

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Забродина Наталья Александровна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО
МАТЕРИАЛА С ЗАДАНЫМИ
ФРИКЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ**

05.16.06 - Порошковая металлургия и композиционные материалы

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель -
кандидат технических наук,
доцент В.М. Бастраков

Йошкар-Ола
2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 5 |
| Глава 1 АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ВЛИЯЮЩИХ НА СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ | 10 |
| 1.1 Классификация композиционных материалов..... | 11 |
| 1.2 Матрицы, и их влияние на свойства композиционных материалов..... | 13 |
| 1.3 Наполнители для создания композиционных материалов..... | 14 |
| 1.4 Фрикционные материалы..... | 17 |
| 1.5 Технология получения изделия из порошковых материалов..... | 21 |
| 1.6 Применение методов управления качеством при разработке и создании композиционных материалов..... | 23 |
| Выводы по главе 1..... | 30 |
| ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА | 31 |
| 2.1 Требования к изделиям из порошковых композиционных материалов..... | 31 |
| 2.2 Состав исходных компонентов и исследование свойств терморезактивной смолы..... | 33 |
| 2.2.1 Состав исходных компонентов..... | 33 |
| 2.2.2 Выбор методов и средств измерения вязкости смолы..... | 34 |
| 2.2.3. Исследование влияния на вязкость смолы температуры ее нагрева и времени хранения..... | 40 |
| 2.2.4 Определение гранулометрического состава исходного материала..... | 45 |
| 2.3 Технология и оборудование для производства деталей из полимерного композиционного материала..... | 48 |
| 2.4 Методы и средства измерений эксплуатационных параметров..... | 52 |
| 2.4.1 Определение линейной усадки..... | 53 |
| 2.4.2 Определение ударной вязкости..... | 54 |
| 2.4.3 Испытание на растяжение образцов..... | 55 |
| 2.4.4 Испытание образцов на изгиб..... | 56 |

| | |
|--|------------|
| 2.4.5 Исследование микроструктуры образцов..... | 61 |
| 2.4.6 Трибологический анализ взаимосвязи эксплуатационных показателей..... | 62 |
| 2.4.7 Выбор методики контроля твердости материала..... | 64 |
| Выводы по главе 2..... | 76 |
| ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЗАВИСИМОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИЗДЕЛИЯ ОТ ВЛИЯЮЩИХ ФАКТОРОВ..... | 77 |
| 3.1 Разработка плана многофакторного эксперимента..... | 77 |
| 3.2 Установление взаимосвязи эксплуатационных показателей изделий с влияющими факторами..... | 78 |
| 3.3 Проверка модели на воспроизводимость и адекватность..... | 87 |
| 3.4 Определение границ регулирования и экспериментальная проверка математической модели..... | 90 |
| Выводы по главе 3..... | 92 |
| ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ ТВЕРДОСТИ И УСТАНОВКИ ДЛЯ ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ..... | 93 |
| 4.1 Определение величины производственного допуска и разработка методики контроля твердости деталей..... | 93 |
| 4.2 Разработка и создание установки для анализа фрикционных свойств материалов..... | 96 |
| 4.3 Определение характеристик погрешности установки для определения коэффициента трения..... | 101 |
| 4.4 Экспериментальная проверка взаимосвязи коэффициента трения и твердости разработанного композиционного материала..... | 102 |
| 4.5 Экономическая эффективность применения результатов выполненных исследований..... | 105 |
| Выводы по главе 4..... | 110 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 121 |

| | |
|---|------------|
| Основные результаты и выводы..... | 111 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 112 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ..... | 126 |
| Приложение А Протокол исследования гранулометрического состава..... | 126 |
| Приложение Б Акт об апробации результатов диссертационной работы на ООО «Наномет»..... | 129 |
| Приложение В Акт о внедрении в учебный процесс результатов диссертационной работы | 130 |

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время машиностроительная продукция, выпускаемая отечественными предприятиями, по соотношению цена-качество не всегда конкурентоспособна на мировом рынке. Для обеспечения высокой конкурентоспособности изделий в последние годы в нашей стране интенсивно развиваются технологии изготовления деталей из порошковых композиционных материалов. По данным министерства промышленности и торговли РФ ежегодный объем мирового рынка композитов составляет 12 млн. тонн в год и около 30 трлн. рублей в денежном выражении, объемы производства композитов в России исчисляются десятками тысяч тонн и составляют всего 0,3-0,5% от мирового объема. У российского рынка композитов есть перспективы роста и к 2020 году он может увеличиться более чем в 10 раз. В данном случае необходимо было получить изделие, обеспечивающее требуемый уровень демпфирования при минимальном износе сопрягаемых поверхностей. Для обеспечения таких требований была поставлена задача, разработать новый композиционный материал, основным функциональным параметром которого является коэффициент трения.

Существующие методы и средства контроля коэффициента трения для композитов из порошковых материалов не обеспечивают необходимой точности, достоверности результатов и производительности процесса производства. Поэтому необходимо выбрать параметр, функционально связанный с коэффициентом трения и удобный для оперативного контроля. Таким параметром является твердость композиционного материала.

При изготовлении деталей из композитов большое значение имеет стабильность технологических процессов, обеспечивающих значения функциональных параметров продукции в заданных пределах. При освоении производства деталей из нового материала процесс их изготовления не обеспечивал требований, предъявляемых к рассеиванию значений твердости. В связи с этим необходимо разработать модель, устанавливающую корреляцию технологических факторов с функциональными параметрами изделий, что позволит целенаправленно управлять

технологическим процессом изготовления деталей. Данная проблема является актуальной и имеет высокую практическую значимость.

Цель работы. Разработка нового полимерного композиционного материала на основе термореактивной смолы и волокнистого наполнителя, обеспечивающего коэффициент трения в пределах 0,3-0,4 для сопрягаемых поверхностей.

Задачи исследования:

1. Разработать материал с заданными физико-механическими свойствами для изготовления изделий, обеспечивающими демпфирование при минимальном износе сопрягаемых поверхностей.

2. Установить закономерности изменения вязкости смолы от времени и условий хранения, температуры нагрева, определить соотношение полимерной матрицы и наполнителей для обеспечения коэффициента трения в пределах $f_T = 0,3 \dots 0,4$ и твердости 28...32НВ.

3. Выявить взаимосвязь коэффициента трения с твердостью материала и возможные границы их изменения для полученного материала.

4. Исследовать основные факторы, влияющие на функциональные параметры изделий из разработанного материала: вязкость смолы, время выдержки в пресс-форме, температуру прессования, время стабилизации свойств изделия после прессования.

5. Разработать методику оперативного контроля твердости и установку для экспресс-контроля коэффициента трения полученного материала.

Научной новизной обладают следующие результаты исследования:

1. Получен новый композиционный материал, состоящий из полимерной матрицы и волокнистого хризотилового наполнителя с добавлением графита с заданными физико-механическими свойствами (28...32НВ; $f_T = 0,3 \dots 0,4$; $\sigma_s = 15 \dots 25$ МПа).

2. Изучено изменение реологических свойств полимерной смолы при хранении и нагреве. Установлено, что наиболее оптимальной вязкостью смолы для получе-

ния однородного композиционного материала является динамическая вязкость $\eta = 170...327$ сП.

3. Установлены технологические факторы, определяющие требуемые свойства композиционного материала: вязкость смолы, температура и время выдержки в пресс-форме, время стабилизации свойств после получения изделия.

4. По результатам экспериментальных исследований получена математическая модель зависимости твердости от технологических факторов. Установлена взаимосвязь твердости и коэффициента трения. Разработана методика оперативного контроля твердости и установка для определения коэффициента трения материала (Патент РФ № 100830).

Методы исследования. Для достижения поставленной цели и реализации задач использованы положения современной теории создания порошковых композиционных материалов, элементы теории вероятности, теории планирования эксперимента, методы статистического анализа.

Положения, выносимые на защиту:

1. Новый композиционный материал с полимерной матрицей на основе термоактивной смолы и хризотилового волокнистого наполнителя с заданными фрикционными свойствами.

2. Технология получения и результаты исследований физико-механических и эксплуатационных свойств изделий из разработанного композиционного материала.

3. Границы регулирования режимов прессования для обеспечения стабильности свойств изделий из композиционного материала.

4. Экспериментальные результаты исследования взаимосвязи твердости полимерного композиционного материала с влияющими факторами.

5. Методика оперативного контроля твердости изделий из разработанного полимерного композиционного материала.

Достоверность основных научных положений и выводов, обеспечивается использованием современного измерительного оборудования и апробированных

методик измерений, а также математических методов обработки полученных результатов и определяется соответствием теоретических результатов экспериментальным данным.

Практическая значимость работы:

- получен материал с заданными физико-механическими свойствами. (Патент № 2451702);
- разработана и создана установка для исследования фрикционных свойств материалов (Патент № 100830);
- разработана методика экспериментального исследования и получены аналитические зависимости показателей качества изделий из порошкового композиционного материала от влияющих факторов.

Реализация результатов работы. Результаты работы использованы на ООО «Наномет» (Йошкар-Ола) (акт об апробации) и в учебном процессе.

Апробация работы: основные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: научно-технической конференции ПГТУ (МарГТУ) «Наука в условиях современности» (Йошкар-Ола, 2007 г.), Международной молодёжной научной конференции по естественным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу – творчество молодых» (Йошкар-Ола, 2008-2017 г.г.), Всероссийской междисциплинарной научной конференции с международным участием «Вавиловские чтения» (Йошкар-Ола, 2008-2017 г.г.), 7-ой Международной научно-технической конференции «Проблемы обеспечения и повышения качества и конкурентоспособности изделий машиностроения и авиадвигателестроения», 21-23 сентября Брянск, 2015.

Связь работы с научными программами, темами, грантами. Исследования выполнялись в рамках работы по гранту «Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук (НК-134П), тема проекта: «Разработка технологии и способа получения полимерных композиционных материалов с заданными физико-механическими свойствами».

По результатам работы получена золотая медаль XVI Московского международного Салона изобретений и инновационных технологий «Архимед -2013» (02.04 – 05.04.2013).

Публикации по теме диссертации: Основные результаты представлены в 16 опубликованных работах, из них четыре в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, двух патентах РФ.

