция в исследуемой точке, Тл;

$l$  – расстояние от исследуемой точки до торца сердечника электромагнита, м.

Таким образом, выбрав крайние точки выбранного участка и определив зависимость как приближенно линейную, находим по формуле (3) быстроту изменения магнитной индукции:

$$v_{изм.В} = \frac{0,075 - 0,035}{0,005} = 8 \text{ Тл/м}.$$

Так как толщина пластин не превышала 2 мм, то значение индукции катушки у торца магнитного сердечника принималось равным 0,00413 Тл. Экспериментально подтверждено, что при меньших значениях индукции процесс внедрения частиц ферромагнитного порошка в нагретую поверхность термопластичного полимера практически не происходит, независимо от температуры нагрева.

### 4.3 Исследование характеристик полученных образцов

В ходе начальных экспериментов подтверждается явление механического внедрения частиц порошка никеля внутрь нагретой до 463-473 К поверхности полимерной пластины. Этот эффект был существенно усиливается действием магнитного поля. При увеличении значения напряжённости магнитного поля (больше значение магнитной индукции  $B$ ), процесс внедрения протекает значительно эффективнее.

Было установлено, что на интенсивность внедрения порошка никеля влияет шероховатость поверхности полимерного образца. Так, на изначально гладкой (не обработанной) поверхности пластины, эффекта внедрения практически не наблюдается вследствие пониженной поверхностной энергии полимера. Площадь поверхности пластины, занимаемой внедренными частицами порошка никеля, составляет менее 10% от общей площади поверхности полимерного образца. Масса образца также практически не увеличилась – с 0,254 г до 0,257 г, что можно расценивать как погрешность измерения.

Для улучшения внедрения частиц порошка никеля внутрь поверхности полимерной пластины на поверхности полимерных образцов создается шероховатость поверхности со значениями от 5 до 15 мкм.

Микроструктура поверхности образца с шероховатостью 40 мкм, подвергнутого магнито-термическому воздействию (напряжение 4 В, силы тока 2,4 А, итоговое значение магнитной индукции  $B$  – 0,00413 Тл) представлена на рисунке 30.

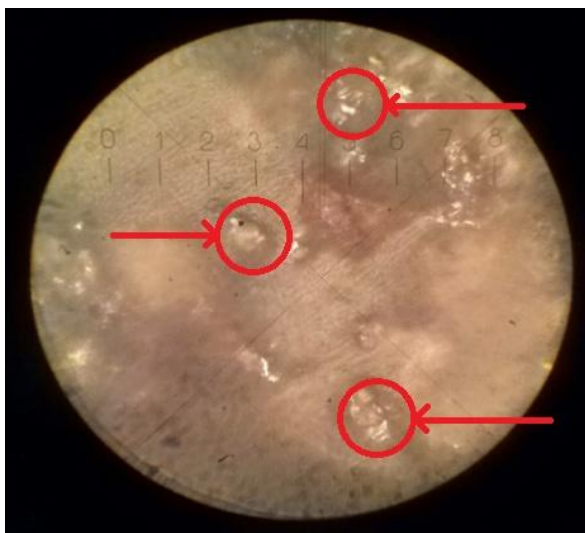


Рисунок 30. Вкрапления частиц никелевого порошка после магнитотермического воздействия на пластину из ПП шероховатостью 40 мкм. Увеличение  $500\times$  (использован микроинтерферометр МИИ-4 в режиме металлографического микроскопа).

В результате (рисунок 30) плотность внедрённых частиц порошка никеля значительно повысилась, при этом равномерность распределения осталась без визуально заметных изменений. Анализ поверхности на микроинтерферометре МИИ-4 показал среднюю глубину проникновения частиц в 40 мкм, исходя из высоты перепадов профиля поверхности внедрённых частиц и размерности средней фракции порошка никеля. Масса образца увеличилась на 10,7% - с 0,242 г до 0,268 г.

Предположительно существующую неравномерность распределения проникших частиц порошка никеля в поверхность полимера можно объяснить неравномерным распределением теплового поля внутри нагретого воздушного потока теплогенератора и использованием насадки из стального сплава, что повлекло за собой её намагничивание во время проведения эксперимента [127,128].

В следующем опыте температура снижается до 453-463 К, а индукция магнитного поля была доводится до 0,075 Тл, при этом катушка работала на более высоких, чем номинальные, значениях напряжения (8,6 В) и силы тока (5

А). Время воздействия составляет 40 секунд, материал пластины – ПП. Микроструктура поверхности образца представлена на рисунке 31.

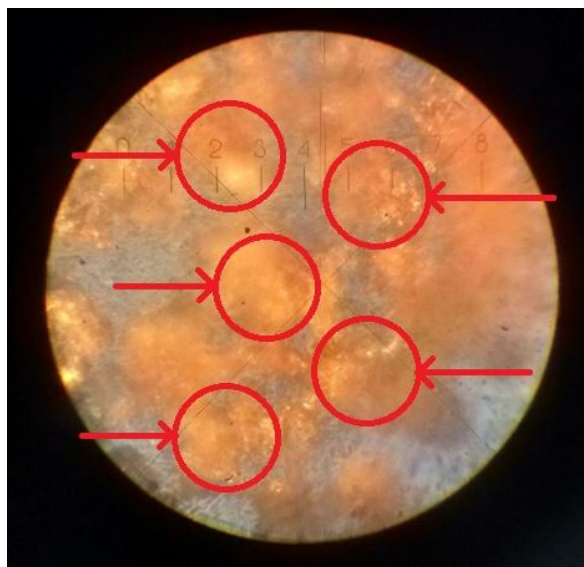


Рисунок 31. Микроструктура поверхности образца после третьего эксперимента. Увеличение  $500\times$  (использован микроинтерферометр МИИ-4 в режиме металлографического микроскопа). Шероховатость 80 мкм.

Анализ поверхности полимерного образца показывает (рисунок 30), что проникшие частицы порошка никеля занимают более 50% поверхности, подвергнутой магнито-термическому воздействию. При этом глубина проникновения частиц составляет в среднем 50 мкм. Можно предположить, что равномерность распределения частиц на поверхности образца зависит от температуры, магнитного поля и времени воздействия. Масса исследуемого образца увеличивается на 22% – с 0,312 г до 0,381 г.

Было установлено, что повышение температуры при использовании частиц никелевого порошка приводит к вероятности образования нежелательных окислов, а в сочетании с усилением магнитного поля – к общему укрупнению в конгломераты внедренных частиц порошка после воздействия. Следовательно, компромисс между этими тремя параметрами процесса является важной основой для работоспособности и дальнейшего

развития технологии поверхностного армирования, что предполагает дальнейшие исследования.

В последующих исследованиях для выяснения воздействия проникших частиц ферромагнитных материалов на прочность и износостойкость поверхности полимеров реализуется проникновение этих частиц на разную глубину при различной их дисперсности и изменяемых параметрах воздействия для различных видов полимеров. Такие исследования позволяют создавать новые технологии получения в поверхностных слоях термопластичных и терморезистивных полимеров металлизующих структур, как следствие, новые образцы лёгких и износостойких деталей для различных отраслей. В частности, перспективным направлением применения таких технологий является создание поверхностно армированных лопаток насосов для перекачки жидкостей и лопастей вентиляторов и воздуходувок, подверженных воздействию абразивных частиц различного вида.

По результатам исследований применение магнито-термического способа армирования полимерных материалов позволило достигнуть увеличение массы полимерных образцов (в среднем на 15-20% от массы исходного образца), при этом площадь поверхности, занимаемая частицами порошка никеля, превысила 50 % от площади воздействия. Материал внедряемого порошка должен быть ферромагнитным, а значение индукции магнитного поля в месте внедрения частиц порошка должно составлять не менее 0,004 Тл. Для улучшения эффекта внедрения поверхность полимерной пластины должна иметь шероховатость 40 – 80 мкм. Это увеличивает поверхностную энергию и активизирует процесс магнито-термического проникновения частиц порошка никеля [127,128].

На первом этапе экспериментов, с целью максимального использования энергии магнитного поля полимерные заготовки располагаются на сердечнике электромагнитной катушки. Мощность, подаваемая на неё, при этом составляла в среднем 40 Вт (см. таблицу 4), что обеспечивает среднюю напряженность магнитного поля на поверхности образца 42 кА/м, намагничивающая сила

катушки составила 1920 А-в. В поверхность внедрялся порошок никеля дисперсностью 40 мкм [125-129].

Таблица 4. Значения параметров режимов магнито-термической обработки.

| № п/п | Материал образца | Расст. от сопла до образца, мм | Температура нагревателя $T_{нагр}$ , К | Температура в месте контакта порошка с образцом $T_{обр}$ , К | Сила тока катушки, А | Напряжение катушки | Размерность порошка никеля, мкм |
|-------|------------------|--------------------------------|--|---|----------------------|--------------------|---------------------------------|
| 1     | Полипропилен     | 100                            | 443                                    | 428   | 4                    | 10                 | 40                              |
| 2     | Полипропилен     | 100                            | 443                                    | 413   | 4,03                 | 8,7                | 40                              |
| 3     | Полипропилен     | 100                            | 463                                    | 428   | 4,5                  | 10,3               | 40                              |
| 4     | Полипропилен     | 100                            | 483                                    | 453   | 4                    | 10                 | 40                              |
| 5     | Полипропилен     | 100                            | 513                                    | 483   | 4,7                  | 10,2               | 40                              |
| 6     | Полипропилен     | 100                            | 483                                    | 468   | 4,5                  | 10,5               | 40                              |
| 7     | Полипропилен     | 100                            | 503                                    | 483   | 4                    | 10,5               | 40                              |
| 8     | Полипропилен     | 100                            | 503                                    | 485   | 4,2                  | 10                 | 40                              |
| 9     | Полипропилен     | 100                            | 503                                    | 483   | 1,1                  | 2,5                | 40                              |
| 10    | Полипропилен     | 100                            | 493                                    | 483   | 1                    | 2,2                | 40                              |
| 11    | Полипропилен     | 100                            | 503                                    | 475   | 4                    | 9,7                | 40                              |
| 12    | Полипропилен     | 100                            | 513                                    | 482   | 4                    | 8,5                | 40                              |

Исходя из данных первых трех строк таблицы и изучения микроструктуры поверхности, стабильное внедрение частиц никелевого

порошка не происходит вследствие малой температуры поверхности полимерного образца.

Перед началом экспериментов анемометром МС-13 проводятся измерения скорости потока на трех режимах работы генератора. После анализа результатов выбирается первый режим работы генератора теплового потока (скорость потока воздуха составила 7,5 м/с) и расстояние от поверхности образца до сопла генератора в 100 мм. Превышение этого расстояния в пределах области намагничивания приводит к нарушению стабильности распределения частиц, уменьшение (из-за слишком большой скорости) – к расплавлению предварительно созданной шероховатости поверхности заготовки, что, в свою очередь, повышает поверхностное натяжение и поверхностную энергию и делает невозможным впавление ферромагнитных частиц в поверхность.

Дополнительно необходимо отметить, что во время проведения экспериментов значительная часть тепла передается в железный сердечник электромагнита и тем самым затрудняет внедрение частиц в намагничиваемой области, несмотря на то, что толщина образцов была малой. При этом, как показано на рисунке 32, ясно различимы подплавленные области поверхности заготовки с вкраплениями частиц порошка.

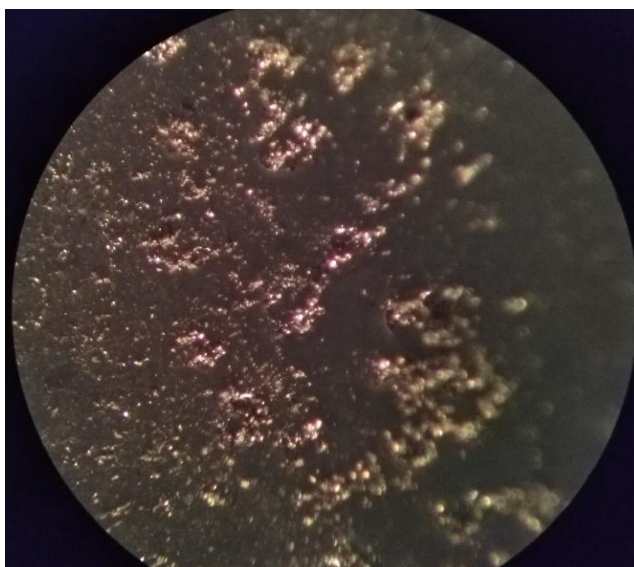


Рисунок 32. Микроструктура поверхности образца.



Указанная выше скорость потока воздуха позволяет повысить стабильность как расположения частиц, так и распределения этих же частиц по поверхности заготовки, при этом подплавление поверхности не обнаруживается. Тем не менее, оставалась проблема возникшей из-за отвода тепла на сердечник электромагнита нестабильности распределения внедренных частиц в области намагничивания, для чего между электромагнитом и нижней поверхностью образца был оставлен зазор 1,5 мм. Равномерный прогрев образца (рисунок 33) как следствие резкого снижения теплоотвода дополнительно повышает стабильность распределения внедренных ферромагнитных частиц при малом снижении плотности магнитного поля (порядка 5-7%) [127,128].

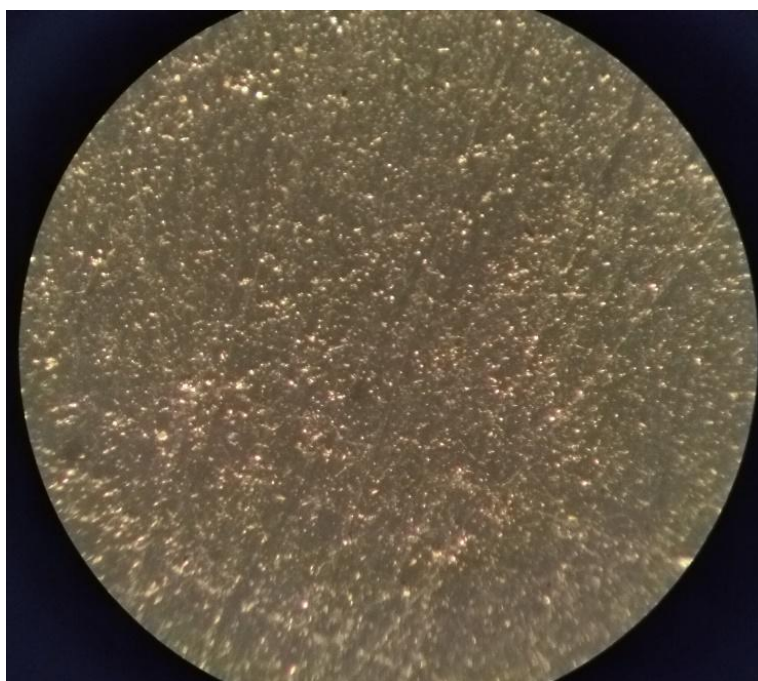


Рисунок 33. Микроструктура поверхности образца полипропилена. Увеличение  $500\times$  (использован микроинтерферометр МИИ-4 в режиме металлографического микроскопа).