Соответствие диссертации паспорту специальности 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы

диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует формуле специальности в пунктах:

«-теоретические и прикладные аспекты получения, обработки и применения современных порошковых материалов и волокон различной природы, геометрии и размера, теорию и технологию компактирования частиц и волокон, управление структурой и свойствами материалов и изделий из них»;

области исследования в пункте:

«Изучение структуры и свойств порошковых, композиционных полуфабрикатов и изделий, покрытий и модифицированных слоев на полуфабрикатах и изделиях, полученных методом порошковой металлургии или другими способами».

Личный вклад автора. Автором получен новый композиционный материал и определены зависимости эксплуатационных показателей от технологических факторов.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа представлена введением, четырьмя главами, основными выводами и результатами работы; изложена на 130 страницах, содержит 39 рисунков, 51 таблицу, список литературы из 131 наименования и приложений.

Глава 1. АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ВЛИЯЮЩИХ НА СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Композиционный материал – это материал, который может состоять из двух и более компонентов. Армирующие элементы (нити, моно-волокна, жгуты, ткани, ленты, сетки, холсты) обеспечивают необходимые механические характеристики материала. Матрица (или связующее) обеспечивает совместную работу армирующих элементов [1-8]. Свойства композиционного материала определяются свойствами волокон, матрицы и способом армирования.

Высокопрочные волокна в композитах воспринимают основные напряжения, возникающие в изделии при действии внешних нагрузок, и обеспечивают необходимую прочность в направлении ориентации волокон [9,10].

При получении композиционных материалов с заданными физико-механическими характеристиками следует иметь в виду [1,12,13]:

- 1) свойства материала формируются в процессе производства определенной конструкции;
- 2) процесс создания начинается с конструирования материала - выбора исходных компонентов и режимов производства;
- 3) при назначении требований к материалу следует учитывать особенности технологического процесса производства;
- 4) в отличие от традиционных, особенность создания конструкций из композиционных материалов, заключается в том, что создание материала, проектирование самой конструкции и разработка технологического процесса изготовления — это взаимосвязанный, единый процесс, в котором каждая из составляющих дополняет и определяет другую.

Содержание настоящей работы обобщает результаты исследований и разработок изделий из полимерных композиционных материалов. Исследованиям в области создания композиционных материалов, порошковой металлургии посвящены работы ученых: Антипова Ю.В., Бабаевского П.Г., Васильева В.В., Григо-

рьева О.Н., Довыденкова В.А., Меркулова В.Д., Мозгунова В.Н., Мурашова Б.А., Шалунова Е.П., Шумаева С.В. [1, 11-13, 37,41-45].

Научным исследованиям в области трибологии и исследованию фрикционных свойств материалов посвящены работы ученых: Чичинадзе А.В., Крагельского И.В, Мамхегова М.А. и Михина Н.М. и других ученых [16-17, 20-22, 25, 26, 29, 30].

1.1 Классификация композиционных материалов

В композиционных материалах армирующие элементы соединены матрицей: полимерной, металлической, керамической, минеральной (рис.1.2), которая обеспечивает совместную работу волокон, перераспределение нагрузки при разрушении. Композиционные материалы с матричной структурой делятся на хаотично-армированные и упорядоченно-армированные (рис. 1.1) [12].

В результате совмещения армирующих элементов с матрицей с применением различных технологий образуется комплекс свойств нового композиционного материала, как отражающего исходные характеристики его составных компонентов, но и свойства, которыми изолированные компоненты не обладают.

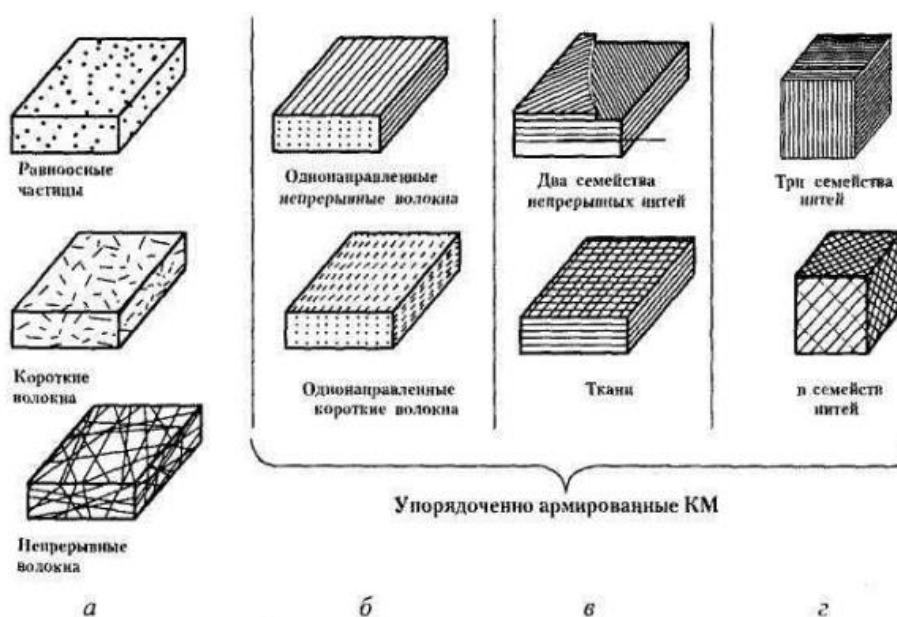


Рис. 1.1. Схема классификации композиционных материалов по конструкционному признаку: а) хаотично, б – г) одномерно и пространственно-армированные

При создании волокнистых композиционных материалов основным требованием будет совместимость материалов матрицы и используемых волокон. Таким образом, совместимыми считаются компоненты, обеспечивающие достижение прочной связи на их границе, близкой к прочности матрицы, также, обеспечивающие сохранность имеющихся свойств компонентов [1, 12].

Введение добавок может варьировать различные эксплуатационные характеристики базового полимера. Для направленного варьирования свойств, вводят следующие добавки:

- упрочняющие наполнители;
- пластификаторы, улучшающие технологические и эксплуатационные свойства;
- стабилизаторы, повышающие эксплуатационную и технологическую стабильность;
- различные фрикционные и антифрикционные добавки;
- для регулирования теплопроводности, электропроводности;
- антипирены для снижения горючести;
- фунгициды, повышающие устойчивость к воздействию микроорганизмов;
- для регулирования оптических характеристик;
- антистатики и пр.

Для создания композиций с заданными требованиями выбирают соответствующие добавки, влияющие на их свойства. Это расширяет производственные потребности в более технологичных материалах и сферы применения композитов с заданными характеристиками в самых разных отраслях производства [44, 99, 100].

1.2 Матрицы, и их влияние на свойства композиционных материалов

Важнейший компонент композиционного материала – матрица. Требования, предъявляемые к ним, разделяют на эксплуатационные и технологические. Эксплуатационные, обусловлены как механическими, так и физико-химическими свойствами матрицы и обеспечивают работоспособность композиции под воздействием эксплуатационных факторов. Механические – должны обеспечить работу армирующих волокон под воздействием различных видов нагрузок.

Основа матрицы задает рабочие температуры композиционного материала, характер варьирования свойств под воздействием различных факторов. С повышением температуры прочность и упругие характеристики материалов матрицы снижаются. Матрица также определяет химическую стойкость, электрические, частично теплофизические и иные свойства.

В изделиях из полимерных композиционных материалов в качестве матриц применяются материалы [5-7], указанные на схеме рис.1.2.

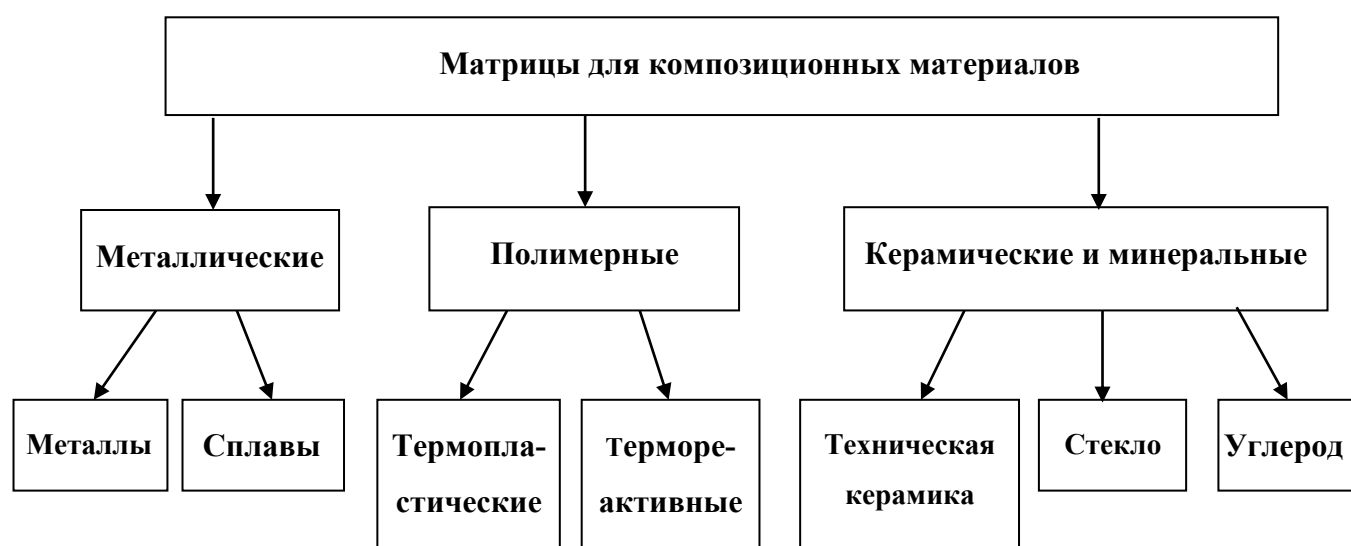


Рис.1.2 Схема классификации материалов матриц

Металлические матрицы волокнистых композитов – это легкие (алюминий, бериллий, магний) и жаропрочные металлы (титан, никель, ниобий) и сплавы. Распространёнными, как матричный материал, являются алюминиевые сплавы,

ввиду хорошего совмещения в них как физико-механических, так и технологических свойств.

В последние годы в качестве матриц все чаще применяют термопластичные материалы. К их конструкторским преимуществам относят надежность изделий из них, обусловленную низким уровнем остаточных напряжений, релаксирующих в термопластичной матрице в начальные часы после формования изделий.

Также значительными являются их технологические достоинства: неограниченная жизнеспособность сырья и полуфабрикатов, малый цикл формования изделий вследствие исключения необходимости отверждения связующего, широкие технологические возможности вследствие применения характерных для термопластов методов производства — штамповки, гибки, послойного комбинирования листовых заготовок, сварки пултрузии и т.п. [9, 13].

Дополнительные перспективы и экологический эффект появляются вследствие снижения трудоемкости исправления технологических дефектов и возможностью утилизации отходов и переработки изделий. Применение термопластичных связующих, также может способствовать существенному снижению себестоимости продукции из композиционных материалов. К недостаткам можно отнести: зависимость характеристик композиционных материалов от влияния температуры, низкую теплостойкость термопластов (исключая специальные теплостойкие материалы) и технологические сложности, вследствие высокой вязкости их в растворах и расплавах.

1.3 Наполнители для создания композиционных материалов

Наполнители – это мелкодисперсные порошки органических и неорганических веществ (каолин, мел, асбест, оксиды металлов, тальк, слюда, белая сажа), волокна (хлопчатобумажные, асбестовые, полимерные, стеклянные), листы (ткани из различных волокон, бумага) [5]. Их добавляют для улучшения эксплуатационных свойств. Наполнители, часто называются упрочнителями так как они играют главную роль в упрочнении композиционного материала. По свойствам упрочни-

тели существенно превосходят матрицу, поскольку обладают большой прочностью, твёрдостью и модулем упругости. С увеличением модуля упругости и временного сопротивления наполнителя, соответствующие характеристики композита повышаются, хотя и не достигают свойств наполнителя.

Композиционные материалы по форме наполнителя делятся на: слоистые, волокнистые и дисперсно-упрочнённые.

Слоистые композиционные материалы – упрочнённые двумерными наполнителями; волокнистые – упрочнённые одномерными или одномерными и двумерными наполнителями; дисперсно-упрочнённые – композиты, упрочнённые нульмерными наполнителями.

На рис.1.3 представлена схема наполнителей для композиционного материала [5-8].

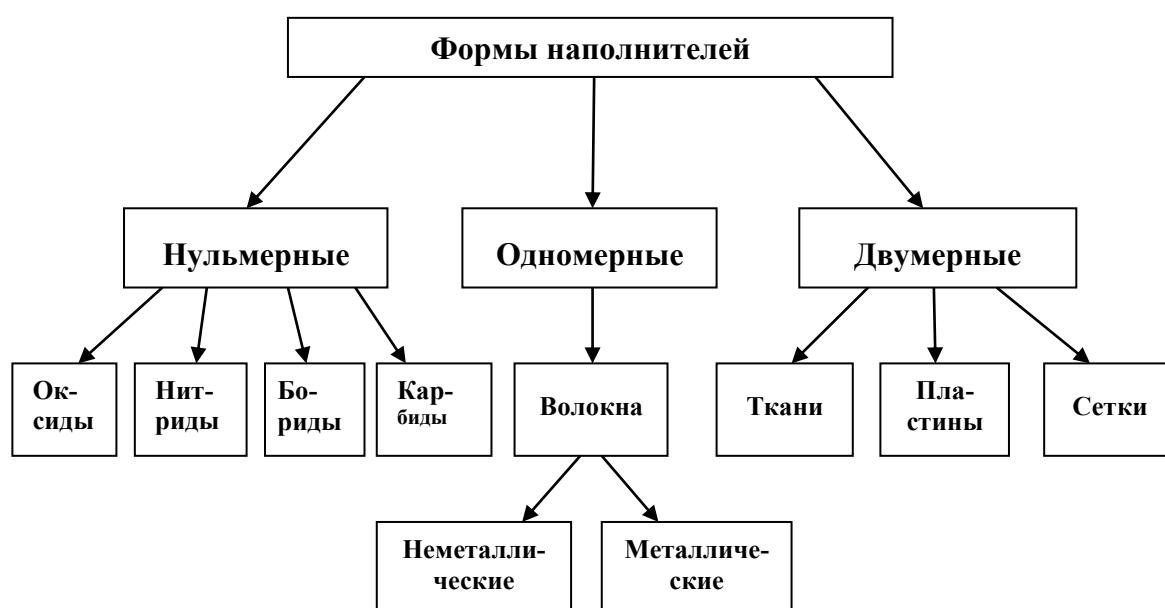


Рис.1.3. Схема классификации материалов наполнителей

Нуль-мерными называют наполнители, которые имеют очень малые размеры одного порядка (частицы) в трёх измерениях. Одномерные наполнители имеют не большие размеры двух направлений и существенно превосходящий их размер третьего измерения – волокна. Для двумерных наполнителей два соответствующих размера соотносимы по размеру с композиционным материалом и существенно превышают третий – ткани, пластины, сетки.

Размер порошкообразных наполнителей – частицы, размером от нескольких нанометров до десятков и сотен микрометров. Фракционный состав, форма частиц, как и их размер, влияют на технологию производства композиционных материалов и их свойства. Дисперсные наполнители способствуют повышению вязкости и температуры переработки полимеров, снижению технологической усадки, увеличению размерной стабильности готовых деталей, повышению модуля упругости материала. Наполнители не только оказывают влияние на технологические и эксплуатационные свойства материалов, но и, зачастую, уменьшают их стоимость, так как, в большинстве случаев, дешевле полимеров.

Наполнители имеют ряд общих и специальных требований, в соответствии с которыми полимерным композиционным материалам придаются необходимые свойства [5, 6]. К общим требованиям относятся высокий уровень смачиваемости полимерным материалом, высокая химическая и термическая стойкость, диспергируемость в полимере, нетоксичность, низкая стоимость.

Характеристики некоторых дисперсных наполнителей представлены в табл.1.1

Таблица 1.1

Характеристики дисперсных наполнителей

| Наименование | Плотность, г/см ³ | Твердость по Моосу | Температура, °С | |
|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------|-----------------|-------------|
| | | | Плавления | Размягчения |
| Каолин | 2,6 | 1 | - | 1000 |
| Тальк | 2,8 | 1 | 1500 | - |
| Слюда | 2,8 | 2,5-3,5 | - | 1290 |
| Мел | 2,6-2,9 | 3 | - | 920 |
| Белая сажа | 2,2 | - | 1200 | - |
| Асбест | 2,7 | - | 1550 | - |
| Гипс | 2,3 | 2 | - | 550 |
| Технический углерод (сажа) | 1,8 | 3 | - | - |

Специальные требования определяются задачами, решаемыми с помощью наполнителя: повышения электропроводности, теплостойкости, создание негорючих материалов и снижения их плотности, улучшение технологичности и другие.

Одним из самых распространенных армирующих компонентом фрикционных полимерных материалов – это хризотилевое (асбестовое) волокно, обладающее высокой прочностью (до 3 ГПа), что позволяет обеспечивать высокие механические свойства и теплостойкость материала. Кроме того, волокна асбеста способны очищать поверхности трения от загрязнений, обеспечивать высокий коэффициент трения (до 0,8), а также способствовать сопротивлению усталости при температурных изменениях.

Характеристики наполненных полимерных композиционных материалов определяются свойствами полимерной матрицы, дисперсного наполнителя и их совместного действия на границе раздела.

Содержание наполнителей в полимерном композите должно быть обоснованным с точки зрения возможности его переработки, с его увеличением растет вязкость материала, с учетом влияния на эксплуатационные характеристики. Содержание наполнителя выше оптимального может ухудшать свойства композиционного материала.

1.4 Фрикционные материалы

Концепции современного конструирования [6, 7, 9] часто предполагают сочетание противоречивых свойств проектируемого материала, таких как, высокий коэффициент трения и малый износ, высокая механическая прочность при значительной податливости, высокая прочность при низкой плотности и др. При работе в экстремальных условиях требуются материалы с заданными свойствами (коррозионно-, температурно-, радиационно- устойчивые).

Фрикционные материалы предназначены или используются для работы в узлах передачи или рассеивания кинетической энергии (тормоза, демпферы, фрикционные муфты, сцепления и пр.). Их эффективность работы в особой степени определяется величиной коэффициента трения и твердости материала. Значения коэффициента трения определяются для конкретных условий эксплуатации и могут изменяться в широком диапазоне (от 0,07 до 1).

Фрикционные материалы должны обладать высоким и стабильным коэффициентом трения, достаточным уровнем износостойкости, прочности, устойчивости к температурным изменениям, к влиянию абразива и агрессивных сред.

При упругих деформациях в зонах контакта взаимодействие твердых тел может осуществляться при ненасыщенном и насыщенном фрикционных контактах. Представления о ненасыщенном и насыщенном фрикционных контактах предложено и разработано Н.М. Михиным [28].

Расстояния между отдельными зонами при упругом ненасыщенном контакте достаточно велики, таким образом, взаимным влиянием отдельных зон можно пренебречь. Величина общей силы трения при скольжении абсолютно жесткого шероховатого тела относительно менее жесткого твердого гладкого тела определяется:

$$F_T = \int F_{Ti} dn_i, \quad (1.1)$$

где F_{Ti} – сила трения на единичной произвольной микронеровности;

n_i – численное значение микронеровностей с одинаковой величиной внедрения.

Фрикционная теплостойкость определяет температурное варьирование фрикционных характеристик материала, выражается, как правило, через изменение коэффициента трения и интенсивность изнашивания.

Фрикционная термоусталость – важное свойство, характеризующее накопление необратимых изменений под действием многократного (циклического) совместного теплового и силового нагружений, что приводит к образованию на поверхности трения трещин. При этом, изменения от тепловых нагрузок в ряде фрикционных узлов получаются больше, чем от механических. В дальнейшем происходит развитие трещин под влиянием обоих видов нагрузок [47].

Таким образом, обоснование выбора фрикционных материалов должно осуществляться с учетом тепловых условий работы узла трения. На всем рабочем диапазоне рабочих температур не должны осуществляться фазовые превращения материала, вызывающие изменение его объема, поскольку, вследствие влияния остаточных напряжений, это может приводить к более быстрому усталостному

разрушению всей конструкции. Порошковая металлургия позволяет получать фрикционные материалы с заданными свойствами (таблица 1.2).