После процедуры армирования с целью выявления при последующем макроскопическом исследовании вырывания частиц с поверхности проводится первичное триботехническое воздействие на поверхность усилием 10 Н. В

течение 30 секунд образец подвергается сухому трению о поверхность пластины из стали 10 со скоростью 0,1 м/с. Результат этого воздействия показан на рисунке 34.

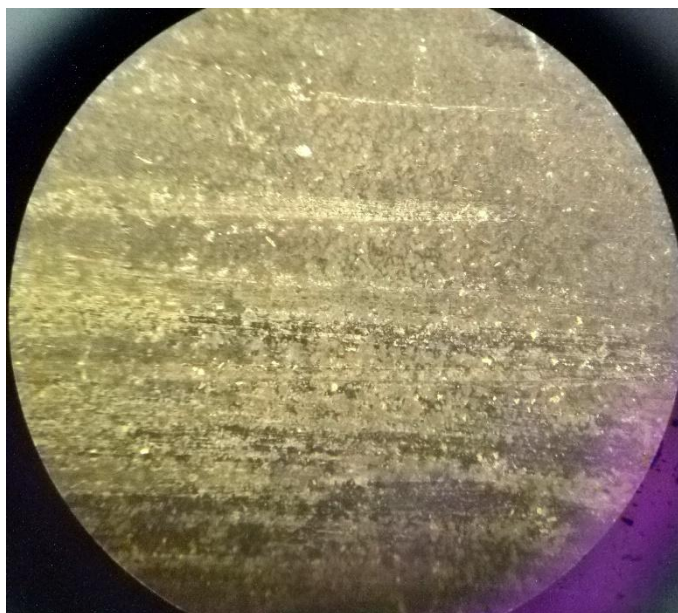


Рисунок 34. Поверхность пластины из стали 10 после первичного триботехнического воздействия.

Вырывания частиц с поверхности армированного образца не происходит, что говорит о положительном результате эксперимента и достаточной прочности внедрения частиц в поверхность полимера. Поверхность полимерного образца после эксперимента показана на рисунке 35.

О количестве внедряемого в поверхность полимеров металла и о средней плотности распределения частиц можно судить, проанализировав изменение массы образцов (см. таблицу 5). Площадь намагничиваемой поверхности и дисперсность частиц порошка при этом остаются неизменны.

Таблица 5. Изменение массы образцов после обработки.

| № п/п | Начальная масса образца, г | Масса образца после обработки, г | Размерность порошка никеля, мкм |
|-------|----------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 1     | 2,42                       | 2,45                             | 40                              |
| 2     | 2,20                       | 2,20                             | 40                              |
| 3     | 2,20                       | 2,22                             | 40                              |
| 4     | 2,20                       | 2,25                             | 40                              |
| 5     | 2,10                       | 2,15                             | 40                              |
| 6     | 2,50                       | 2,57                             | 40                              |
| 7     | 2,00                       | 2,11                             | 40                              |
| 8     | 1,90                       | 2,15                             | 40                              |
| 9     | 2,00                       | 2,20                             | 40                              |
| 10    | 2,30                       | 2,45                             | 40                              |

Таким образом, на основании анализа полученных данных по исследованиям выявляются следующие параметры максимально эффективной реализации процесса магнито-термического армирования поверхности полипропиленовых заготовок:

- напряженность магнитного поля  $H=42$  кА/м;
- температура воздуха на выходе из сопла  $T_{нагр}=483-513$  К;
- расстояние между срезом сопла и заготовкой 100 мм;
- сила тока  $I=4$  А, напряжение  $U=10$  В.

Данные параметры обеспечивают температуру материала на поверхности контакта с порошком 473 К при отсутствии визуально заметного размягчения подповерхностных слоёв образца. Дополнительное магнитное усилие «дожатия» при напряжении на катушке 12 В и токе 5,5А в после отключения теплогенератора позволяет получать увеличение плотности заполнения поверхности полимера частицами до 80 и более процентов (рисунок 34)

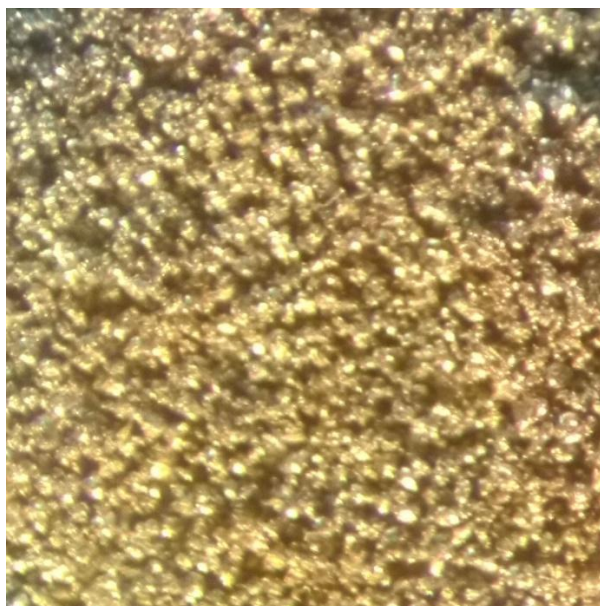


Рисунок 35. Поверхность термопластичного полимера при армировании порошком никеля с использованием «магнитного усилия дожатия». Увеличение 500<sup>x</sup> (использован микроинтерферометр МИИ-4 в режиме металлографического микроскопа).

Итоговые значения объёмных и поверхностных свойств полимеров до и после армирования наглядно представлены на рисунках 36-39 (дополнительные сведения приведены в приложении Г).

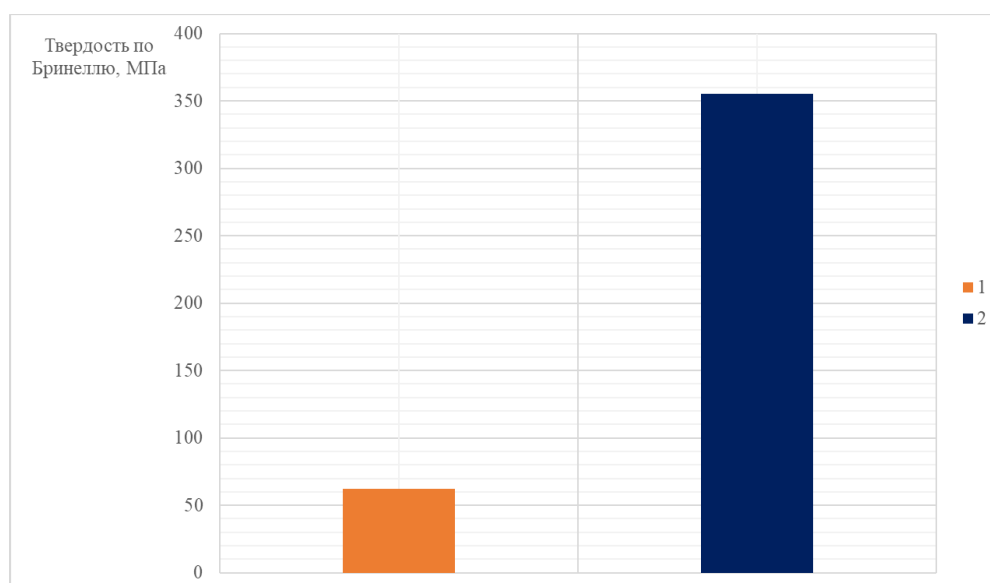


Рисунок 36. Значения твердости исходного (1) и армированного (2) образцов из полипропилена.

Видно, что твёрдость поверхности после армирования сопоставима с твёрдостью армирующего материала. Расхождение в твёрдости возникает из за попадания индентора между частицами никелевого порошка.

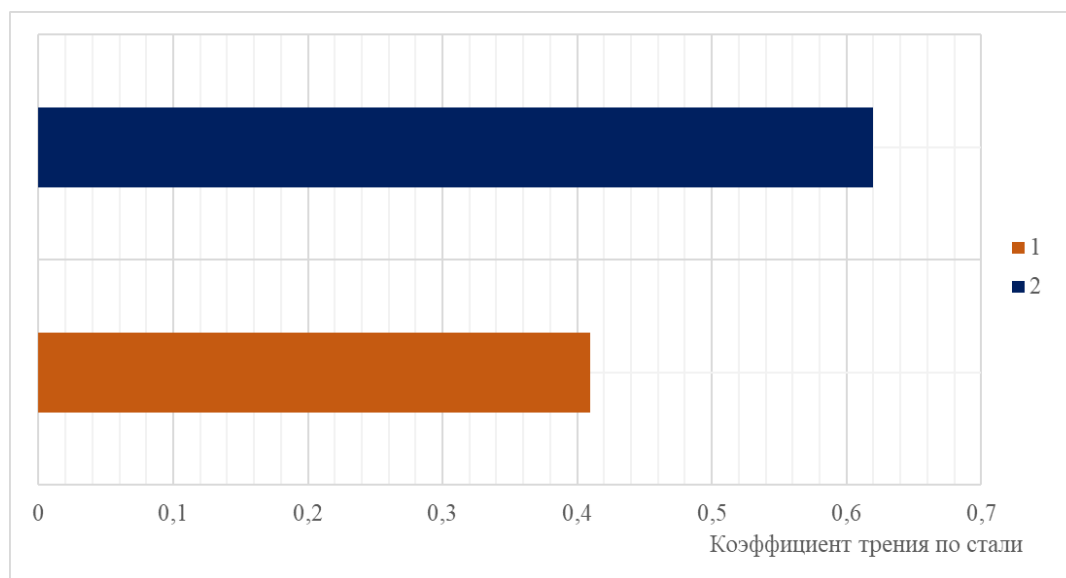


Рисунок 37. Средние значения коэффициента трения по стали исходного (1) и армированного (2) образцов из полипропилена.

Повышение коэффициента трения при армировании поверхности обусловлено физическими характеристиками сравниваемых материалов.

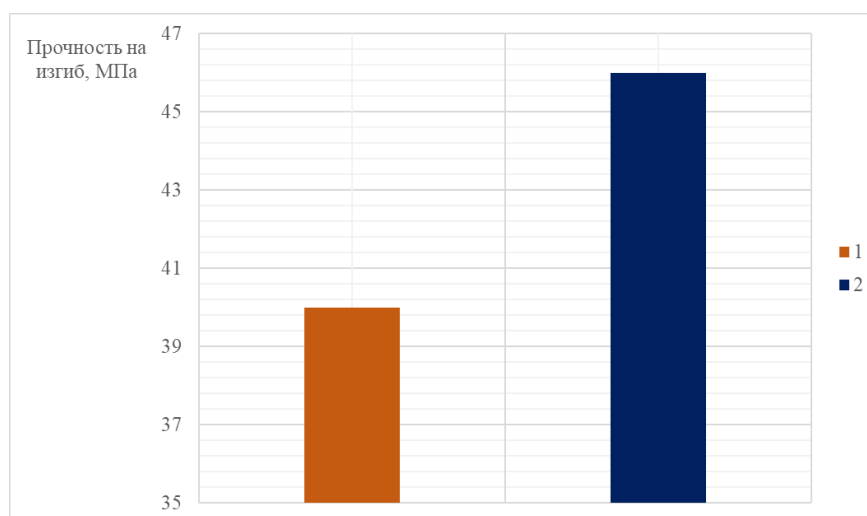


Рисунок 38. Средние значения предела прочности на изгиб исходного (1) и армированного (2) образцов из полипропилена.

Прочность при армировании повышается в случае изгиба армированной пластины в случае, когда модифицированная никелем поверхность работает «на сжатие».

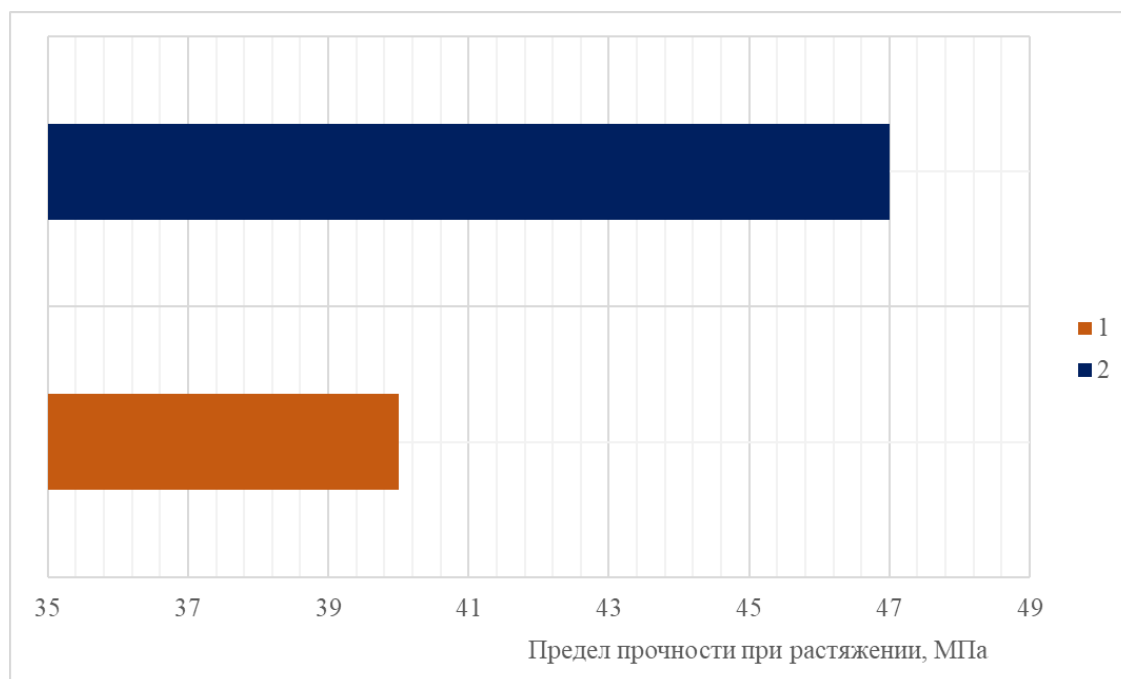


Рисунок 39. Средние значения предела прочности на растяжение исходного (1) и армированного (2) образцов из полипропилена.

Повышение прочности на растяжение обусловлено практически отсутствующим растяжением внедрённых частиц никеля, удерживаемых структурированным полимером и сцепленным с ними за счёт высокой поверхностной энергии частиц никеля и расплавленной поверхности полимера.

При модификации поверхности термореактивных полимеров отсутствует необходимость подогрева поверхности по причине осуществления внедрения частиц порошка в процессе формования требуемой детали, что дает возможность использовать только электромагнитную систему. Для оценки получаемого покрытия используем в качестве заготовки двухкомпонентный состав ЭДП на основе эпоксидной смолы и помещаем его в стальную форму с соответствующей габаритам желаемой детали внутренней поверхностью вплоть до ее заполнения. Электромагнитная система, взаимодействуя с формой,

превращает ее в так называемый «магнитный аккумулятор», при этом напряженность поля такая же, как и в предыдущих экспериментах. После застывания и извлечения образца из формы проводится микроскопическое изучение полученной поверхности (рисунок 40).