Таблица 1.2

**Фрикционные материалы,
получаемые методом порошковой металлургии**

| Марка материала | Массовая доля, % | | | | | | Другие добавки, % |
|-----------------|------------------|----|----|--------|------------------|-----------------------|--|
| | Fe | Cu | Ni | Графит | SiO ₂ | Хризотилковое волокно | |
| ФМК-8 | 45 | – | 25 | 7 | – | – | 10 – Cr; 6 – W; 7 – Cu ₂ S |
| ФМК-11 | 64 | 15 | – | 9 | 3 | 3 | 3 – SiO ₂ ; 6 – BaSO ₄ |
| МКВ-50А | 64 | 10 | – | 8 | – | 3 | 5 – FeSO ₄ ; 5 – В ₄ С |
| СМК-80 | 48 | 23 | – | – | 3,5 | – | 6,5 – Mn; 6,5 – BN; 10 – В ₄ С; 2,5 – MoS ₂ |
| МК-5 | 4 | 71 | – | 7 | – | – | 9 – Sn; 9 – Pb |
| ФАБ | 5 | 69 | – | 7 | – | – | 11 – Al; 8 – Pb |

Материалы марок ФМК-8, ФМК-11, МКВ-50А были разработаны для тяжело нагруженных тормозов и муфт самолетов, военной техники. Материал СМК-80 используется в тормозах и муфтах сцепления большегрузных автомобилей. Наибольшее распространение получили материалы МК-5 и МК-263, из них изготавливают тормозные диски, колодки и накладки для муфт сцепления в автомобиле- и тракторостроении.

В таблице 1.3 представлены физико-механические свойства спеченных фрикционных материалов на основе железа и меди.

Таблица 1.3

**Спеченные фрикционные материалы на основе железа и меди.
Физико-механические характеристики**

| Характеристика | Марка материала | | | | | |
|---------------------------------------|-----------------|----------|----------|---------|---------|----------|
| | ФМК-8 | ФМК-11 | МКВ-50А | СМК-80 | МК-5 | ФАБ |
| $\rho \cdot 10^3$, кг/м ³ | 7,0 | 6,0 | 5,0 | 5,9 | 5,6-6,3 | 6,0-6,5 |
| Π , % | – | 5-10 | 5-10 | 15-20 | – | – |
| σ_B , МПа | 90-100 | 55-65 | 30-40 | 40-50 | 20-40 | – |
| $\sigma_{сж}$, МПа | 450-500 | 300-350 | 150-210 | 150-250 | 250-280 | 400-500 |
| НВ, МПа | 600-850 | 800-1000 | 800-1000 | 850-950 | 150-450 | 600-1000 |

Состав материалов, обычно, формируют три основных компонента: армирующий теплостойкий материал с прочными волокнами, (например, хризотилевое волокно ~15%); неорганические порошковые наполнители, имеющие высокий стабильный коэффициент трения, теплостойкие (железный сурик, баритовый концентрат, окислы хрома и др. металлов, порошкообразный кокс, графит, технический углерод, порошки и стружка меди, латуни, цинка, алюминия, железа ~ до 60%); полимерное связующее, такое как натуральные и синтетические каучуки, смолы (например, бутадиеновые каучуки, фенол-формальдегидные, эпоксидные смолы, 15 – 30%), дополненные вулканизаторами, отвердителями, ускорителями, активаторами [47].

Наиболее распространенным армирующим элементом является уникальный природный материал асбест (хризотилевое волокно). Длина волокна, в среднем, составляет от 1 до 3 мм. По своей химической природе асбест является водным силикатом магния. Волокна асбеста имеют высокую прочность на растяжение (до 3000 МПа), что превышает прочность стали. Замена хризотилового волокна волокнами из базальта, бора, стекла, шлака, углерода, или их модификациями не дает сходного эффекта с асбестом. Например, в способности очищать поверхность металлического контртела, с поглощением продуктов изнашивания [49].

Фрикционно-полимерные материалы на каучуковых связующих обладают достаточно высокими фрикционно-износостойкими свойствами до 200...250 °С, дальнейшее повышение температуры делает их износостойкость недостаточной и является причиной низкого коэффициента трения. Изделия на смоляной основе имеют более высокую теплостойкость, нестабильный коэффициент трения, хрупкость. Таким образом наилучший результат достигается совместным использованием смол и каучуков. Неудачное сочетание связующих при нестабильном коэффициенте трения может приводить к возникновению автофрикционных колебаний (скрип и визг тормозов) [47, 53].

1.5 Технология получения изделия из порошковых материалов

Создание изделий с заданными эксплуатационными характеристиками предполагает выбор методов и режимов обработки для обеспечения монолитности материала, необходимой ориентации и равнонапряженности армирующего наполнителя [1, 9, 10, 13, 33, 46-73].

Операции подготовки включают: сушку, разные виды энергетической и химической обработки наполнителя; подготовку формообразующей оснастки и оборудования; приготовление связующего и соединение с наполнителем (в некоторых случаях). Также при выборе метода получения заготовок изделия следует учитывать структуру и форму применяемого армирующего наполнителя.

Для получения изделий из реактопластов, армированных дискретными волокнами, часто применяются основные методы формования: прямое, литьевое прессование, интрузию [53].

При прямом прессовании получают изделия различных размеров, форм, толщин, в основном из реактопластов, представленных в виде порошков, гранул и т.п. Полимерные материалы перед прессованием подвергают сушке, таблетированию, предварительному нагреву, что позволяет улучшить их технологические свойства, а также качество изготавливаемых деталей. Дозированное количество полуфабриката помещают в нагретую прессформу, соответствующую конфигурации изготавливаемой детали (рис. 1.4).

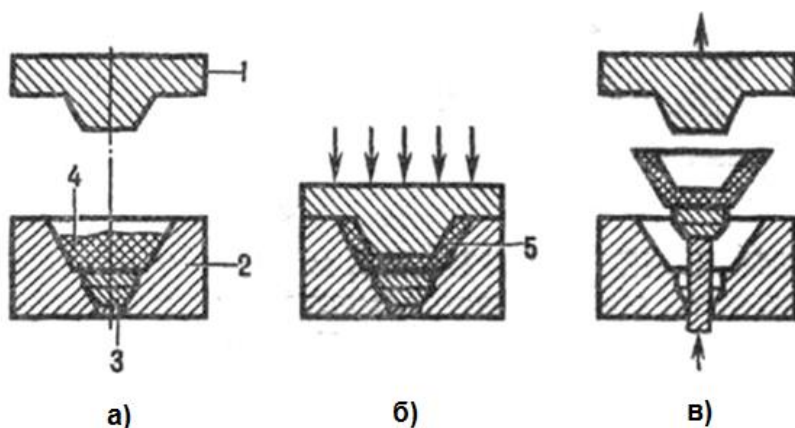


Рис. 1.4 Прямое прессование: а-загрузка; б-прессование; в - выталкивание; 1-пуансон; 2-матрица; 3- выталкиватель; 4- прессматериал; 5- готовая деталь.

После смыкания прессформы происходит нагрев материала, под давлением он переходит в вязкотекучее состояние, заполняет оформляющую полость, уплотняется. Для фиксирования формы изделия материал выдерживается в прессформе под давлением с целью завершения отверждения полимерного материала. Готовая деталь выталкивается (извлекается) из нагретой прессформы.

При литьевом (трансферном) прессовании, формование идет в прессформах, у которых, оформляющая полость отделена от загрузочной камеры, она соединяется с ней литниковыми каналами (рис. 1.5).

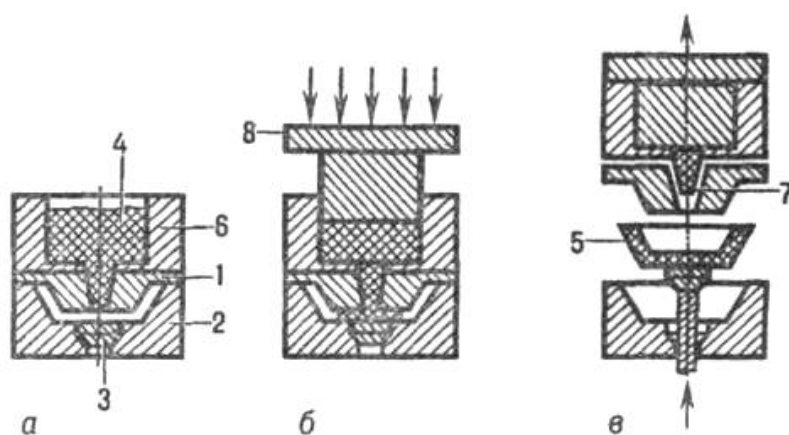


Рис. 1.5. Литьевое прессование:
 а-прессформа (нагрета, закрыта);
 б-передавливание расплавленного материала в оформляющую полость с его отверждением;
 в-разъем прессформы;
 1-пуансон; 2-матрица; 3-выталкиватель; 4-прессматериал; 5-готовая деталь; 6-загрузочная камера; 7-остаток прессматериала в литьевом канале прессформы; 8-литьевой пуансон.

Помещенный в загрузочную камеру нагретой прессформы материал, в ходе прессования становится вязкотекучим (при давлении 60-200 Мпа) и по литниковому каналу перетекает в оформляющую полость прессформы, в которой он дополнительно прогревается и отверждается.

При интрузии можно формировать толстостенные изделия с помощью винтовых литьевых машин. Формование деталей из наполненных реактопластов экструзией осуществляют в основном на поршневых машинах (штранг-прессование), поскольку расплав материала очень вязкий. Конструкция головки выбирается таким образом, чтобы материал достаточно уплотнялся и на выходе из головки изделие имело товарный вид и необходимую технологическую прочность [53].

1.6 Применение методов управления качеством при разработке и создании композиционных материалов

Применение методов управления качеством в областях машиностроения и автомобилестроения хорошо изучено и отражено в работах [74-82]. Совершенствование машиностроительных предприятий происходило в следующих четырех направлениях:

- 1) интеграция принципов TQM с методом экономного производства и концепцией ЛТ;
- 2) внедрение систем менеджмента качества в соответствии с требованиями стандартов ИСО серии 9000;
- 3) применение статистических методов для управления качеством в сочетании с методологией «Шесть сигм».

Современный подход к управлению качеством при разработке и создании изделий из композиционных материалов [83] предполагает объединение всех перечисленных направлений организационного совершенствования в единую систему.