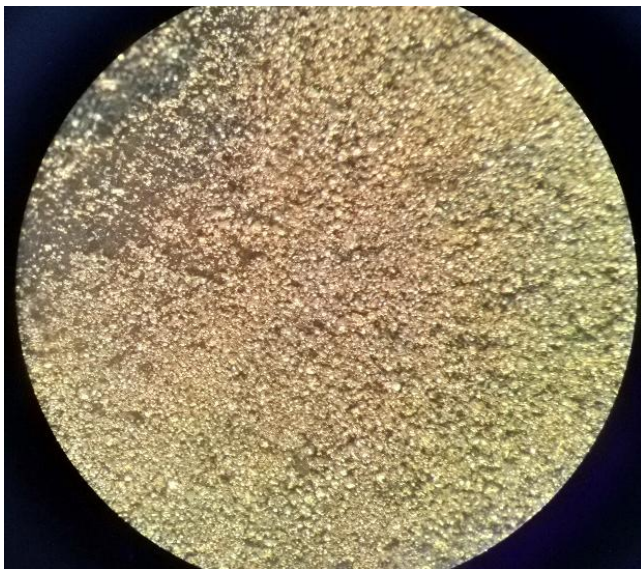


Рисунок 40. Микроструктура поверхности образца термореактивного полимера магнито-термического воздействия. Увеличение  $100\times$ .

Как показывают эксперименты, что при организации в процессе запрессовки удельного давления  $50 \text{ Н/см}^2$ , порошок замазает не менее 95% общей площади, что говорит о полном его внедрении в поверхность [130]. Измерение массы и структуры образца после воздействия на его поверхность трением по поверхности детали из дюралюминия Д16 с удельным усилием  $10 \text{ Н/см}^2$  и скоростью  $0,1 \text{ м/с}$  в течение 30 секунд показало, что изменение массы и плотности распределения порошка у образца отсутствует, благодаря чему можно судить о достаточной прочности удержания частиц на поверхности. На дюралюминиевой детали после изучения её поверхности под микроскопом проявляются следы абразивного износа. Это говорит о том, что поверхностная твёрдость армированного полимера превышает твердость сплава Д16 и сопоставима с твердостью стали 10 с учетом предыдущей первичной оценки (рисунок 41).

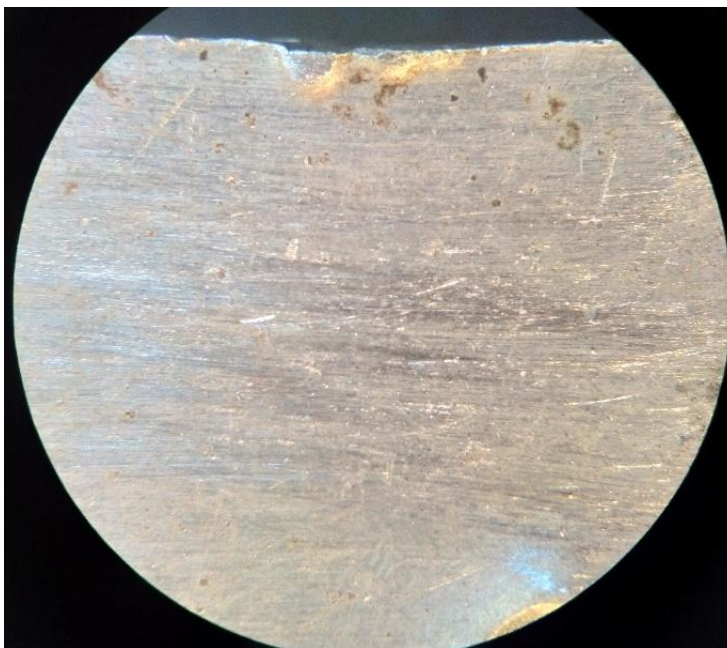


Рисунок 41. Поверхность образца из сплава Д16 после абразивного воздействия армированного образца терморективного пластика. Увеличение  $30\times$ .

Полученные данные показывает необходимость активного проведения дополнительных исследований, направленных на расширение сферы применения данной технологии и отработку процесса внедрения частиц других размеров основных фракций ферромагнетика и металлизацию поверхности образцов термопластичных и терморективных полимеров [129,130].

#### 4.4 Метрологическая оценка достоверности

В процессе металлизации поверхности основной задачей является внедрение частиц ферромагнитных материалов в поверхностные слои изделий из термопластов, при этом слои находятся в состоянии расплава и рассматриваются как очень вязкая жидкость.

Основой математической модели является баланс сил, внедряющих частицу в полимер и противодействующих этому внедрению со стороны поверхности. Для упрощения обозначаем та как  $F_{вн}$ , тогда достоверность



может быть рассчитана через оценку влияния погрешности определения каждого из факторов (в правой части уравнения) на общие показатели:

$$\Delta F_{\text{ВН}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial F}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i \right)^2} . \quad (62)$$

Исходя из погрешности определения параметров воздействия на внедряемую в полимер частицу, принимается:

- 1) погрешность определения температуры  $\Delta T = \pm 2^\circ\text{C}$ ;
- 2) погрешность установки расстояния от сопла теплогенератора до поверхности  $\Delta l = \pm 1$  мм;
- 3) погрешность измерения скорости потока  $\Delta v_{\text{возд}} = \pm 0,1$  м/с;
- 4) погрешность установки тока питания катушки  $\Delta I = \pm 0,1$  А;
- 5) погрешность установки напряжения питания катушки  $\Delta U = \pm 0,1$  В;
- 6) погрешность измерения времени воздействия  $\Delta t = \pm 1$  с;
- 7) погрешность измерения массы частицы  $\Delta m_{\text{ч}} = \pm 0,1 \cdot 10^{-10}$  кг;
- 8) погрешность измерения радиуса частицы  $\Delta r = \pm 0,1 \cdot 10^{-5}$  м;
- 9) погрешность измерения магнитной индукции  $\Delta B = \pm 0,002$  Тл;
- 10) погрешность определения плотности расплава полипропилена  $\Delta \rho_{\text{ПП}} = \pm 15$  кг/м<sup>3</sup>;
- 11) погрешность определения площади поперечного сечения частицы  $\Delta S_{\text{п.с.ч}} = \pm 0,2 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>;
- 12) погрешность определения скорости движения частицы в расплаве полимера  $\Delta v_{\text{ч}} = \pm 0,1 \cdot 10^{-7}$  м/с;
- 13) погрешность определения динамической вязкости расплава полипропилена  $\Delta \mu_{\text{ПП}} = \pm 0,1 \cdot 10^4$  Па·с.

Принимая во внимание, что погрешность установки и определения тока и напряжения питания катушки электромагнита входит в погрешность измерения

магнитной индукции, а погрешность определения радиуса – в погрешность определения площади поперечного сечения, получаем:

$$PF_{BH} = f(PII, PI, P\nu_{\text{возд}}, Pit, Pm_q, PB, P\rho_{III}, PS_{n.c.ч}, P\nu_q, P\mu_{PI}) \quad (63)$$

Из этого рассчитываем приблизительные значения погрешности силы внедрения частицы:

$$\Delta F_{BH} = \sqrt{(PII)^2 + (PI)^2 + (P\nu_{\text{возд}})^2 + (Pit)^2 + (Pm_q)^2 + (PB)^2 + (P\rho_{III})^2 + (P\nu_q)^2 + (P\mu_{PI})^2 + (PS_{n.c.ч})^2} \quad (64)$$

Итоговая погрешность  $\Delta F_{BH}=8...14\%$ , что подтверждает правильность выполненных измерений.

#### ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. Проведено оценивание и представлены результаты выполненных в рамках диссертационной работы экспериментальных исследований по определению основных режимов и конструктивных параметров, установлены границы эффективных значений процесса магнито-термического армирования, исследованы триботехнические и поверхностно – прочностные характеристики армированных изделий. Твердость поверхности по Бринеллю выросла с 63 до 355 МПа, коэффициент трения вырос (с 0,41 до 0,62), пределы прочности на растяжение, сжатие и изгиб выросли в среднем на 10-15%. Эксплуатационные испытания на насосе малой производительности показали повышение среднего рабочего ресурса полипропиленовых лопаток рабочего колеса с 956 до 4123 часов и увеличение количества циклов сборки-разборки без замены уплотнения с 3 до 12.

2. Проведен расчет значений сил, оказывающих воздействие на ферромагнитную частицу и получены результаты экспериментальных исследований с учётом анализа изменения свойств поверхности в процессе изменения параметров технологического процесса армирования. Как показал расчет, магнитная сила внедрения более, чем в 1000 раз превышает суммарное значение сил, противодействующих внедрению.

3. Проведенные триботехнические испытания показали устойчивость армированной поверхности полимера к истиранию (скорость истирания снизилась с 0,82 до 0,16 мкм/ч) при сухом трении. Дополнительно проведены испытания по возможности армирования поверхности изделий из терморезистивных полимеров.

4. По результатам экспериментальных данных построены аналитические зависимости и определены оптимальные режимы работы экспериментальной установки для получения наиболее качественно армированной поверхности при минимальных затратах времени и энергии. Оптимальная сила тока – 4,5 А, напряжение – 10 В, расстояние от армируемой поверхности до сопла теплогенератора – не менее 100 мм, диапазон температур процесса армирования – от 453 до 523 К в зависимости от материала детали.

5. Установлено, что процесс армирования терморезистивных полимеров может быть осуществлён непосредственно при формовании изделий из них, что открывает возможность дальнейшей модификации исходной технологии магнитотермического армирования поверхности изделий из термопластичных полимеров.

## ГЛАВА 5 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ МАГНИТО-ТЕРМИЧЕСКОГО ПОВЕРХНОСТНОГО АРМИРОВАНИЯ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ

### 5.1 Варианты установок магнито-термического упрочнения

На рисунке 42 представлена принципиальная схема установки магнито-термического армирования (для первого варианта технологии).

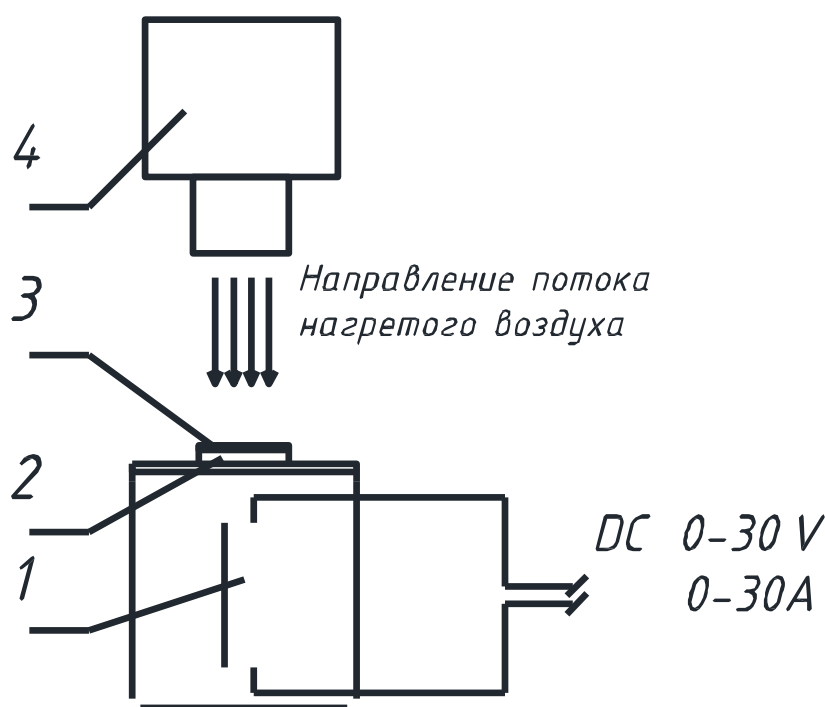


Рисунок 42. Схема установки для первого варианта технологии магнито-термического упрочнения.

Представленная технология осуществляется следующим образом: магнитная система 1 имеет сверху рабочую поверхность, на которой располагают и закрепляют упрочняемую деталь 2 (например, лопатку рабочего колеса вакуумного насоса). На неё наносят определённое количество ферромагнитного порошка 3, затем включают магнитную систему для того, чтобы исключить потери порошка до выхода установки на заданный режим работы. После этого включают генератор теплового потока 4, который будет

сообщать тепло рабочей поверхности упрочняемой детали и ферромагнитным частицам посредством потока нагретого воздуха [130]. В процессе работы установки частицы внедряются в поверхность упрочняемой детали благодаря совместному воздействию магнитного и теплового полей. Таким образом создаётся металлокопозитный слой заданной глубины, который в последствии доводится до нужного состояния в зависимости от поставленной задачи.

Помимо представленной схемы также возможно упрочнение полимерных деталей в процессе изготовления. Схема данной технологии представлена на рисунке 43.

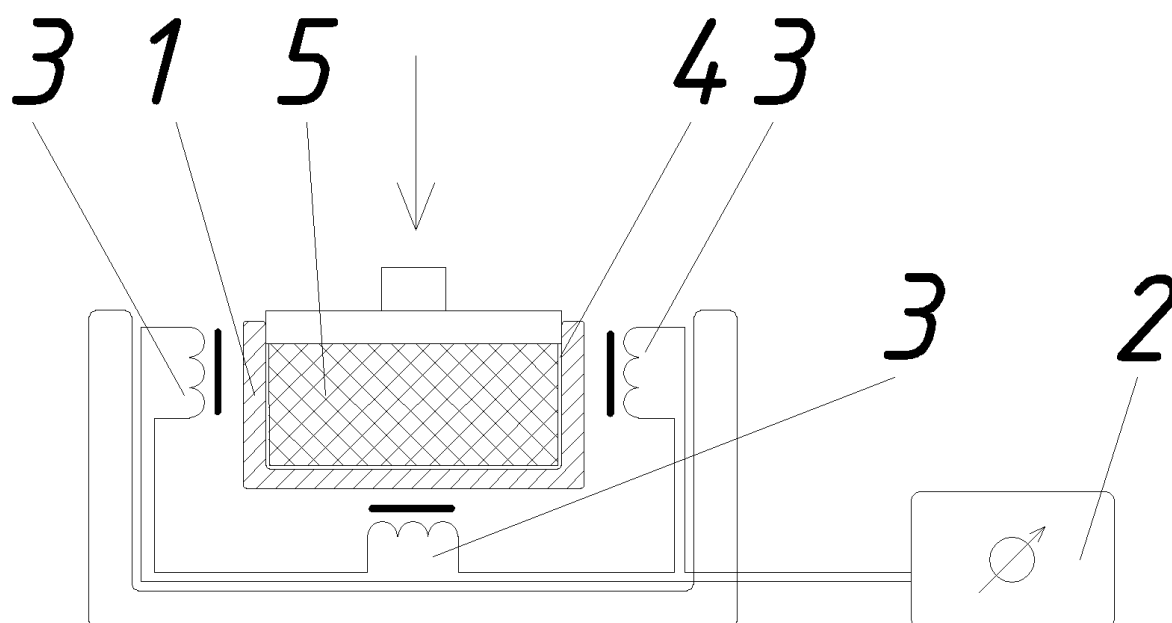


Рисунок 43. Схема установки для упрочнения полимерных деталей в процессе их изготовления.

В данном случае установка состоит из источника питания 2, провода от которого подходят к катушкам 3, окружающим стальную форму 1, которая в данном случае выполняет роль сердечника. В таком случае частицы ферромагнетика удерживаются магнитным полем и внедряются в поверхность термопластичного либо термореактивного полимера 5, находящегося в жидком состоянии, за счёт оказываемого им давления при заполнении формы. Такая

обработка деталей позволяет повысить их твёрдость и износостойкость. При этом коэффициент трения по стали изменяется незначительно.

Технология этого вида упрочнения выглядит следующим образом.

Внедряемый порошок ферромагнетика фиксируется магнитным полем катушек на внутренней поверхности стальной формы, которая после этого заполняется терморезактивным или термопластичным полимером под давлением. Затем, после полимеризации, магнитное поле выключается и деталь извлекается из формы. Таким образом получается деталь нужного размера и формы, с упрочнённой поверхностью, триботехнические свойства которой приближаются к свойствам металла [132].

## 5.2 Оценка эффективности технологии магнито-термического поверхностного упрочнения и оборудования

Технологическая схема армирования поверхности полимерных изделий магнито-термическим способом содержит следующие этапы:

- подготовка необходимых составляющих для проведения процесса (установки, порошка ферромагнетика, упрочняемой детали);
- установка и закрепление детали на рабочей поверхности установки;
- нанесение на поверхность детали порошка металла, используемого для упрочнения;
- подача питания магнитной системы, которая будет удерживать частицы на поверхности детали от уноса в процессе работы;
- включение и настройка рабочих параметров (температура, скорость подачи воздуха) генератора теплового потока и кратковременная выдержка при достижении установленных значений параметров;
- выключение генератора и магнитной системы;
- удаление не внедрившихся частиц порошка с поверхности детали;
- извлечение детали из рабочей зоны установки;
- доводка детали, контроль качества поверхности.

Для эффективной реализации данной технологии не требуется какого-либо узкоспециального оборудования. В зависимости от выбранного варианта требуется гидравлический пресс и предварительно созданные пресс-формы в сочетании с электромагнитной системой либо генератор нагретого воздушного потока при использовании той же электромагнитной системы, мощность которой минимально составляет 100 Вт [132].

Первичный расчет экономической эффективности (в расчете на однономенклатурное производство) представлен в таблице 6.

Таблица 6. Экономическая эффективность магнито-термического поверхностного упрочнения.

| <b>Затраты</b>  | <b>Стоимость, руб.</b> |
|---|------------------------|
| Пресс гидравлический б/у (макс. усилие 2500 кН)       | 300000                 |
| Пресс-формы   | 320000                 |
| Печь  | 225000                 |
| Расходники  | 50000                  |
| Сырье (на мес.)                                       | 160000                 |
| Аренда производственного помещения в месяц (25 кв.м.) | 3750                   |
| Заработная плата в месяц (2 человека)                 | 60000                  |
| Стоимость 1 детали                                    | 331                    |
| Система налогообложения                               | Упрощенная (15%)       |
| Стартовый капитал                                     | 1300000                |
| Ориентировочный срок окупаемости                      | 3 года                 |
| Ожидаемая прибыль в течение всего срока окупаемости   | 1680000                |

Коэффициент экономической эффективности составляет 14%.

Годовой экономический эффект от внедрения технологии и соответствующей установки с учетом однономенклатурного производства составляет от 480 до 650 тыс. руб. при повышении ключевых показателей надежности армированных деталей в 1,2...1,7 раза.

Для более точного расчета стоимости произведенных деталей необходимо принять следующие допущения:

1) Размеры деталей:

- лопасть крыльчатки насоса: 90×25×1,5 мм

- дисковое уплотнение: 50×30×3 мм

2) Исходные материалы:

Полимеры: полипропилен Бален 01270 (150 руб /кг) для лопастей, фторопласт Ф-4 (750 руб /кг) для дисковых уплотнений.

Армирующий материал: порошок никеля ПНК-УТЗ со средним размером частицы 40 мкм (8 руб/г).

Стоимость часа работы: 300 рублей.

Время изготовления 1 детали: 4,5-5 минут.

1. Расчет затрат на материалы

| Исходный материал                  | Масса детали или расход материала на одну деталь | Стоимость материала, руб | Итого  |
|------------------------------------|--|--------------------------|--------|
| Полипропилен                       | 10 г   | 2,5                      | 122,5  |
| Фторопласт-4                       | 65 г   | 48,75                    | 168,75 |
| Никелевый порошок ПНК-УТЗ (40 мкм) | 15 г/деталь                                      | 120                      |        |

2. Расчет затрат на оплату труда

Основная з/п на 1 деталь



$$Z_{осн} = P_{сд} = \frac{Cm_t \cdot t_{изг}}{60} . \quad (65)$$

| Деталь              | Ставка на 1 деталь с учетом времени $Cm_t$ , руб | З/п на 1 деталь, руб |
|---------------------|--|----------------------|
| Лопасть             | 4,5  | 22,5                 |
| Дисковое уплотнение | 5,0  | 25                   |

З/п дополнительная (10% от основной)

$$Z_{доп} = 0,1 \cdot Z_{осн} . \quad (66)$$

| Деталь              | З/п на 1 деталь, руб |
|---------------------|----------------------|
| Лопасть             | 2,25                 |
| Дисковое уплотнение | 2,5                  |

Общий фонд з/п

$$ОФЗ = Z_{осн} + Z_{доп} . \quad (67)$$

| Деталь              | З/п на 1 деталь, руб |
|---------------------|----------------------|
| Лопасть             | 24,75                |
| Дисковое уплотнение | 27,5                 |

Отчисления на социальные нужды

$$Z_{cc} = 0,3 \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}). \quad (68)$$

| Деталь              | Отчисления из расчета на 1 деталь, руб |
|---------------------|--|
| Лопасть             | 7,43                                   |
| Дисковое уплотнение | 8,25                                   |

### 3. Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования (90%)

$$P_{сэо} = 0,9 \cdot Z_{осн}. \quad (69)$$

| Деталь              | Расходы из расчета на 1 деталь, руб |
|---------------------|-------------------------------------|
| Лопасть             | 20,25                               |
| Дисковое уплотнение | 22,5                                |

### 4. Расчет технологической себестоимости

$$C_{тех} = M_z + Z_{осн} + Z_{доп} + Z_{cc} + P_{сэо}, \quad (70)$$

где  $M_z$  – затраты на материалы;

$Z_{осн}$  - основная з/п;

$Z_{доп}$  - дополнительная з/п;

$Z_{cc}$  - отчисления на социальные нужды

$P_{сэо}$  - расходы на содержание оборудования

|                     |   |
|---------------------|---|
| Деталь              | Технологическая себестоимость 1 детали, руб |
| Лопасть             | 174,93                                      |
| Дисковое уплотнение | 227   |

### 5. Расчет цеховой себестоимости (70%)

Сначала определяем цеховые расходы по формуле

$$P_{цех} = 0,7 \cdot Z_{осн}. \quad (71)$$

|                     |   |
|---------------------|---|
| Деталь              | Цеховые расходы из расчета на 1 деталь, руб |
| Лопасть             | 15,75                                       |
| Дисковое уплотнение | 17,5  |

Далее определяем собственно цеховую себестоимость по формуле

$$C_{цех} = C_{тех} + P_{цех}. \quad (72)$$

|                     |                                     |
|---------------------|-------------------------------------|
| Деталь              | Цеховая себестоимость 1 детали, руб |
| Лопасть             | 190,68                              |
| Дисковое уплотнение | 244,5                               |

### 6. Расчет общезаводской себестоимости

Сначала определяем общие расходы по формуле

$$P_{общ} = 1,5 \cdot Z_{осн}. \quad (73)$$

|                     |   |
|---------------------|---|
| Деталь              | Общие расходы из расчета на 1 деталь, руб |
| Лопасть             | 33,75                                     |
| Дисковое уплотнение | 37,5                                      |

Далее определяем собственно общезаводскую себестоимость по формуле

$$C_{общ} = C_{цех} + P_{общ}. \quad (74)$$

|                     |   |
|---------------------|---|
| Деталь              | Общезаводская себестоимость 1 детали, руб |
| Лопасть             | 224,43                                    |
| Дисковое уплотнение | 282                                       |

#### 7. Расчет полной себестоимости

Сначала определяем расходы на внутрискладское перемещение по формуле

$$P_{в.п.} = 0,02 \cdot Z_{осн}. \quad (75)$$

|                     |                                     |
|---------------------|-------------------------------------|
| Деталь              | Расходы из расчета на 1 деталь, руб |
| Лопасть             | 4,49                                |
| Дисковое уплотнение | 5,64                                |

Далее определяем полную себестоимость по формуле

$$C_n = C_{общ} + P_{в.п.}. \quad (76)$$

|                     |                                    |
|---------------------|------------------------------------|
| Деталь              | Полная себестоимость 1 детали, руб |
| Лопасть             | 228,92                             |
| Дисковое уплотнение | 287,64                             |

#### 8. Определение полной цены

Сначала определяем рентабельность продукции (15%) по формуле

$$P = 0,15 \cdot C_n . \quad (77)$$

|                     |                     |
|---------------------|---------------------|
| Деталь              | Рентабельность, руб |
| Лопасть             | 34,34               |
| Дисковое уплотнение | 43,15               |

Далее определяем полную цену по формуле

$$Ц = C_n + P . \quad (78)$$

|                     |                           |
|---------------------|---------------------------|
| Деталь              | Полная цена 1 детали, руб |
| Лопасть             | 263,26                    |
| Дисковое уплотнение | 330,79                    |

Высокую цену упрочненных деталей полностью компенсируют более высокий срок службы и общая надежность деталей.

### 5.3 Практические рекомендации по использованию результатов работы

1. В результате выполнения работы предлагается схема опытно-промышленного производства армированных полимерных деталей машин и аппаратов АПК и различных отраслей народного хозяйства.

2. Рекомендации производству. С помощью разработанной технологии рекомендуется армировать полимерные детали с плоской рабочей поверхностью для улучшения ее твердости, износостойкости и других поверхностных свойств (приложение Г).

3. Доказана экономическая эффективность от применения поверхностно – армированных изделий из полимерных материалов (приложение Д). Показаны возможные направления использования разработанной технологии для получения металлополимерных изделий из термопластов и реактопластов в процессе их получения.

### ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

Приведены различные варианты установок для реализации технологии магнито-термического поверхностного армирования – как уже готовых деталей, так и находящихся в процессе изготовления.

Установлено, что использование разработанных технологий магнито-термического армирования поверхностей полимерных материалов позволяет повысить ресурс работы (как показали испытания – в 3,5...4,4 раза) лопаток рабочих колес и уплотнений вала ЖВН из полимеров в несколько раз при адекватном повышении себестоимости изделия. Доказана экономическая эффективность (коэффициент эффективности 14%) применения разработанных технологий и изготовления изделий с их применением. Средний ожидаемый экономический эффект от внедрения разработанной технологии – 523 тыс. руб. в год, ориентировочный срок окупаемости – 3 года при стартовых вложениях 1,5 млн. руб.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В рамках литературного обзора определено современное состояние научных исследований в области технологий и оборудования для переработки и упрочнения/металлизации деталей машин и оборудования АПК из полимерного материала. Сделаны основные выводы об актуальности проводимых исследований и определены направления работы, поставлены соответствующие задачи.

2. Разработаны базовые модели (физическая и математическая), позволяющие описать процесс внедрения ферромагнитной частицы в поверхностный слой полимерной детали. Однако эта же модель не в полной мере решает вопрос о внедрении в поверхность термопластичных полимеров частиц металлов и сплавов, не обладающих ферромагнитными свойствами, а также получения армированных поверхностей изделий из реактопластов. Усовершенствованы методики расчета и проведено моделирование контактных и изгибных напряжений на примере лопаток рабочего колеса жидкостнокольцевого вакуум-насоса. Рассмотрена модификация устойчивого к резонансным колебаниям лопаток насоса с элементами рабочего механизма из модифицированных полимерных материалов с эвольвентным профилем рабочих частей.

3. Проведен расчет значений сил, оказывающих воздействие на ферромагнитную частицу и получены результаты экспериментальных исследований с учётом анализа изменения свойств поверхности в процессе изменения параметров технологического процесса армирования. Как показал расчет, магнитная сила внедрения более, чем в 1000 раз превышает суммарное значение сил, противодействующих внедрению.

4. Проведенные механические и триботехнические испытания показали устойчивость армированной поверхности полимера к истиранию (скорость истирания снизилась с 0,82 до 0,16 мкм/ч) при сухом трении. По результатам экспериментальных данных определены оптимальные режимы работы

экспериментальной установки для получения наиболее качественно армированной поверхности при минимальных затратах времени и энергии. Оптимальная сила тока – 4,5 А, напряжение – 10 В, расстояние от армируемой поверхности до сопла теплогенератора – не менее 100 мм, диапазон температур процесса армирования – от 453 до 523 К в зависимости от материала детали. Твердость поверхности по Бринеллю выросла с 63 до 355 МПа, коэффициент трения вырос (с 0,41 до 0,62), пределы прочности на растяжение, сжатие и изгиб выросли в среднем на 10-15%. Эксплуатационные испытания на насосе малой производительности показали повышение среднего рабочего ресурса полипропиленовых лопаток рабочего колеса с 956 до 4123 часов и увеличение количества циклов сборки-разборки без замены уплотнения с 3 до 12.

5. Описаны конструкции установок магнито-термического армирования полимерных деталей машин и аппаратов АПК для металлизации их в процессе производства либо уже готовых. Использование разработанных технологий магнито-термического армирования поверхностей полимерных материалов позволяет повысить средний ресурс работы лопаток рабочего колеса и уплотнения вала ЖВН в 3,5...4,4 раза при адекватном повышении себестоимость изделия.

6. Доказана экономическая эффективность применения разработанных технологий и изготовления изделий с их применением. Разработанная технология оценена и рекомендована к внедрению на различных предприятиях и КФХ. Годовой экономический эффект от внедрения технологии и соответствующей установки с учетом однономенклатурного производства составил в среднем 525 тыс. руб. при повышении ключевых критериев надежности армированных деталей в 1,2...1,7 раза.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

[1] Постановление Правительства РФ от 7.12.2022 № 2242 «О внесении изменений в Государственную программу развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия» // Собрание законодательства РФ. – 8.12.2022 г.