Применение методов управления качеством включает как использование классических инструментов контроля качества, так и активное развитие принципов и методов управления качеством, обеспечивающих совершенствование управления инновационными проектами, которыми являются нанотехнологии, создание кристаллических и композиционных материалов [75, 83].

Создание композиционных материалов и управление качеством в данной области, как сфере применения инноваций, базируется на использовании современных и эффективных методов управления качеством [74].

На процесс создания и производства изделий из порошковых материалов влияет множество факторов, для анализа которых был применен метод экспертной оценки. В качестве экспертов были приглашены квалифицированные специалисты в области материаловедения, порошковой металлургии и композиционных материалов (табл.1.4-1.5).

Список экспертов

| | ФИО эксперта | Профессиональный уровень |
|----|----------------------|--|
| 1. | Давыденков В.А. | д.т.н. директор ОАО «Наномет» |
| 2. | Санникова И.Г. | Начальник отдела композиционных материалов ООО «Наномет» |
| 3. | Мерзлякова О.С. | технолог ООО «Наномет» |
| 4. | Алибеков С. Я. | д.т.н., профессор кафедры машиностроения и материаловедения |
| 5. | Крашенинникова Н. Г. | к.т.н., доцент кафедры химии |
| 6. | Капранова В. И. | главный технолог ОАО «Марат» |
| 7. | Козлова Н. В. | технолог ОАО «Марат» |

В результате предварительного анализа влияния факторов на основной показатель качества изделия - твердость была построена причинно-следственная диаграмма (диаграмма Исикавы).

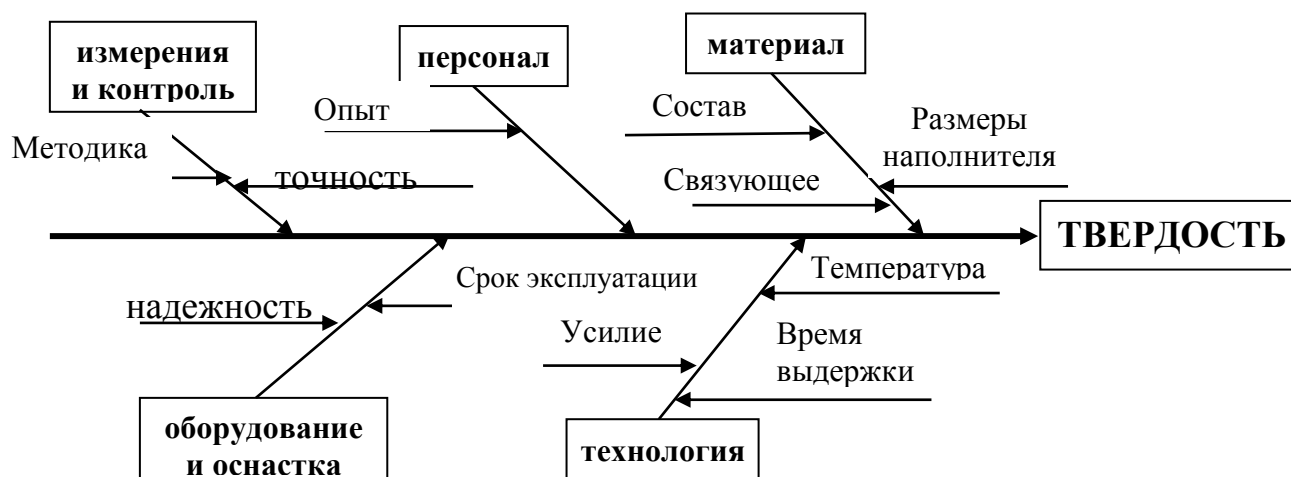


Рис. 1.6. Причинно-следственная диаграмма влияния факторов на твердость изделий

На основе опыта производства, правила «5М» и предварительных исследований были установлены **наиболее важные факторы**, влияющие на приведенные показатели и их возможные предельные значения. К таким факторам относятся следующие:

- 1) материал (состав, связующее и наполнители);
- 2) технология изготовления (температура нагревания пресса, время выдержки в форме и время выдержки после прессования);

- 3) методы и средства измерения и контроля регулируемых параметров и показателей качества изделий.
- 4) оборудование и оснастка.

Для определения весомости каждого фактора при опросе экспертов была составлена анкета, образец которой приведен в табл.1.5.

Таблица 1.5

Форма для экспертных оценок влияния факторов на твёрдость

| Факторы первого уровня | % | Факторы второго уровня | % | Факторы третьего уровня | % |
|-------------------------------|----------|--|----------|---------------------------------|----------|
| Материал | | Связующее | | Поставщик | |
| | | | | Срок хранения | |
| | | | | Температура хранения | |
| | | Состав порошкового наполнителя | | Гидросиликат магния (хризотил) | |
| | | | | Каолин | |
| | | Размеры порошкового наполнителя | | 0,1 – 1 мкм | |
| | | | | 1 – 50 мкм | |
| 50 – 100 мкм | | | | | |
| Технология | | Температура нагрева пресс-формы | | | |
| | | Выдержка в пресс-форме | | | |
| | | Усилие запрессовки | | | |
| | | Время выдержки после прессования | | | |
| Оборудование и оснастка | | Точность показателей температуры | | | |
| | | Точность фиксирования времени (срабатывание) | | | |
| | | Удобство обслуживания | | | |
| Контроль | | Погрешность измерения твёрдости | | Погрешность измерения отпечатка | |
| | | | | Погрешность усилия твердомера | |
| Персонал | | Квалификация | | Образование | |
| | | | | Опыт | |

На основании результатов анкетирования составлены таблицы количественного влияния факторов на основной показатель качества изделий (табл. 1.6, 1.7, 1.8) и диаграммы Парето для двух уровней (рис. 1.7, 1.8, 1.9).

Таблица 1.6

Экспертные оценки весомости влияющих факторов по правилу «5М» в %

| Факторы I уровня | Эксперты | | | | | | | Среднее значение, % | Накопленный процент |
|-------------------------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------------------|---------------------|
| | № 1 | № 2 | № 3 | № 4 | № 5 | № 6 | № 7 | | |
| Материал | 50 | 60 | 60 | 40 | 70 | 30 | 40 | 50 | 50 |
| Технология | 30 | 10 | 15 | 30 | 15 | 40 | 30 | 24,3 | 74,3 |
| Оборудование и оснастка | 10 | 5 | 5 | 20 | 10 | 20 | 20 | 12,8 | 87,1 |
| Измерения и контроль | 5 | 20 | 15 | 5 | 0,5 | 3 | 5 | 7,7 | 94,8 |
| Персонал | 4 | 3 | 3 | 2 | 0,5 | 6 | 3 | 3,1 | 97,9 |
| Прочее | 1 | 2 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 2,1 | 100 |
| Итого: | | | | | | | | 100 | |

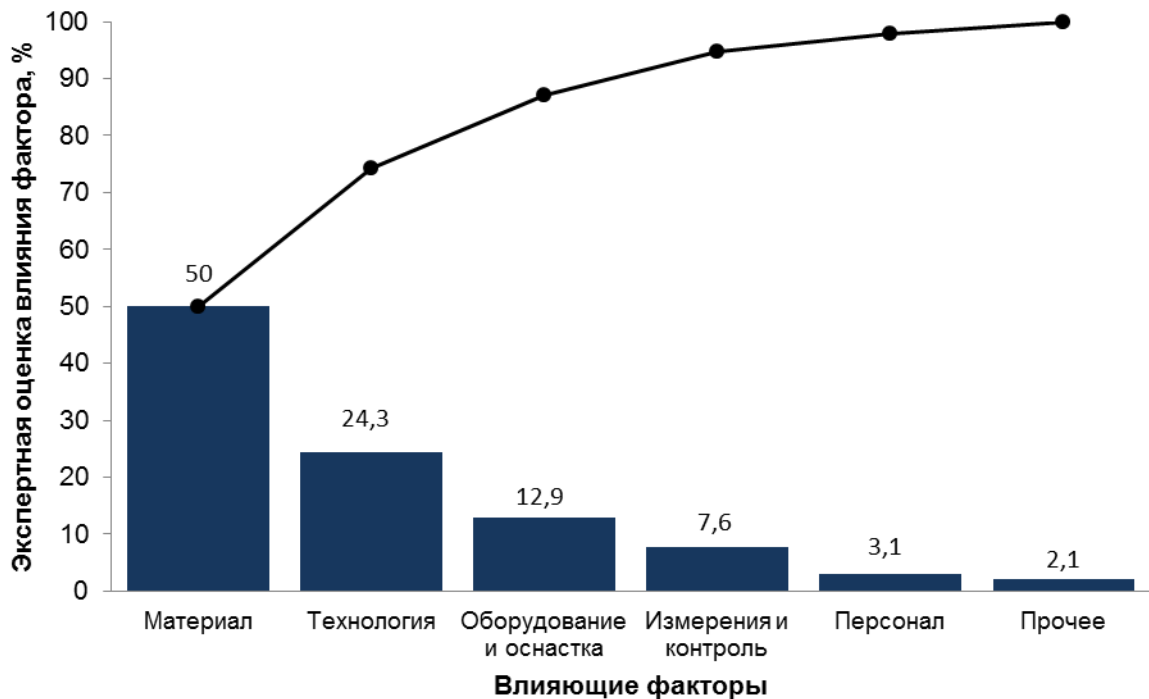


Рис. 1.7. Диаграмма Парето, влияние факторов первого уровня на твердость изделий.

На первом уровне роль материала и технологии составляет 75,7 %. На втором: для материала связующее и содержание наполнителя - 79,6 %.; для технологии – температура нагрева пресс-формы и время выдержки в пресс-форме – 67,4 %. Эти цифры близки к классическому соотношению Парето 80:20.

Таблица 1.7

Экспертный анализ влияния факторов второго уровня (материал) на твердость

| Материал | Эксперты | | | | | | | Среднее значение, % | Накопленный процент |
|---------------------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------------------|---------------------|
| | № 1 | № 2 | № 3 | № 4 | № 5 | № 6 | № 7 | | |
| Связующее | 35 | 65 | 60 | 20 | 50 | 46 | 48 | 46,3 | 46,3 |
| Состав наполнителя | 35 | 20 | 25 | 40 | 35 | 34 | 31 | 31,4 | 77,7 |
| Размеры наполнителя | 25 | 12 | 10 | 38 | 12 | 18 | 20 | 19,3 | 97 |
| Прочее | 5 | 3 | 5 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 100 |
| Итого: | | | | | | | | 100 | |

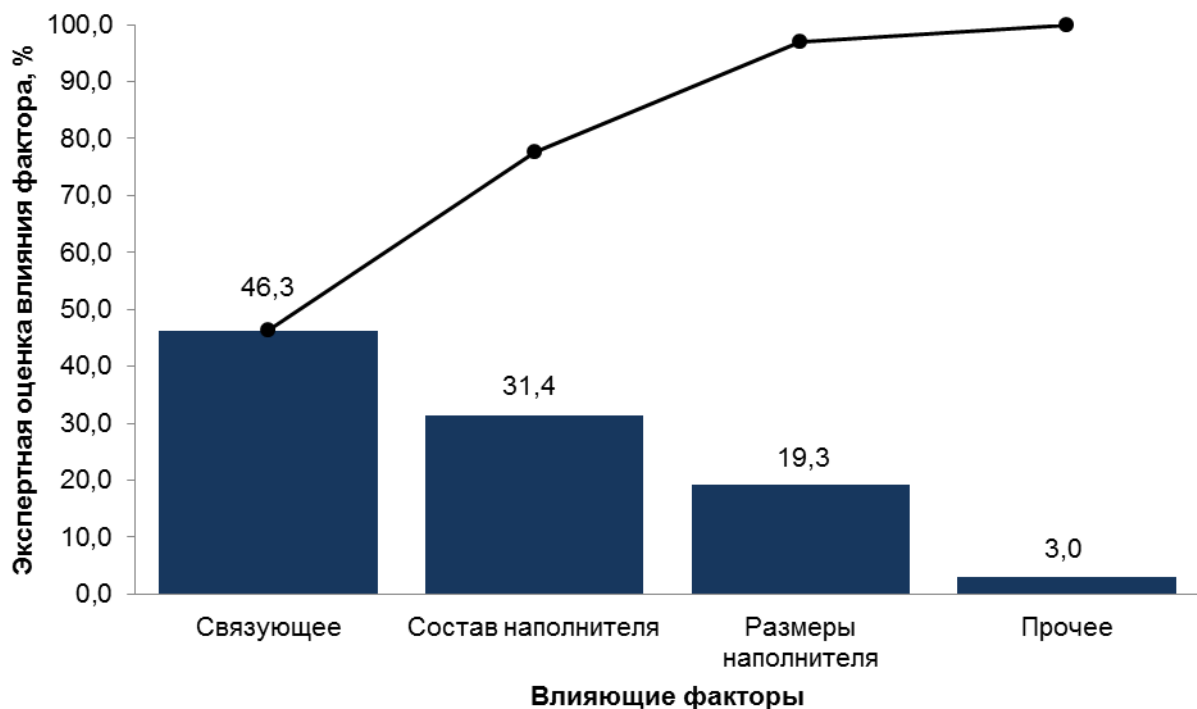


Рис.1.8. Диаграмма Парето, анализ влияния факторов второго уровня (материал) на твердость изделий

Экспертный анализ влияния фактора второго уровня (технология) на показатель качества изделий (твердость)

| Технология | Эксперты | | | | | | | Среднее значение, % | Накопленный процент |
|----------------------------------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------------------|---------------------|
| | № 1 | № 2 | № 3 | № 4 | № 5 | № 6 | № 7 | | |
| Температура нагрева пресс-формы | 40 | 70 | 70 | 20 | 30 | 45 | 46 | 45,7 | 45,7 |
| Выдержка в пресс-форме | 30 | 15 | 15 | 30 | 20 | 22 | 21 | 21,9 | 67,6 |
| Усилие запрессовки | 20 | 5 | 5 | 40 | 25 | 19 | 20 | 19,2 | 86,8 |
| Время выдержки после прессования | 7 | 6 | 7 | 8 | 20 | 12 | 10 | 10 | 96,8 |
| Прочее | 3 | 4 | 3 | 2 | 5 | 2 | 3 | 3,2 | 100 |
| Итого: | | | | | | | | 100 | |

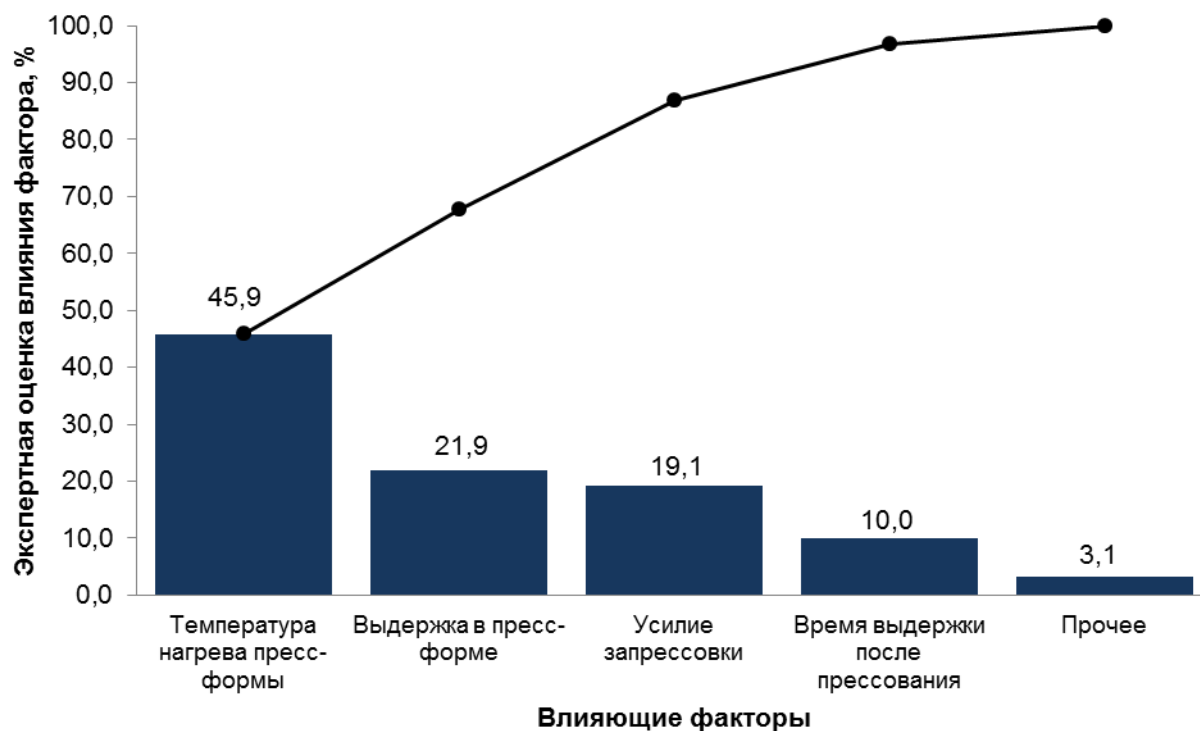


Рис 1.9. Диаграмма Парето, анализ влияния факторов второго уровня (технология) на твердость изделий

Для дальнейшего анализа влияния факторов была использована методология QFD-анализа [74, 76,78,80, 81]. Преобразование требований потребителя через развертывание функций качества (Quality Function Development) позволяет определить наличие взаимосвязи между требованиями и характеристиками.

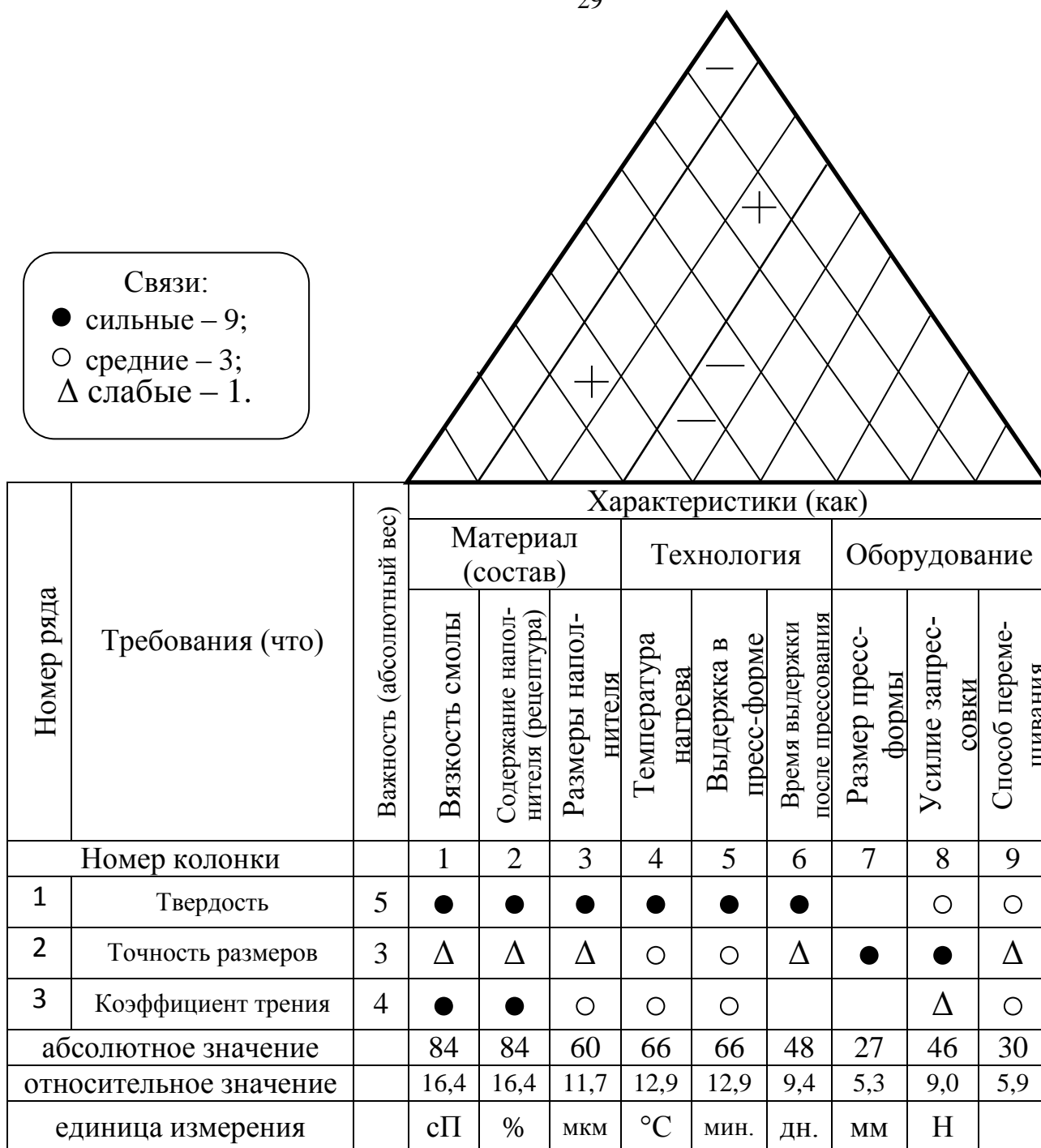


Рис.1.10. Дом Качества изделий из композиционного материала

На рисунке 1.10. изображен Дом Качества для наиболее важных показателей изделий из полимерного композиционного материала, где приведены связи между требованиями (что) и характеристиками (как). Интенсивность взаимосвязей определена экспертным методом.