[2] Конструкционные свойства пластмасс. (Физико-химические основы применения): пер. с англ./ под ред. Э. Бэра; под ред. Г. В. Виноградова. - М.: Химия, 1967. - 463 с.: ил., табл., схемы, граф.

[3] Кербер, М.Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учебное пособие вузов / М. Л. Кербер, В. М. Виноградов, Г. С. Головкин и др.; под ред. А. А. Берлина. - СПб. : Профессия, 2008. - 560 с.

[4] Баронин, Г.С. Полимерные нанокompозиты и изделия на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), полученные объемной штамповкой в твердой фазе // Баронин Г.С., Бузник В.М., Мищенко С.В., Родионов Ю.В. и др. / В сборнике: Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент Материалы VIII Международной научно-инновационной молодёжной конференции. 2016. С. 28-33.

[5] Жачкин, С.Ю. Исследование критериев качества двухфазных композитных покрытий на основе никеля, формируемых методом плазменного напыления // С.Ю. Жачкин, Г.И. Трифонов, Г.Н. Егорова, А.Г. Белых / Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2021. - №83(4) – С. 261-268.

[6] Завражнов, А.И. Применение жидкостнокольцевых вакуумных насосов при сушке растительного сырья / А.И. Завражнов, М.А. Митрохин, Е.В. Пальчиков, Ю.В. Родионов, В.А. Преображенский, В.Б. Воробьев // Проблемы развития АПК региона. – 2014. – Т. 17 №1. – С. 63-67.

[7] Переработка полимеров и композитов в твёрдой фазе: учебное пособие / Г.С. Баронин, А.М. Столин, М.Л. Кербер, В.М. Дмитриев. – Тамбов:

Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 140 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-8265-0827-5.

[8] Крыжановский, В. К. Производство изделий из полимерных материалов / В. К. Крыжановский, М. Л. Кербер, В. В. Бурлов. - СПб. : Профессия, 2004. - 464 с.

[9] Ли, Р.И. Восстановление посадочных отверстий корпусных деталей автотракторной техники методом холодного газодинамического напыления // Р.И. Ли, Ф.А. Кирсанов / Вестник Воронежского государственного аграрного университета. - 2019. - Т. 12. № 3 (62). – стр. 32-40.

[10] Котин, А.В. Ремонт силовых гидроцилиндров с применением новых полимерных композиционных материалов // Е.А. Радайкина, А.В. Котин / Технический сервис машин. - 2021. - № 3 (144). - С. 138-145.

[11] Кузнецов, В.В. Трибологические характеристики антифрикционных композитов полиамида и сверхвысокомолекулярного полиэтилена // В.Н. Водяков, В.В. Кузнецов, К.А. Куликовская / Технический сервис машин. 2021. - № 4 (145). - С. 161-168.

[12] Velichko, S.A. Abrasive wear mechanism of polymer composites with a dispersed filler // A.M. Mikhalchenkov, I.N. Kravchenko, Yu.I. Filin, I.V. Kozarez, S.A. Velichko, M.N. Erofeev / Refractories and Industrial Ceramics. - 2022. - Т. 63. № 2. - С. 174-177.

[13] Лопатина, Ю.А. Применение 3D-печати методом FDM при ремонте машин и оборудования / Ю.А. Лопатина // Технический сервис машин. - 2019. - № 3 (136). - С. 40-45.

[14] Овсянников Б. В., Селифонов В. С., Черваков В. В. Расчет и проектирование шнекоцентробежного насоса: Учебное пособие. — Изд-во МАИ, 1996. — 72 с: ил.

[15] Фролов, Е.С. Механические насосы / Е.С. Фролов, И.В. Автономова, В.И. Васильев, Н.К. Никулин, П.И. Пластинин. М.: Машиностроение, 1989 – 288 с.

[16] Гуль, В.Е. Структура и прочность полимеров [Текст]: книга для химико-техн. спец. вузов / В.Е. Гуль. – 3-е изд., перераб. и дополн.– М.: Химия, 1978. – 328 с.

[17] Реслер, И. Механическое поведение конструкционных материалов: учебное пособие / И. Реслер, Х. Хардерс, М. Бекер; пер. с нем. под ред. С. Л. Баженова. – Долгопрудный: Интеллект, 2011 (Чебоксары). – 502 с.

[18] Болтон, У. Конструкционные материалы. Металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты // У. Болтон / Додэка XXI - Москва, 2007. - 320 с.

[19] Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин: Учеб. для вузов. — 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 640 с.

[20] ГОСТ Р 27.101-2021. Надежность в технике. Надежность выполнения задания и управление непрерывностью деятельности. Термины и определения [Текст]. – Взамен ГОСТ 27.002-2015; введ. 2022.01.01. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 46 стр.

[21] ГОСТ Р 27.102-2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения [Текст]. – Взамен ГОСТ 27.003-2016; введ. 2022.01.01. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 36 стр.

[22] Гузенков, П.Г. Детали машин / П.Г. Гузенков. - М.: Альянс, 2012. - 360 с.

[23] Мирзоев, Р.Г. Пластмассовые детали машин и приборов // Р.Г. Мирзоев. - Л.: Машиностроение, 1971. - 368 с.

[24] Курмаз, Л.В. Детали машин. Проектирование: Справочное учебно-методическое пособие / Л.В. Курмаз, А.Т. Скойбеда. — 2-е изд., испр.: М.: Высш. шк., 2005. — 309 с: ил.

[25] Пирсол, И. Кавитация / И. Пирсол. - М.: Книга по Требованию, 2012. - 829 с.

[26] Рассел, Джесси. Кавитация / Джесси Рассел. - М.: VSD, 2012. - 863 с.

[27] Промтов, М.А. Кавитационная технология улучшения качества углеводородных топлив // М.А. Промтов / Хим. и нефтегазовое машиностроение. - 2008. № 2. - стр. 6-8.

[28] Промтов, М.А. Анализ критериев оценки интенсивности химикотехнологических процессов и эффективности химико-технологической аппаратуры // М.А. Промтов / Вестник ТГТУ. - 1998, - Т. 4, № 4. - стр. 516-521.

[29] Промтов, М.А. Гидроакустическое эмульгирование в роторном импульсно-кавитационном аппарате // М.А. Промтов / Теор. основы хим. технол. 2001. - Т. 35, № 3. – стр. 327 –330.

[30] Промтов, М.А. Исследование гидродинамических закономерностей работы роторно-импульсного аппарата // М.А. Промтов / Теор. основы хим. технол. 2001. - Т. 35, № 1. - стр. 103-106.

[31] Кербер М. Л., Головкин Г. С., Горбаткина Ю. А. [и др.]. Полимерные композиционные материалы. Структура. Свойства. Технологии / под ред. А. А. Берлина. - 3-е изд., доп. и испр., - СПб.: Профессия, 2011. - 560 с.

[32] Кулезнев, В. Н. Смеси и сплавы полимеров (конспект лекций): учебное пособие / В. Н. Кулезнев. — Санкт-Петербург: НОТ, 2013. — 216 с. — ISBN 978-5-91703-033-3.

[33] Реутов, А.И. Надежность изделий из полимерных композиционных материалов с учетом статистической изменчивости их характеристик / А.И. Реутов // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – №2. – стр. 58-62.

[34] Осипов, Н.Л. К вопросу о прочности полимерных композитов, применяемых в автомобилестроении // Н.Л. Осипов, В.А. Пирожков, И.С. Чабунин / Известия МГТУ «МАМИ». – 2014. – №2. – с. 45-47.

[35] Сапожников, С.Б. Конструкционная прочность полимерных композитов на основе коротких стеклянных волокон / С.Б. Сапожников, Р.Р. Абдрахимов, А.А. Шакиров // Вестник ЮУрГУ. – 2014. – №1. – с. 50-54.

[36] Шевченко, В.Г. Основы физики полимерных композиционных материалов: учебное пособие / В. Г. Шевченко. - М.: Изд-во Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, 2010. - 98 с.

[37] Родченко, Д.А. Композиционные покрытия для узлов трения // Д.А. Родченко, М.И. Цырлин / Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин: Тез. докл. II респ. научно-техн. конф. - Новополюцк: Полоцкий гос. ун-т. - 1995. - Стр. 97.

[38] Мэттьюз, Ф. Композитные материалы. Механика и технология: учебник для вузов / Ф. Мэттьюз, Р. Ролингс ; пер. с англ. - М. : Техносфера, 2004. - 408 с.

[39] Каллистер-мл., У. Д. Материаловедение. От технологии к применению (металлы, керамика, полимеры) // У. Д. Каллистер-мл., Д. Дж. Ретвич / Научные основы и технологии - Москва, 2011. - 902 с.

[40] Высокомолекулярные соединения: учебное пособие /М. В. Кузьмин [и др.]; М-во образования и науки Рос. Федерации, ФГБОУ ВПО «Чуваш. гос. ун-т им. И. Н. Ульянова»; [отв. ред. Н. И. Кольцов]. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. гос.ун-та, 2015. – 141 с.

[41] Гришин, А.Н. Влияние некоторых факторов на прочность при сжатии высоконаполненных полимеркомпозитных материалов / А.Н. Гришин, Л.И. Казанская, И.А. Абдуллин // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – №7. – с. 400-406.

[42] Кутьинов, В.Ф. Влияние климатического старения на характеристики упругости и прочности полимерных композитных материалов / В.Ф. Кутьинов, В.А. Киреев, О.В. Старцев, В.Н. Шевалдин // Ученые записки ЦАГИ. – 2006. – №4. – с. 54-64.

[43] Фрейзер, А. Г. Высокотермостойкие полимеры // А. Г. Фрейзер / Химия - Москва, 2006. - 292 с.

[44] Савельянов, В. П. Общая химическая технология полимеров / В. П. Савельянов. - М.: Академкнига, 2007. - 336 с.

[45] Гросберг, А. Ю. Полимеры и биополимеры с точки зрения физики / А. Ю. Гросберг, А. Р. Хохлов; пер. с англ. А. А. Аэрова. – Долгопрудный: Интеллект, 2010 (Чебоксары). – 303 с.

[46] Реология. Теория и приложения / под ред. Ф. Эйриха. - М.: Изд-во иностранной литературы, 1962. - 824 с.

[47] Виноградов, Г. В. Реология полимеров / Г. В. Виноградов, А. Я. Малкин. - М. : Химия, 1977. - 440 с.

[48] Огрель, Л.Д. Российский рынок полимеров и изделий из них // Л.Д. Огрель / Полимерные материалы. - 2020. - №3. - С. 4-12.

[49] Воронин, Н.В. Современное состояние использования и производства деталей и узлов из полимеров для техники агропромышленного комплекса // Н. В. Воронин, Ю. В. Родионов, И. С. Филатов, Д. В. Никитин / Сборник трудов II Международной научно-практической конференции "Цифровизация агропромышленного комплекса". В 2-х т. - Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2020. – Т. 2. - стр. 29-34.

[50] Пат. 2492360 Российская Федерация, МПК F04C 7/00 F04C 19/00, Жидкостно-кольцевая машина / П.А. Галкин, А.С. Зорин, Д.В. Никитин, А.А. Нищев, Ю.В. Родионов, М.В. Сычев; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Тамб. ГТУ», ООО «Навакс». № 2011144960/06; заявл. 07.11.2011; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 25, 7 с.

[51] Зорин, А. С. Совершенствование технологии и технических средств комбинированной вакуумной сушки растительного сырья для производства чипсов: специальность 05.20.01 «Технология и средства механизации сельского хозяйства»: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Зорин Александр Сергеевич; ФГБОУ ВО «ТГТУ». – Мичуринск-наукоград, 2019. — 156 с. — Место защиты: ФГБОУ ВО «МичГАУ». – Текст: непосредственный.

[52] Родионов, Ю. В. Совершенствование теоретических методов расчета и обоснование параметров и режимов жидкостнокольцевых вакуумных насосов с учетом особенностей технологических процессов в АПК: специальность

05.20.01 «Технология и средства механизации сельского хозяйства»: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Родионов Юрий Викторович; ФГБОУ ВО «ТГТУ». – Мичуринск-наукоград, 2019. — 434 с. — Место защиты: ФГБОУ ВО «МичГАУ». – Текст: непосредственный.

[53] Пат. 215192 U1 Российская Федерация, МПК F04C 7/00, F04C 19/00. Жидкостно-кольцевая машина / А.С. Зорин, Ю.В. Родионов, Д.В. Никитин, И.С. Филатов, Н.В. Воронин; заявитель и патентообладатель ООО «ТЕХЛАЙН». – №2022111421; заявл. 26.04.2022; опубл. 02.12.2022, Бюл. № 34.

[54] Никитин, Д.В. Кавитационные разрушения в жидкостнокольцевых вакуум-насосах // Д.В. Никитин, Ю.В. Родионов, Г.В. Рыбин, Н.В. Воронин, А.И. Скоморохова, А.О. Сухова / Наука в центральной России. - 2022. - № 4 (58). - стр. 131-139.

[55] Шалкаускас, М. И. Металлизация пластмасс / М. И. Шалкаускас и др. – М.: Знание, 1983. - 64 с.: ил.; 20 см.

[56] Матулис Ю. Ю., Бурденко О. О., Микалаускайте А. П., Молчадский А. М., Пилите С. П. Авт. свидет. № 378552. Бюлл. 1973, № 19,72;

[57] Давидоненс Я. Ю., Микалаускайте А. П. Авт. свидет. № 560012. Бюлл. 1977, № 20,83.

[58] Бартнев С.С., Федько Ю.П., Григоров А.И. Детонационные покрытия в машиностроении. - Ленинград: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. - 215 с.: ил., табл.

[59] Ставницер И.И., Эйчис Л.П. Металлизация пластмасс термическим испарением в вакууме. - Киев: Техника, 1970. – 250 с.

[60] Буланова И.Г. Применение эмалей с металлическим эффектом // Лакокрасочные материалы и их применение. - 1982, № 3. – стр. 74.

[61] Гуль В. Е., Царский Л. Н., Майзель Н. С. и др. Электропроводящие полимерные материалы. – М.: Химия, 1968. - 248 с.: ил.

[62] Вишняков Б. А., Осипов К. А. Электронно-лучевой метод получения тонких пленок из химических соединений. – М.: Наука, 1970. - 144 с.: ил.

[63] Рогачев А.В., Сидорский С.С. Восстановление и повышение износостойкости деталей машин: учеб. пособие / А.В. Рогачев, С.С. Сидорский - Гомель: УО «БелГУТ», 2014. - 343 с.

[64] Витязь, П.А. Основы нанесения износостойких и теплозащитных покрытий / П.А. Витязь, А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов. - Мн.:Бел.Наука, 2013. - 363 с.

[65] Ивашко В.С. Прогрессивные технологии при ремонте машин, восстановлении и упрочнении деталей. - Минск: Тонпик, 2006. - 284 с.