Наиболее весомыми факторами первого уровня, установленными по диаграммам Парето в соответствии с результатами экспертных оценок, являются ма-

териал, технология, оборудование. Выполненный QFD-анализ позволил выделить факторы, влияние которых нужно исследовать для установления количественных зависимостей: вязкость смолы (16,4%), содержание наполнителя (16,4%), размеры наполнителя (11,7%), температура нагрева пресс-формы (12,9%), время выдержки в пресс-форме (12,9%) и время выдержки после прессования (9,4%). Смола является покупным материалом, поэтому в процессе производства ее вязкость не может быть регулируемой. Состав и размеры наполнителя получаются на предварительных этапах процесса производства, их параметры необходимо подвергать входному контролю. Таким образом, выделены два значимых фактора, регулированием которых можно обеспечить стабильность значений твердости в установленных пределах: температура нагрева пресс-формы и время выдержки в пресс-форме.

Для определения параметров деталей и регулируемых факторов необходимо выбрать средства измерений с метрологическими характеристиками, обеспечивающими необходимую достоверность и точность результатов [92, 94].

Выводы по главе 1

1. Свойства изделий из полимерных материалов в значительной степени определяются свойствами матрицы, составом смеси и режимами процессов изготовления.

2. Основными параметрами, характеризующими требуемые свойства исследуемых изделий, являются коэффициент трения и твердость материала.

3. На основании результатов экспертной оценки и QFD – анализа наиболее весомыми факторами, влияющими на твердость, являются: связующее, состав наполнителя, размеры наполнителя, температура нагрева пресс-формы и время выдержки в пресс-форме, влияние которых нужно исследовать для установления количественных зависимостей.

4. Стабильное значение твердости изделия в процессе производства можно обеспечить своевременным регулированием режимов прессования: температурой нагрева пресс-формы и временем выдержки в пресс-форме.

Глава 2. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

2.1. Требования к изделиям из порошковых композиционных материалов

Комплекс свойств, разрабатываемого композиционного, определяется исходными компонентами и их соотношением, взаимодействием между ними, видами армирующих волокон наполнителя, применяемыми методами и технологиями изготовления (давление, температура, время прессования), дополнительной обработкой изделий и прочими факторами [1, 3, 5-8, 38, 48].

Чем выше требуемые характеристики разрабатываемого композиционного материала конструкционного назначения, тем более комплексные и сложные требования должен выдерживаться при выборе исходных компонентов для выпуска качественных изделий. Эти требования включают:

- определенное соотношение между механическими свойствами армирующих волокон и матрицы;
- модуль упругости при растяжении и сдвиге волокон должен быть больше чем у связующего;
- прочность волокон должна быть больше чем у связующего;
- удлинение при разрыве волокон должно быть несколько меньше чем у связующего;
- коэффициенты Пуассона для волокон и матрицы подразумеваются достаточно близким для снижения вероятности напряжений на границе волокно–матрица при деформации композита;
- термические характеристики волокон (температуры плавления или разложения) должны быть выше температур переработки термопластов и отверждения реактопластов.

Для обеспечения высокой реализации механических свойств волокон армированного материала и его монолитности необходимы [54]:

- 1) хорошая смачиваемость волокон связующим;

2) высокий уровень адгезии между волокном и матрицей (характеризуется сдвиговой прочностью границы раздела волокно–матрица);

3) минимальное изменение свойств волокон под влиянием компонентов матрицы;

4) снижение внутренних напряжений в элементарном объеме волокно–матрица под влиянием температур, компонентов связующего и прочих факторов.

Определение состава и выбор основных компонентов композиционных материалов [5, 7, 9, 12, 99, 100] необходимо осуществлять с учетом субъективных свойств волокнистого полуфабриката и полимерной матрицы [101, 109], с учетом их взаимного влияния, определяемого рядом факторов, с учетом следующих – прочность, деформационные и иные свойства волокон, термостойкость, размерный состав и структура, объемная доля и ориентация волокон волокнистого материала; прочность, термостойкость, значение вязкости полимерного связующего для условиях переработки; деформационные свойства компонентов, вариация свойств волокон под действием компонентов полимерной матрицы, смачивание и величина адгезии на границе раздела фаз.

2.2 Состав исходных компонентов и исследование свойств терморезактивной смолы

2.2.1 Состав исходных компонентов

Предварительно проведено исследование различных составов исходных компонентов. Требуемые значения эксплуатационных параметров могут быть получены для состава масс. %:

- терморезактивная смола (СФЖ- 3031) - 33-53;
- волокнистый наполнитель (хризотил) - 45-66;
- стеарат цинка $Zn(C_{18}H_{35}O_2)_2$ - 0,6-1,2; каолин; графит.

Для получения заданных свойств материала используется терморезактивная смола (СФЖ-3031 ГОСТ 20907-75) $[-C_6H_3(OH)-CH_2-]_n$ – продукт поликонденсации фенола C_6H_5OH с формальдегидом $CH_2 = O$.

Выделяются три основных состояния исследуемой смолы:

Резол (стадия А), смола находится в вязкотекучем состоянии, при нагревании плавится;

Резитол (стадия В), характеризуется вязкоэластичным состоянием, образуется при нагреве смолы до 90-100°C из резола.

Резит (стадия С), характеризуется переходом в твердое состояние в результате нагрева до температуры выше 100°C, образуется из резитола. Далее, при нагреве до 150 °С происходит дальнейшая конденсация и получается химически устойчивый, нерастворимый, неплавкий полимер, который можно нагревать до ~ 300 °С.

Следовательно, резолы являются терморезактивными полимерами, которые при повышении температуры становятся неплавкими и нерастворимыми, поскольку приобретают пространственную (сетчатую) структуру.

Данный переход также осуществляется с течением времени, когда постепенно матрица композиционного материала из состояния резитола переходит в состояние резит, при котором наблюдается потеря пластичности материала, хрупкость и снижением эксплуатационных свойств. Следовательно, мероприятия по искусственному «состариванию» материал не являются желательными, поскольку при этом получение требуемых свойств (твердости) материала, вместе с тем приведет к быстрой потере необходимых эксплуатационных характеристик. Таким образом, необходимыми являются **исследования влияния температуры нагрева смолы и времени ее хранения на вязкость.**

2.2.2 Выбор методов и средств измерения вязкости смолы

Для анализа изменения вязкости смолы СФЖ-3031 исследованы две методики (на основе параллельных многократных измерений одной и той же пробы смолы):

- по ГОСТ 20907-75 «Смолы фенолформальдегидные жидкие. Технические условия» с применением вискозиметра ВПЖ-2 (рис. 2.1);
- по методике экспресс-контроля ГОСТ 8420-74 с применением вискозиметра ВЗ-4.

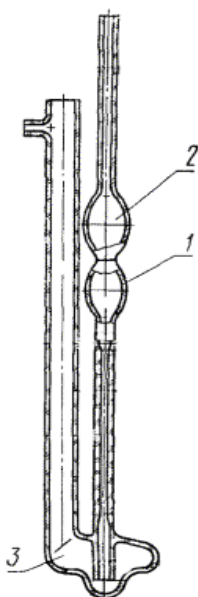


Рис. 2.1. Вискозиметр ВПЖ-2

Числовое значение динамической (абсолютной) вязкости раствора смолы η (ГОСТ 20907-75) в сантипуазах ($cП$) определяется по формуле:

$$\eta = c \cdot \tau \cdot \rho^{20} \quad (2.1)$$

где c – постоянная вискозиметра ($c = 1 \text{ мм}^2/\text{с}^2$);

τ — значение среднего арифметического времени истечения,

c ;

ρ^{20} — значение плотности (при $20 \text{ }^\circ\text{C}$), $\text{г}/\text{см}^3$.

Значение плотности раствора смолы (ГОСТ 18329-73):

$$\rho^{20} = \frac{m_1 - m_0 - A}{m_2 - m_0 - A} \cdot \rho_c, \quad (2.2)$$

где m_1 – масса пикнометра с анализируемой смолой, г;

m_0 – масса пустого пикнометра, г;

m_2 – масса пикнометра с водой, г;

A – поправка на аэростатические силы, г.

$$A = 0,0012 \cdot V, \quad (2.3)$$

где 0,0012 – плотность воздуха при 20°C, г/см³;

V – объем пикнометра, см³.

$$V = \frac{m_2 - m_0}{\rho_c - \rho_a}, \quad (2.4)$$

где $\rho_c = 0,998$ г/см³ – плотность воды при 20 °С;

$\rho_a = 0,0012$ г/см³ – плотность воздуха при 20 °С.

В ходе расчета получены следующие результаты:

$\tau = 176,11$ с – среднее арифметическое времени истечения раствора смолы

$\rho^{20} = 1,21$ г/см³ – плотность анализируемой смолы.

По уравнению (2.1) значение динамической вязкости смолы $\eta = 213$ сП. Величина суммарной погрешности результатов измерений в относительной форме составляет менее 1% для доверительной вероятности 0,95.

При использовании методики контроля по ГОСТ 8420-74 с применением вискозиметра ВЗ-4 (диаметр сопла 4 мм) по 6 результатам наблюдений получено среднее значение времени истечения $t = 41$ с.

В справочном приложении ГОСТ 8420-74 приведены графики соотношения условной и динамической (абсолютной) вязкости рис. 2.2.