[66] Панталеенко Ф. И., Любецкий С. Н. Материалы, технология и оборудование для восстановления и упрочнения деталей машин. Ч. 1. Наплавка и напыление. - Новополоцк, 1994. - 116 с.

[67] Жачкин, С.Ю. Анализ износостойкости функционального покрытия в условиях абразивного изнашивания сложнопрофильной детали трения // С.Ю. Жачкин, Е.В. Пухов, Г.И. Трифонов, Ян. В. Комаров, К.В. Загоруйко / Вестник Воронежского государственного аграрного университета. - 2019. - Т. 12, № 3 (62). - стр. 32-40.

[68] Трифонов, Г. И. Применение карбида титана в технологии плазменного напыления с целью получения износостойкого покрытия // Г.И. Трифонов, С.Ю. Жачкин, О.А. Сидокин / Повышение эффективности использования мобильных энергетических средств в различных режимах движения: Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 115 годовщине со дня рождения профессора Харитончика Ефима Мироновича. Часть I.– 2017. – стр. 177-183.

[69] Трифонов, Г.И. Математическое моделирование технологии плазменного напыления // Г.И. Трифонов, С.Ю. Жачкин / Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2017. – Т. 2. – стр. 342–346. – URL: <http://e-koncept.ru/2017/570071.htm>.

[70] Ли, Р.И. Технологическое обеспечение точностных характеристик посадочных отверстий в корпусных деталях // Р.И. Ли, Ф.А. Кирсанов / В



сборнике: Интеллектуальные технологии и техника в АПК. Материалы Международной научно-практической конференции. 2016. С. 112-117.

[71] Кирсанов, Ф.А. Повышение качества полимерных покрытий при восстановлении корпусных деталей автотракторной техники // В сборнике: Школа молодых ученых по проблемам гуманитарных, естественных и технических наук. материалы областного профильного семинара. - 2016. - стр. 269-274.

[72] Пат. 2604238 Российская Федерация, МПК В23Р 6/00, В29С 73/02, В29С 41/30. Устройство для калибрования посадочных отверстий с полимерным покрытием в корпусных деталях / Р.И. Ли, Ф.А. Кирсанов, М.Р. Киба: заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет». Заявка № 201503846/05; заявл. 05.02.2015; опубл. 10.12.2016, Бюл. № 34, 14 с.

[73] Ли, Р.И. Технология восстановления корпусных деталей автотракторной техники эластомером Ф-40С // Р.И. Ли, Ф.А. Кирсанов / Труды ГОСНИТИ. - 2015. - Т. 119. - стр. 225-229.

[74] Воронин, Н.В. Способы упрочнения полимерных материалов: современное состояние и перспективы // Н.В. Воронин, Г.В. Рыбин / Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития: сборник научных статей молодых ученых, аспирантов и студентов. - Тамбовский государственный технический университет. - Тамбов, 2019. - Вып. XI. – стр. 48-51.

[75] Евдокимов В.Д., Клименко Л.П., Евдокимова А.Н. Технология упрочнения машиностроительных материалов: Учебное пособие-справочник / Под редакцией д.т.н., проф. В.Д. Евдокимова. – Одесса Николаев: Изд-во НГГУ им. Петра Могилы, 2005. – 352 с.

[76] Володин, В.П. Экструзия профильных изделий: материалы, оборудование и особенности технологий: метод. пособие / В.П. Володин. - Санкт-Петербург: Профессия, 2019. - 816 с.

[77] Бортников, В.Г. Производство изделий из пластических масс. – Казань. - Дом печати. - 2001.

[78] Головкин, Г. С. Научные основы производства изделий из термопластичных композиционных материалов: монография / Г.С. Головкин, В.П. Дмитренко. — Москва: ИНФРА-М, 2020. — 471 с.

[79] Власов, С.В. Основы технологии переработки пластмасс / Власов С.В., Кандырин Л.Б., Кулезнев В.Н. и др. - М., Химия, 2004. - 600 с.

[80] Справочник по технологии изделий из пластмасс. Под ред. Сагалаева Г.В. и др. - М., Химия, 2000. - 424 с.

[81] Блохин, А.Н. Влияние нанодисперсных частиц на прочностные свойства полимерных матриц / А.Н. Блохин, В.П. Таров, М.С. Толстых // Вестник ТГТУ. – 2012. – №3. – с. 737-741.

[82] Гаджиев, А.А. Технологические способы повышения механических характеристик композиционных полимерных материалов / А.А. Гаджиев, А.С. Кононенко, А.М. Орлов // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. – 2009. – №2. – с. 70-73.

[83] Сергеева, Е.А. Прочностные характеристики композиционных материалов на основе плазмоактивированных сверхвысокомолекулярных полиэтиленовых волокон / Е.А. Сергеева, А.Р. Ибатуллина, А.С. Брысаев // Вестник НИО КНИТУ. – 2010. – №7. – с. 133-135.

[84] Москатов, К.А. Термическая обработка пластмассовых и резиновых деталей машин / К. А. Москатов - М.: Машиностроение, 1976. - 200 с.

[85] Ложечко, Ю.П. Литье под давлением термопластов: справ. пособие / Ю.П. Ложечко. — 2-е изд. — Санкт-Петербург: ЦОП «Профессия» 2019. — 240 с.

[86] Крыжановский, В.К. Технические свойства полимерных материалов. Учеб.-справ. пособие/ В. К. Крыжановский, В. В. Бурлов, А. Д. Паниматченко, Ю. В. Крыжановская. — 2-е изд., испр. и доп. — СПб.: Профессия, 2005. — 248 стр.

[87] Kobzev, D.Y. Manufacturing products from polymers and polymerbased composite materials by solid phase pressure forming: problems, solutions and prospects // D.Y. Kobzev, P.V. Kombarova, G.S. Baronin, Y.V. Rodionov, D.V. Nikitin / В сборнике: International Multidisciplinary Scientific GeoConference

Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 15th. 2015. - pp. 127-134.

[88] Бондалетова, Л.И. Полимерные композиционные материалы (часть 1): учебное пособие / Л.И. Бондалетова, В.Г. Бондалетов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 118 с.

[89] Гончарова, Ю.А. Исследование механических свойств композиционного материала на основе 3D-печатных каркасов, наполненных полимерным компаундом / Ю.А. Гончарова // Агроинженерия. - 2022. - Т. 24. № 2. - С. 65-70.

[90] Лопатина, Ю.А. Переработка полимерных материалов методом свободного литья в вакууме / С.П. Тужилин, Ю.А. Лопатина, А.С. Свиридов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. - 2020. - № 7. - С. 93-100.

[91] Лопатина, Ю.А. Исследование пористости композитных конструкций на основе 3D-печатных каркасов, пропитанных эпоксидной смолой / Ю.А. Лопатина, В.А. Денисов // Технический сервис машин. - 2021. - № 1 (142). - С. 131-139.

[92] Пат. 2761191 С1 Российская Федерация, МПК С23С 26/00, С23С 24/08, С23С 14/35. Способ поверхностного упрочнения детали из полимерного материала. / И.С. Филатов, Н.В. Воронин, Ю.В. Родионов, Д.В. Никитин, Г.В. Рыбин, А.В. Щегольков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ТГТУ. – №2021106201; заявл. 11.03.2021; опубл. 06.12.2021, Бюл. № 34.

[93] Воронин, Н.В. Развитие и модификация магнито-термического метода упрочнения деталей машин из термопластичных полимеров // Н.В. Воронин, И.С. Филатов, Ю.В. Родионов, А.В. Щегольков / Наука и Образование. - 2021. - Т. 4, № 2. – Текст: электронный. – URL: <http://opusmgau.ru/index.php/see/article/view/3224/3217>.

[94] H. Ramezannejad Azarboni. Magneto-thermal primary frequency response analysis of carbon nanotube considering surface effect under different boundary

conditions. *Composites Part B: Engineering*, Volume 165, 15 May 2019, Pages 435-441.

[95] Cho, K.-H. Coupled electro-magneto-thermal model for induction heating process of a moving billet. *International Journal of Thermal Sciences*. - 2012. - №60, pp 195-204. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2012.05.003

[96] H. Meng, G. Li Thermal sensitive shape recovery and mass transfer properties of polyurethane/modified MWNT composite membranes synthesized via in situ solution pre-polymerization, *Polymer* 54 (2013), ppg. 2199–2221.

[97] P. Ghosh, A. Rao, A.R. Srinivasa Design of multi-state and smart-bias components using shape memory alloy and shape memory polymer composites, *Mater. Des.* 44 (2013) pp.164–171.

[98] R. Shankar, T.K. Ghosh, R.J. Spontak. Mechanical and actuation behavior of electroactive nanostructured polymers / *Sensors Actuators*. - A 151 (2009) - pp.46–52.

[99] N.G. Sahoo, Y.C. Jung, N.S. Goo, J.W. Cho Conducting shape memory polyurethane–polypyrrole composites for an electroactive actuator, *Macromol. Mater. Eng.* 290 (2005) 1049–1055.

[100] M. Farshad, M.L. Roux Compression properties of magnetostrictive polymer composite gels, *Polym. Test.* 24 (2005) 163–168.

[101] R.P. Tandon, M.R. Tripathy, A.K. Arora, S. Hotchandani Gas and humidity response of iron oxide—polypyrrole nanocomposites, *Sensors Actuators B* 114 (2006) 768–773.

[102] Воронин, Н.В. Технология поверхностного армирования полимеров для машин и оборудования агропромышленного комплекса // Н. В. Воронин, Ю. В. Родионов, Д. В. Никитин, И. С. Филатов / Сборник научных трудов XI Национальной научно-технической конференции. – М.: Союз машиностроителей России. – 2022. - стр. 62-65.

[103] Воронин, Н.В. Определение сил воздействия на ферромагнитную частицу в процессе магнитотермического поверхностного армирования изделий

из термопластичных полимеров // Н. В. Воронин, Ю. В. Родионов, Д. В. Никитин, И. С. Филатов / Вестник ТГТУ. - 2021. – Т.27, №3. - стр. 486-496.

[104] A. Shchegolkov, N. Voronin, Y. Rodionov, N. Zemtsova, A. Shchegolkov and I. Filatov, "Mathematical Model of the Magnetic-Thermal Surface Reinforcement of Polymeric Materials with Carbon Nanostructures and Microdimensional Nickel," 2022 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russian Federation, 2022, pp. 117-121, doi: 10.1109/SUMMA57301.2022.9974122.

[105] Тагер, А.А. Физико-химия полимеров. 4-е изд., перераб. и доп. Учеб. пособие для хим. фак. ун-тов / А. А. Тагер; под ред. А. А. Аскадского. - М.: Научный мир, 2007. - 573с.

[106] Хохлов А.Р., Кучанов С.И. Лекции по физической химии полимеров. М., Мир, 2000. – 192 с.: ил.

[107] Родионов, Ю.В. Переработка репчатого лука сорта стригуновский местный при помощи экстрагирования // Ю.В. Родионов, Г.В. Рыбин, А.А. Гуськов, Д.В. Никитин, С.И. Данилин, Н.В. Воронин / Аграрный научный журнал. – 2023, № 2. - стр. 142-147.

[108] Burgmann W., Göhler K. Modern vacuum pumps for the vacuum degassing of steel in small and large vacuum-degassing units//Metallurgist. 2013. V. 57. №. 5-6. P. 516-525.

[109] Родионов, Ю.В. Новая конструкция жидкостнокольцевого вакуумного насоса // Ю.В. Родионов, Ю.Т. Селиванов, Д.В. Никитин, М.В. Сычев, П.В. Комбарова / Химическое и нефтегазовое машиностроение. - 2019. - № 6. - стр. 22-25.

[110] Ужик, В.Ф. К обоснованию конструкции доильного аппарата выжимающего принципа действия // В.Ф. Ужик, В.И. Борозенцев / Актуальные проблемы агроинженерии и пути их решения: Материалы конф. – ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2018. – стр. 228-233.

[111] Анохин, С.А. Загрязняемость внутренних поверхностей емкостей сельскохозяйственных назначений // С.А. Анохин, Н.В. Воронин, А.А. Гуськов,

Д.В. Никитин, Ю.В. Родионов, И.С. Филатов / Наука в центральной России. – 2020. - № 1 (43). - стр. 60-69.

[112] Галкин, П.А. Определение качественных показателей взаимодействия сопряженных профилей в нестандартном оборудовании АПК / П.А. Галкин, О.В. Ломакина, С.В. Савидов // Импортзамещающие технологии и оборудование для глубокой комплексной переработки сельскохозяйственного сырья: материалы I Всероссийской конференции с международным участием - Изд.: ФГБОУ ВО ТГТУ. – 2019. – с. 115-119.

[113] Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т. / В.И. Анурьев. – М.: Машиностроение, 2006. – 3т.

[114] Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости: Пер. с англ./Под ред. Г. С. Шапиро. — 2-е изд.— М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 560 с.

[115] Гавриленко В.А., Москалев М.А., Осипенко О.И. Мелкомодульные металлополимерные зубчатые передачи. - М., Машиностроение, - 1972.

[116] Атопов, В.И. Моделирование контактных напряжений: Производственное издание / В.И. Атопов, Ю.П. Сердобинцев, О.К. Славин. - Москва: Машиностроение, 1988. - 271 с.: ил.

[117] Иванов, М.Н. Детали машин. Учебник для машиностроительных специальностей вузов / М.Н. Иванов, В.А. Финогенов – 10-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2006. – 408 с.

[118] С. В. Крейтер, А. Р. Нестеров, В. В. Данилевский. Основы конструирования и агрегатирования: Учеб. пособие. — М.: Издательство стандартов, 1983. — 224 с, ил.

[119] Дунаев П.В., Леликов О.П. Конструирование узлов и деталей машин: Учеб. Пособие для техн. спец. Вузов. – 6-е изд., исп. – М: Высш.шк., 2000 г.

[120] Пат. 2784993 Российская Федерация, МПК F04C 7/00 F04C 19/00, Жидкостно-кольцевая машина / Д.В. Никитин, Ю.В. Родионов, А.С. Зорин;

заявитель и патентообладатель ООО «ТЕХЛАЙН» № 2021128067; заявл. 23.09.2021; опубл. 01.12.2022, Бюл. № 34, 18 с.

[121] Воронин, Н.В. Теоретические исследования контактных и изгибных напряжений лопаток рабочего колеса и корпуса жидкостнокольцевого вакуумного насоса из полимеров // Н.В. Воронин, Ю.В. Родионов, А.И. Скоморохова, Д.В. Никитин, П.А. Галкин, И.С. Филатов / Наука в центральной России. - 2020. - № 3 (45). - стр. 85-97.

[122] Воронин, Н.В. Разработка установки для армирования полимерных сельскохозяйственных деталей // Н. В. Воронин, И. С. Филатов, Ю. В. Родионов, Д. В. Никитин / Наука и Образование. - 2021. - Т. 4, № 3. – Текст: электронный. – URL: <http://opusmgau.ru/index.php/see/article/view/3994/3976>.

[123] Воронин, Н.В. Разработка установки для магнито-термического армирования полимерных деталей сельскохозяйственных машин // Н. В. Воронин, И. С. Филатов, Ю. В. Родионов, Д. В. Никитин / Инновационная техника и технология. - 2021. - Т. 8, № 3. - стр. 32-37.

[124] Арзамасов, Б.Н. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений / Б.Н. Арзамасов, И.И. Сидорин, Г.Ф. Косолапов и др.; Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. - Изд.: Машиностроение, 1986. – 384 с.

[125] Энциклопедия полимеров: В 3 т. [Текст] / Редкол.: Кабанов В.А. (гл. ред.) и др. - М.: Советская энциклопедия, 1972-1977.

[126] Воронин, Н.В. Перспективы доработки деталей машин из термопластичных полимеров // Н.В. Воронин, И.С. Филатов, Ю.В. Родионов / Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения. Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции, посвященной Году науки и технологий. - Санкт-Петербург, 2021. - стр. 165-168.

[127] Rodionov, Yu. V. Study of magneto-thermal surface reinforcement of polymeric materials / Yu. V. Rodionov, D. V. Nikitin, N. V. Voronin, I. S. Filatov// Chemical and Petroleum Engineering – 2021. - №7-8. – pp. 595-600.

[128] Воронин, Н.В. Влияние технологических параметров на процесс внедрения ферромагнитных материалов в поверхность термопластичных и терморезистивных полимеров // Н. В. Воронин, И. С. Филатов, Ю. В. Родионов, Д. В. Никитин, Махмуд М. А. С. / Наука в центральной России. - 2021. - № 4 (52). - стр. 115-123.

[129] Воронин, Н.В. Упрочнение металлизацией полимерных деталей машин и механизмов АПК, полученных посредством аддитивных технологий // Н.В. Воронин, А.И. Скоморохова, И.С. Филатов, Ю.В. Родионов, Д.В. Никитин. / Наука в центральной России. – 2022. - № 2 (56). – стр. 125-134.

[130] Воронин, Н.В. Перспективы металлизации изделий агропромышленного комплекса из реактопластов в процессе формования // Н.В. Воронин, И.С. Филатов, Ю.В. Родионов / Инновационная техника и технология. - 2022. - Т. 9, № 3. - стр. 42-47.

[131] Пат. 2795315 С1 Российская Федерация, МПК С08J 5/04, С23С 24/00, В29С 43/02. Способ поверхностного упрочнения деталей из полимерного терморезистивного материала / И.С. Филатов, Ю.В. Родионов, Д.В. Никитин, Н.В. Воронин, Г.В. Рыбин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ТГТУ. – №2022119093; заявл. 13.07.2022; опубл. 02.05.2023, Бюл. № 13.

[132] Воронин, Н.В. Оценка экономической эффективности технологии поверхностного армирования изделий агропромышленного комплекса из полимерных материалов // Н.В. Воронин, И.С. Филатов, Ю.В. Родионов / В сборнике: Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт. Материалы IX-ой Международной научно-практической конференции, посвящённой памяти академика РААСН Чернышова Е.М. - 2022. - стр. 362-365.



**ПРИЛОЖЕНИЯ**

ПРИЛОЖЕНИЕ А – Научный проект в рамках гранта РФФИ  
(сведения о проекте и участниках)

Добро пожаловать, Воронин Николай Владимирович. [Выход из системы](#)  
[Служба поддержки](#)  
[КИАС::Справка](#)

РОССИЙСКИЙ ФОНД  
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Главная Личные данные **Мои проекты** Мои приглашения Организация Моя подписка

**20-33-90298 Аспиранты**  
**Разработка метода магнито-термического упрочнения полимеров ферромагнитными порошками различной дисперсности для деталей машин широкого спектра применения.**

Проект подан от имени юридического лица  
Основной код классификатора 03-630 Фундаментальные основы создания новых металлических, керамических и композиционных материалов  
Дополнительные коды классификатора 08-101 Прочность, живучесть и разрушение материалов и конструкций  
Ключевые слова упрочнение полимерных материалов, магнитные и тепловые поля, износостойкость, прочность, контактные напряжения, напряженность поля  
Номер ЦИТИС 121031100261-8

**Участники проекта (2) [ 2021 ]**

ФИО Воронин Николай Владимирович  
Родников Юрий Викторович (Р)

Дата рождения 15.10.1994  
13.12.1967

Основное место работы ФГБОУ ВО "ТГТУ"  
ФГБОУ ВО "ТГТУ"

**Заявки и отчеты**

| Документ            | Год  | Дата создания | Статус     |
|---------------------|------|---------------|------------|
| Заявка              | 2020 | 10.06.2020    | Поддержана |
| Промежуточный отчет | 2020 | 14.09.2021    | Поддержан  |
| Промежуточный отчет | 2021 | 01.09.2022    | Поддержан  |
| Итоговый отчет      | 2022 | 28.12.2022    | Сохранен   |

**Договоры**

| Номер договора | Сумма, Р  | Дата создания | Статус (№ платежа) | Дата оплаты | Дата отправки |
|----------------|-----------|---------------|--------------------|-------------|---------------|
| 20-33-90298\20 | 700000.00 | 26.08.2020    | Оплачен (№385664)  | 16.09.2020  | -             |
| 20-33-90298\20 | 500000.00 | 26.08.2020    | Оплачен (№49372)   | 26.07.2021  | -             |

**Информация**

- \* Данный раздел содержит основные данные проекта и отчетов, а также позволяет просматривать их содержимое и распечатывать документы.
- \* Кнопка "Ввести номер ЦИТИС" позволяет Вам ввести регистрационный номер ЦИТИС, если это требуется по условиям конкурса.
- \* Блок "Заявки и отчеты" содержит ссылки на редактирование и/или просмотр и печать документов — в зависимости от их состояния.
- \* Блок "Договоры" содержит ссылки, предназначенные для печати Договора.
- \* Для возвращения к списку проектов Вам необходимо нажать на вкладку "Мои проекты".

**Результат операции**

ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Благодарности, сертификаты участника конференций и форумов, выписки (справочное)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б1 – Диплом победителя XI Национальной научно-технической конференции



ПРИЛОЖЕНИЕ Б2 – Сертификат участника форума «Инженеры будущего – 2022»



ПРИЛОЖЕНИЕ БЗ – Благодарственное письмо администрации Тамбовской области



АДМИНИСТРАЦИЯ ТАМБОВСКОЙ ОБЛАСТИ

## Благодарственное письмо

**Н.В.ВОРОНИНУ – аспиранту 4 года ФГБОУ ВО «ТГТУ»**

Уважаемый Николай Владимирович!

Выражаю Вам благодарность за успешное участие в X Международном молодежном промышленном форуме «Инженеры будущего – 2022»!

Вы достойно представили Тамбовскую область в проекте, направленном на системное вовлечение молодежи в процессы инновационного развития машиностроительного комплекса и популяризацию инженерного искусства.

Пусть этот успех станет для Вас залогом новых достижений, стимулом для дальнейшей плодотворной научной деятельности.

Желаю Вам крепкого здоровья, счастья, благополучия и новых профессиональных и творческих успехов!

**С уважением,  
Временно исполняющий  
обязанности главы  
администрации области**



**М.Б.Егоров**

Июль 2022 г.,  
г.Тамбов

ПРИЛОЖЕНИЕ В – Патенты на изобретения и полезные модели  
(справочное)

ПРИЛОЖЕНИЕ В1 – Патент на изобретение РФ №2761191

|   |  |
|---|--|
| РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ<br> | (19) <b>RU</b> (11) <b>2 761 191</b> (13) <b>C1</b><br>(51) МПК<br><i>C23C 2600</i> (2006.01)<br><i>C23C 2408</i> (2006.01)<br><i>C23C 1435</i> (2006.01)<br><i>C23C 406</i> (2006.01) |
| ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА<br>ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ   |  |

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
*C23C 2600* (2021.08); *C23C 24085* (2021.08); *C23C 14351* (2021.08); *C23C 406* (2021.08)

(21)(22) Заявка: 2021106201, 11.03.2021

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
11.03.2021

Дата регистрации:  
06.12.2021

Приоритет(ы):  
 (22) Дата подачи заявки: 11.03.2021

(45) Опубликовано: 06.12.2021 Бюл. № 34

Адрес для переписки:  
 392000, Тамбовская обл., г. Тамбов, ул.  
 Советская, 106, ТГТУ, каб. 6, ВОИР, отдел  
 патентования, Неверова Ольга Сергеевна

(72) Автор(ы):  
 Филатов Иван Сергеевич (RU),  
 Воронин Николай Владимирович (RU),  
 Родионов Юрий Викторович (RU),  
 Никитин Дмитрий Вячеславович (RU),  
 Рыбин Григорий Вячеславович (RU),  
 Щегольков Александр Викторович (RU)

(73) Патентообладатель(и):  
 Федеральное государственное бюджетное  
 образовательное учреждение высшего  
 образования «Тамбовский государственный  
 технический университет» (ФГБОУ ВО  
 «ТГТУ») (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете  
 о поиске: RU 2425912 C2, 10.02.2011. RU  
 2096835 C1, 20.11.1997. SU 911620 A, 07.03.1982.  
 CN 1253602 C, 26.04.2006. US 7244512 B2,  
 17.07.2007.


(54) Способ поверхностного упрочнения детали из полимерного материала

(57) Реферат:

Изобретение относится к области нанесения покрытий и может быть использовано для улучшения эксплуатационных характеристик деталей машин, выполненных из полимерных материалов различного строения, находящихся применение в химической, пищевой и других отраслях промышленности и сельского хозяйства, например, для поверхностного упрочнения зубчатых цилиндрических, конических передач, лопаток рабочих колес и лопаток корпуса жидкостно-кольцевых машин и дисковых уплотнений валов. Способ поверхностного упрочнения детали из термопласта включает предварительную подготовку поверхности термопласта и последующее внедрение частиц ферромагнитного порошка. Предварительную подготовку поверхности термопласта проводят посредством шлифования. Затем наносят слой ферромагнитного порошка различного размера

на поверхность термопласта. Последующее внедрение указанных частиц ферромагнитного порошка в подготовленную поверхность термопласта осуществляют посредством одновременного воздействия на нанесенный слой ферромагнитного порошка магнитного поля с магнитной индукцией, минимальное значение которой составляет 0,05 Тл, и нагнетаемого нагретого воздуха с получением металлокомпозитного слоя. Обеспечивается повышение срока эксплуатации полимерных деталей, повышение поверхностных твердости и прочности, а также снижение сложности процесса поверхностного упрочнения и подбора состава с исключением необходимости использования промежуточных составов во избежание попадания в воздух токсичных летучих компонентов. 1 ил.

## ПРИЛОЖЕНИЕ В1 – Патент на изобретение РФ №2795315

|   |   |   |
|---|---|---|
| РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ  |   | (19) <b>RU</b> (11) <b>2 795 315</b> (13) <b>C1</b>                             |
|    |   | (51) МПК<br>C08J 5/04 (2006.01)<br>C23C 24/00 (2006.01)<br>B29C 43/02 (2006.01) |
| ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА<br>ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ   |   |   |
| <b>(12) ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ</b>  |   |   |
| (52) СПК<br>C08J 5/04 (2023.01); C23C 24/00 (2023.01); B29C 43/02 (2023.01)   |   |   |
| <p>(21)(22) Заявка: 2022119093, 13.07.2022</p> <p>(24) Дата начала отсчета срока действия патента:<br/>13.07.2022</p> <p>Дата регистрации:<br/>02.05.2023</p> <p>Приоритет(ы):<br/>(22) Дата подачи заявки: 13.07.2022</p> <p>(45) Опубликовано: 02.05.2023 Бюл. № 13</p> <p>Адрес для переписки:<br/>392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106/5, помещ.<br/>2, ТГТУ, каб. 6, ВОИР, отдел патентования,<br/>Неверова Ольга Сергеевна, Неверова Светлана<br/>Юрьевна</p>  | <p>(72) Автор(ы):<br/>Филатов Иван Сергеевич (RU),<br/>Родвонов Юрий Викторович (RU),<br/>Никитин Дмитрий Вячеславович (RU),<br/>Вороши Николай Владимирович (RU),<br/>Рябин Григорий Вячеславович (RU)</p> <p>(73) Патентообладатель(и):<br/>Федеральное государственное бюджетное<br/>образовательное учреждение высшего<br/>образования "Тамбовский государственный<br/>технический университет" (ФГБОУ ВО<br/>"ТГТУ") (RU)</p> <p>(56) Список документов, цитированных в отчете<br/>о поиске: RU 2761191 C1, 06.12.2021, US<br/>20170326823 A1, 16.11.2017, SU 911620 A1,<br/>07.03.1982, CN 1253602 C, 26.04.2006.</p> | R U<br>2 7 9 5 3 1 5<br>C 1   |
| (54) Способ поверхностного упрочнения деталей из полимерного термореактивного материала   |   |   |
| (57) Формула изобретения  |   |   |
| <p>Способ поверхностного упрочнения изделий из полимерного термореактивного материала, включающий предварительную подготовку поверхности стальной формы и последующее внедрение частиц ферромагнитного порошка, отличающийся тем, что внедрение частиц ферромагнитного порошка в поверхность изделий из термореактивного полимерного материала проводят посредством воздействия давления формования на размещенные частицы ферромагнитного порошка с предварительным нанесением слоя ферромагнитного порошка различной размерности на внутреннюю поверхность стальной формы, удерживаемого внешним магнитным полем.</p> |   |   |
| Стр. 1  |   |   |

## ПРИЛОЖЕНИЕ В1 – Патент на полезную модель РФ №215192

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **215 192**<sup>(13)</sup> **U1**

(51) МПК  
*F04C 7/00* (2006.01)  
*F04C 19/00* (2006.01)

## (12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
*F04C 7/00* (2022.05); *F04C 19/001* (2022.05)

(21)(22) Заявка: 2022111421, 26.04.2022

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
26.04.2022Дата регистрации:  
02.12.2022Приоритет(ы):  
(22) Дата подачи заявки: 26.04.2022

(45) Опубликовано: 02.12.2022 Бюл. № 34

Адрес для переписки:  
392024, г. Тамбов, ул. Селезнёвская, 92, ООО  
"ТЕХЛАЙН"

(72) Автор(ы):

Зорин Александр Сергеевич (RU),  
Родионов Юрий Викторович (RU),  
Никитин Дмитрий Вячеславович (RU),  
Филатов Иван Сергеевич (RU),  
Воронин Николай Владимирович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Общество с ограниченной ответственностью  
"ТЕХЛАЙН" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: RU 161934 U1, 20.05.2016. RU 2094200  
C1, 27.10.1997. RU 2347109 C1, 20.02.2009. CN  
205638926 U, 12.10.2016. WO 2020249476 A1,  
17.12.2020.

(54) ЖИДКОСТНО-КОЛЬЦЕВАЯ МАШИНА

(57) Реферат:

Полезная модель относится к компрессоростроению и может быть использована в жидкостно-кольцевых машинах, находящихся применение в химической, целлюлозно-бумажной, горнодобывающей, текстильной, пищевой, металлургической и других отраслях промышленности и сельского хозяйства, например в доильных установках. Данной полезной моделью решается задача снижения металлоемкости и повышение межремонтного срока эксплуатации. Указанный технический результат достигается тем, что в одноступенчатой жидкостно-кольцевой машине, содержащей вращающийся цилиндрический корпус с

лопатками, размещенное в нем с эксцентриситетом и возможностью вращения рабочее колесо на неподвижном распределительном валу с перегородкой, образующей с одного торца вала входной, а с другой - выходной патрубки, вращающийся цилиндрический корпус и размещенное в нем с эксцентриситетом и возможностью вращения рабочее колесо выполнены из сверхвысокомолекулярного полиэтилена, а рабочая поверхность лопаток рабочего колеса, взаимодействующая с рабочей поверхностью лопаток корпуса, упрочнена металлизацией порошком никеля.

RU 215192 U1

RU 215192 U1



Приложение Г – Акт испытаний  
(справочное)



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе  
ФГБОУ ВО «ТГТУ»

392000, Тамбов, ул. Советская, 106

Д.Ю. Муромцев

«06» 2021 г.

Центр коллективного пользования научным оборудованием  
«Получение и применение полифункциональных наноматериалов»

Базовая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»)

## АКТ ИСПЫТАНИЙ №6 от 17.06.2021

образцов полимерных лопаток рабочих колес жидкостно-кольцевого вакуумного насоса (ЖВН) и торцевого уплотнения вала ЖВН (в рамках гранта РФФИ № 20-33-90298/20).

Комиссия в составе инженера Чапаксова Николая Андреевича, директора ЦКП ТГТУ «ПФНМ» Татьяны Петровны Дьячковой и заказчика, аспиранта ФГБОУ ВО «ТГТУ» Воронина Николая Владимировича составила акт о нижеследующем:

1. Полимерные лопатки рабочего колеса и уплотнения вала жидкостно-кольцевого вакуумного насоса с кинематическим замыканием ЖВН-0,6КЗ с быстротой действия 36 м<sup>3</sup>/ч были заменены на аналогичные детали из поверхностно армированного никелем полипропилена и испытаны в сравнении с исходными неармированными деталями.

2. Проведены механические и эксплуатационные (штатная работа суммарно в течение 5000 часов) испытания указанных выше деталей.

В ходе испытаний установлено:

- механические параметры поверхностно армированных никелем полипропиленовых деталей существенно превосходят аналогичные параметры неармированных деталей (таблица 1);
- рабочий ресурс армированных лопаток и уплотнений выше, чем у исходных неармированных деталей, в 3,5...4,4 раза.

| Механические или эксплуатационные характеристики    | Образец неармированной лопатки рабочего колеса ЖВН из полипропилена | Образец армированной никелем лопатки рабочего колеса ЖВН из полипропилена | Образец неармированного уплотнения вала ЖВН из полипропилена | Образец армированного никелем уплотнения вала ЖВН из полипропилена |
|---|---|---|--|--|
| Твердость поверхности по Бринеллю НВ (средняя), МПа | 63  | 355   | 63   | 355  |
| Коэффициент трения                                  | 0,41  | 0,62  | 0,4  | 0,61   |
| Предел прочности при изгибе $\sigma_{из}$ , МПа     | 40  | 47  | 40   | 48   |
| Предел прочности при растяжении $\sigma_{р}$ , МПа  | 40  | 46  | 40   | 47   |
| Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ , МПа     | 15  | 17  | 15   | 18   |
| Скорость истирания, мкм/ч                           | 0,82  | 0,16  | 0,81   | 0,17   |
| Рабочий ресурс, часов                               | 956   | 4123  | -  | -  |
| Кол-во циклов сборки-разборки                       | -   | -   | 3  | 12   |

Инженер

Директор ЦКП ТГТУ «ПФНМ»

Заказчик

*Чапаксов* Н.А. Чапаксов

*Дьячкова* Т.П. Дьячкова

*Воронин* Н.В. Воронин

ПРИЛОЖЕНИЕ Д - Акты использования результатов  
диссертационной работы (справочное)

ПРИЛОЖЕНИЕ Д1 – Справка о целесообразности внедрения результатов  
диссертационного исследования (Министерство сельского хозяйства  
Тамбовской области)



МИНИСТЕРСТВО  
СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
ТАМБОВСКОЙ ОБЛАСТИ

ул. Советская, д.106А, г. Тамбов, 392017  
Тел. (4752) 78-26-02, факс (4752) 78-26-77  
e-mail: post@agro.tambov.gov.ru  
http://www.agro.tmbreg.ru

29.05.23 № 01-28/1640  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

СПРАВКА

о целесообразности внедрения результатов диссертационного исследования

Результатами диссертационного исследования на тему «Совершенствование технологии и технических средств магнито-термического армирования полимерных деталей вакуумных насосов и уплотнительных элементов гидросистем сельскохозяйственных машин», выполненного Ворониным Н.В. при поддержке гранта РФФИ № 20-33-90298/20, являются:

разработка технологии магнито-термического поверхностного армирования изделий из полимерных материалов;

разработка вариантов предложенной технологии, а также сопутствующего оборудования и технологических процессов для реализации разработанной технологии.

Работа положительно скажется на развитии сельского хозяйства Тамбовской области.

Заместитель министра сельского хозяйства Тамбовской области –  
начальник управления развития отраслей агропромышленного комплекса



*Аксенов*  
А.В.Аксенов

«29» мая 2023 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д2 – Акт внедрения в учебный процесс результатов научно-исследовательской работы (ФГБОУ ВО МичГАУ)

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Мичуринский государственный аграрный университет»  
(ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ)

«УТВЕРЖДАЮ»  
Проректор по учебно-воспитательной  
работе и молодежной политике  
ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ  
*С.В. Соловьев* С.В. Соловьев  
«14» «*апреля*» 2023 г.

**АКТ**

**внедрения в учебный процесс результатов научно-исследовательской работы**

Комиссия в составе председателя - заведующего кафедрой «Технологические процессы и техноферная безопасность», к.т.н., доцента Щербакова С.Ю., членов: доцента кафедры «Технологические процессы и техноферная безопасность» к.т.н. Куденко В.Б., и доцента кафедры «Технологические процессы и техноферная безопасность» к.т.н. Криволапова И.П. составили акт о нижеследующем.

Комиссия рассмотрела материалы научно-исследовательской работы Воронина Н.В. на тему: «Совершенствование технологии и технических средств магнито-термического армирования полимерных деталей вакуумных насосов и уплотнительных элементов гидросистем сельскохозяйственных машин», включающие обоснование технологии магнито-термического поверхностного армирования полимерных деталей машин АПК; результаты теоретических и экспериментальных исследований.

Комиссия отмечает, что рассмотренные материалы имеют существенное прикладное значение и приняты для внедрения в учебный процесс на кафедре «Технологические процессы и техноферная безопасность».

Аналитические и экспериментальные результаты включены в учебный процесс при проведении лекционных, практических и лабораторных работ, а также используются при подготовке выпускных квалификационных и учебно-исследовательских работ по направлению 35.03.06 «Агроинженерия».

Председатель комиссии:

Зав. кафедрой «Технологические процессы и техноферная безопасность», к.т.н., доцент

*С.Ю. Щербаков*  
С.Ю. Щербаков

Члены комиссии:

Доцент кафедры «Технологические процессы и техноферная безопасность», к.т.н., доцент

*В.Б. Куденко*  
В.Б. Куденко

Доцент кафедры «Технологические процессы и техноферная безопасность», к.т.н.

*И.П. Криволапов*  
И.П. Криволапов

**ПРИЛОЖЕНИЕ ДЗ – Акт внедрения в учебный процесс результатов научно-исследовательской работы (ФГБОУ ВО ТГТУ)**

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
 высшего образования  
 «Тамбовский государственный технический университет»  
 (ФГБОУ ВО «ТГТУ»)

Проректор по научной работе  
 ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106  
 Д.Ю. Муромцев  
 «16» «*Июль*» 20*13* г.



**АКТ  
 внедрения в учебный процесс результатов научно-исследовательской работы**

Комиссия в составе председателя - заведующего кафедрой «Агроинженерия», д.т.н., профессора Ведищева С.М., членов: профессора кафедры «Агроинженерия», доцента кафедры «Агроинженерия» к.т.н. Прохорова А.В., и доцента кафедры «Агроинженерия» к.т.н. Брусенкова А.В. составили акт о нижеследующем.

Комиссия рассмотрела материалы научно-исследовательской работы Воронина Н.В. на тему: «Совершенствование технологии и технических средств магнито-термического армирования полимерных деталей вакуумных насосов и уплотнительных элементов гидросистем сельскохозяйственных машин», включающие обоснование технологии магнито-термического поверхностного армирования полимерных деталей вакуумных насосов и уплотнительных элементов гидросистем сельскохозяйственных машин; результаты теоретических и экспериментальных исследований.

Комиссия отмечает, что рассмотренные материалы имеют существенное прикладное значение и приняты для внедрения в учебный процесс на кафедре «Агроинженерия».

Аналитические и экспериментальные результаты включены в учебный процесс при проведении лекционных, практических и лабораторных работ, а также используются при подготовке выпускных квалификационных и учебно-исследовательских работ по направлению 35.03.06 «Агроинженерия».


Председатель комиссии:

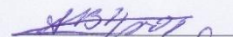
Зав. кафедрой «Агроинженерия», д.т.н.,  
 профессор

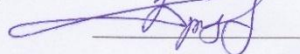
Члены комиссии:

Доцент кафедры «Агроинженерия»,  
 к.т.н.

Доцент кафедры «Агроинженерия»,  
 к.т.н.

 С.М. Ведищев

 А.В. Прохоров

 А.В. Брусенков

ПРИЛОЖЕНИЕ Д4 – Справка об использовании результатов научного  
исследования (ООО «РСК»)

СПРАВКА  
об использовании результатов научного исследования.

Настоящим удостоверяем, что результат исследования, выполненного соискателем ученой степени кандидата технических наук Ворониным Н.В. при поддержке гранта РФФИ №20-33-90298\20, в виде разработанной технологии и проектов установок для поверхностного упрочнения деталей машин сельскохозяйственной техники, изготавливаемых из полимерных материалов, был рассмотрен, одобрен и принят к использованию на предприятии.

Данная технология позволит улучшить эксплуатационные характеристики как уже готовых, так и находящихся на этапе производства деталей машин сельскохозяйственной техники, изготавливаемых из полимерных материалов.

Планируемый экономический эффект – 538 тыс. руб. в год.

Генеральный директор  
ООО «РСК»



С. О. Гришин

ПРИЛОЖЕНИЕ Д5 – Справка об использовании результатов научного труда  
(ООО «ТЕХЛАЙН»)

СПРАВКА

об использовании результатов научного труда

Настоящим удостоверяем, что результаты исследования, выполненного соискателем ученой степени кандидата технических наук Ворониным Н.В. при поддержке гранта РФФИ №20-33-90298\20, в виде рекомендаций по улучшению поверхностных характеристик деталей машин и оборудования агропромышленного комплекса, изготавливаемых из полимерных материалов, в соответствии с разработанным им способом упрочнения (патент РФ № 2761191 от 6 декабря 2021 года) рассмотрены на заседании технического совета предприятия и рекомендованы к внедрению на участке производства.

Внедрение предложенных технических решений обеспечит повышение надёжности деталей из полимерных материалов и качества готовой продукции.

Ожидаемый (планируемый) экономический эффект – 577 тыс. руб. в год.

Генеральный директор  
ООО «ТЕХЛАЙН»



А.С. Зорин

ПРИЛОЖЕНИЕ Д6 – Справка об использовании результатов диссертационного исследования (ИП КФХ С.А. Третьяков)

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационного исследования

Настоящим удостоверяем, что результаты диссертационного исследования, выполненного соискателем ученой степени кандидата технических наук Ворониным Н.В. при поддержке гранта РФФИ №20-33-90298\20, представленные:

- технологией магнито-термического поверхностного армирования деталей сельскохозяйственных машин и оборудования, изготовленных из полимерных материалов (патент РФ № 2761191 от 6 декабря 2021 года), как находящихся на стадии производства, так и уже готовых;


- рекомендациями по улучшению поверхностных характеристик изношенных деталей машин и оборудования сельского хозяйства, изготавливаемых из полимерных материалов, в соответствии с разработанной им технологией упрочнения,

**рассмотрены и рекомендованы к внедрению.** Использование предложенных технических решений обеспечит повышение надёжности деталей из полимерных материалов, а также увеличит их срок службы.

Ожидаемый экономический эффект – 487 тыс. руб. в год.

ИП КФХ



 С.А. Третьяков

ПРИЛОЖЕНИЕ Д7 – Справка об использовании результатов научного  
исследования (ООО «АГРО-АЛЬЯНС»)

СПРАВКА

об использовании результатов научного исследования.

Настоящим удостоверяем, что результат исследования, выполненного соискателем ученой степени кандидата технических наук Ворониным Н.В., в виде технологии магнито-термического поверхностного армирования полимерных деталей сельскохозяйственной техники, разработанной при поддержке гранта РФФИ №20-33-90298\20, рассмотрен, одобрен и рекомендован к внедрению на предприятии.

Внедрение предложенной технологии обеспечит повышение надёжности деталей насосного оборудования, применяемого в нашем производстве. Планируемый экономический эффект – 630 тыс. руб. в год.

Генеральный директор  
ООО «АГРО-АЛЬЯНС»

А.В. Забылин





ПРИЛОЖЕНИЕ Д8 – Справка об использовании результатов диссертационного исследования (ООО «ЭЛЕКТРОСЕРВИС»)

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационного исследования

Настоящим удостоверяем, что результаты диссертационного исследования, выполненного соискателем ученой степени кандидата технических наук Ворониным Н.В. при поддержке гранта РФФИ №20-33-90298\20, представленные технологией магнито-термического армирования деталей вакуумных насосов и уплотнительных элементов гидросистем сельскохозяйственных машин, изготовленных из полимерных материалов (патент РФ № 2761191 от 6 декабря 2021 года), как находящихся на стадии производства, так и уже готовых; практическими рекомендациями по восстановлению изношенных деталей машин АПК, изготавливаемых из полимерных материалов, в соответствии с разработанной им технологией упрочнения,

**рассмотрены и рекомендованы к внедрению.** Использование предложенных технических решений обеспечит повышение надёжности деталей из полимерных материалов, а также увеличит их срок службы.

Ожидаемый экономический эффект – 529 тыс. руб. в год.

Генеральный директор

ООО «ЭЛЕКТРОСЕРВИС»



С.В. Простомолотов