На графике (рис. 2.2) нет числового значения между 100 и 200 мм²/с, тогда при среднем арифметическом значении времени истечения испытуемого материала $t = 41$ с кинематическая вязкость ν может быть 170 мм²/с или 180 мм²/с

(стокс), что будет соответствовать динамической вязкости $\eta = 170 \cdot 1,21 = 205,6 \text{ сП}$ или $\eta = 180 \cdot 1,21 = 217,7 \text{ сП}$.

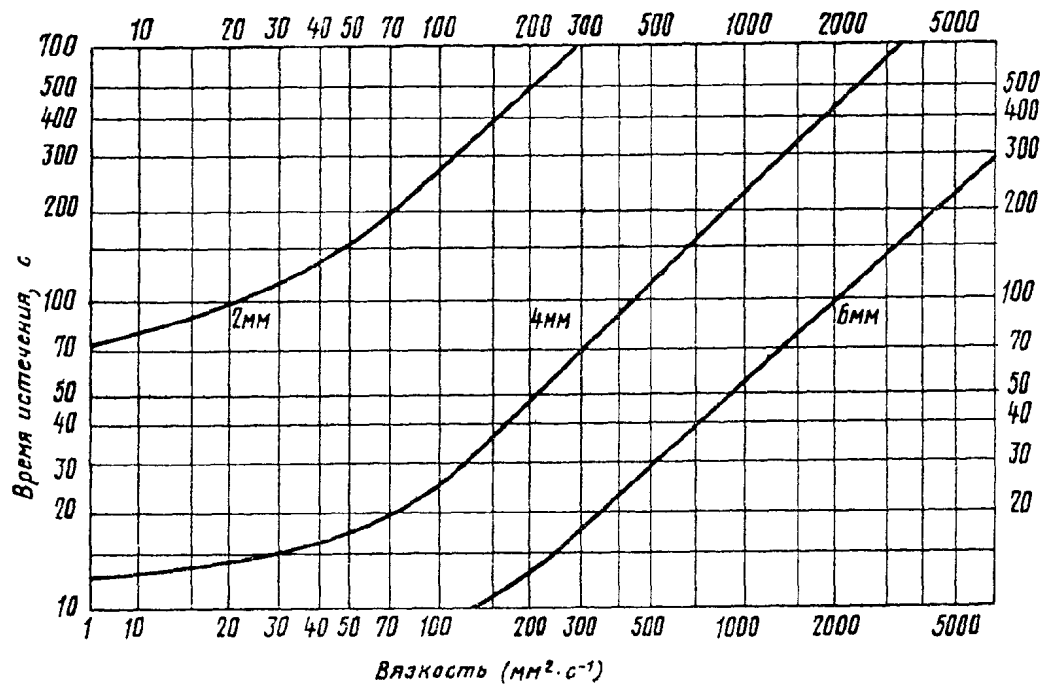


Рис. 2.2 Графики зависимость времени истечения (с) и вязкости (мм²/с) лакокрасочного материала с применением вискозиметров с различным диаметром сопла

В табл. 2.1 приведены результаты определения динамической вязкости смолы СФЖ-3031 с помощью различных вискозиметров [101].

Таблица 2.1

Результаты определения вязкости смолы СФЖ-3031

| | |
|--|---------------------------|
| По ГОСТ 20907-75 – вискозиметр ВПЖ-2 | $\eta = 213 \text{ сП}$ |
| По ГОСТ 8420-74 – вискозиметр ВЗ-4 (при $\nu = 170 \text{ мм}^2/\text{с}$) | $\eta = 205,6 \text{ сП}$ |
| По ГОСТ 8420-74 – вискозиметр ВЗ-4 (при $\nu = 180 \text{ мм}^2/\text{с}$) | $\eta = 217,7 \text{ сП}$ |

Величина вязкости по ГОСТ 20907-75 с использованием вискозиметра ВПЖ-2 находится между вероятными значениями, полученными на вискозиметре ВЗ-4, то его можно принять в качестве действительного. Тогда наибольшая разность между значениями, измеренными по ВПЖ-2 и ВЗ-4, составит 7,7 сП (в относительной форме 3,5 %).

Следовательно, метод определения вязкости смолы с применением вискозиметра ВЗ-4 по ГОСТ 8420-74 имеет большую погрешность, но этот вискозиметр позволяет проводить измерение вязкости образцов смолы при более высокой температуре, поэтому он был использован для измерения вязкости при нагревании смолы.

Анализ погрешностей измерения вязкости смолы СФЖ—3031

При анализе использовались две методики определения вязкости:

- 1) по ГОСТ 20907-75. Смолы фенолформальдегидные жидкие. Технические условия;
- 2) по ГОСТ8420-74. Материалы лакокрасочные. Методы определения условной вязкости.

По первой методике вязкость определяется с использованием вискозиметра ВПЖ-2, а по второй – с использованием вискозиметра ВЗ-4.

Для определения погрешностей измерения выполнялись многократные измерения вязкости одной и той же пробы смолы по обеим методикам.

1. Погрешности измерения вязкости смолы вискозиметром ВПЖ-2

По первой методике (ГОСТ 20907) косвенными измерениями [93] определяется динамическая вязкость η .

По результатам многократных измерений (5 наблюдений) были получены средние значения времени истечения смолы $\tau = 175,7$ с и плотности $\rho = 1,21$ г/см³. Значение динамической вязкости $\eta = 212,5$ сП.

Средние квадратические отклонения $S_\tau = 0,53$ с и $S_\rho = 0,002$ г/см³.

Случайная составляющая погрешности измерения вязкости

$$\varepsilon_\eta = \pm t_p S_\eta / \sqrt{n}, \quad (2.5)$$

где выборочное среднеквадратическое отклонение динамической вязкости при косвенных измерениях по определяющему уравнению (2.1).

$$S_\eta = c \sqrt{\left(\frac{\partial \eta}{\partial \tau}\right)^2 S_\tau^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial \rho}\right)^2 S_\rho^2} = 0,73 \text{ сП.}$$

Тогда случайная составляющая погрешности измерения вязкости с доверительной вероятностью $P = 0,95$ (коэффициент Стьюдента $t_p = 2,78$) будет равна $\varepsilon_{\eta} = 2,78 \cdot 0,73 / \sqrt{5} = 0,9$ *сП*.

Неисключенная систематическая составляющая погрешности измерения динамической вязкости определялась также по определяющему уравнению (2.1).

$$\theta_{\eta} = \frac{\partial \eta}{\partial \tau} \theta_{\tau} + \frac{\partial \eta}{\partial \rho} \theta_{\rho} = c(\rho \theta_{\tau} + \tau \theta_{\rho}), \quad (2.6)$$

где θ_{τ} и θ_{ρ} - границы неисключенных систематических составляющих погрешности измерения времени истечения смолы и ее плотности. Эти границы равны пределам допускаемых погрешностей используемых средств измерений - секундомера и весов, на которых измерялась масса смолы для определения плотности. Погрешность секундомера $\Delta_{\tau} = 0,01$ *с*.

Значение неисключенной систематической составляющей погрешности измерения плотности по определяющему уравнению (2.2) будет

$$\theta_{\rho} = \frac{\partial \rho}{\partial m_0} \theta_m + \frac{\partial \rho}{\partial m_1} \theta_m + \frac{\partial \rho}{\partial m_2} \theta_m. \quad (2.7)$$

Все массы взвешивались на одних весах с погрешностью $\Delta_m = 0,05$ *г*. Результаты взвешивания масс: $m_0 = 27,2$ *г*; $m_1 = 88,6$ *г*; $m_2 = 77,9$ *г*.

При предельной погрешности весов $\Delta_m = 0,05$ *г* и полученных значениях масс значение неисключенной систематической составляющей погрешности измерения плотности, рассчитанное по уравнению (2.7), будет равно

$$\theta_{\rho} = 0,003 \text{ г/см}^3.$$

Тогда, значение неисключенной систематической составляющей погрешности измерения динамической вязкости, рассчитанное по уравнению (2.6), будет равно $\theta_{\eta} = 0,54$ *сП*.

Для определения границы погрешности результата измерения установим значение соотношения $\theta_{\eta} / s_{\bar{\eta}} = 0,54 / 0,3277 = 1,6$,

$$\text{где } s_{\bar{\eta}} = s_{\eta} / \sqrt{n} = 0,733 / 2,236 = 0,33 \text{ сП}.$$

В этом случае, границу погрешности результата измерения следует находить как композицию распределения случайных и неисключенных систематических погрешностей, рассматриваемых как случайные величины, распределенные по закону равной вероятности:

$$\Delta_{\eta} = \pm K S_{\Sigma}, \quad (2.8)$$

$$\text{где } K = \frac{\varepsilon_{\eta} + \theta_{\eta}}{s_{\bar{\eta}} + \sqrt{\theta_{\eta}^2 / 3}} = 2,26, \quad s_{\Sigma} = \sqrt{\theta_{\eta}^2 / 3 + s_{\bar{\eta}}^2} = 0,42 \text{ сП.}$$

Следовательно, граница погрешности результата измерения динамической вязкости с использованием вискозиметра ВПЖ-2 равна $\Delta_{\eta} = \pm 0,95 \text{ сП}$.

В относительной форме она будет составлять $\delta_{\eta} = \pm 0,45 \%$.

2. Анализ погрешности измерения вязкости смолы вискозиметром ВЗ-4

Определим значения погрешности измерения динамической вязкости с использованием вискозиметра ВЗ-4, по методике ГОСТ 8420 [95]. В этом случае также многократно (5 наблюдений) измерялось время истечения раствора смолы t , среднее значение которого $\bar{t} = 41 \text{ с}$. Среднее квадратическое отклонение $S_t = 0,22 \text{ с}$. Доверительный интервал случайной составляющей погрешности измерения времени истечения смолы с вероятностью 0,95 будет равен $\varepsilon_t = \pm t_p S_t / \sqrt{n} = \pm 2,776 \cdot 0,22 / 2,24 = \pm 0,27 \text{ с}$.

Условная (кинематическая) вязкость ν определяется по графику приложения 2 в ГОСТ 8420, приведенному на рис. 2.2. Цена деления на графике (масштаб) при диаметре сопла 4 мм и $t = 40 \text{ с}$ соответствует:

по оси ординат (времени истечения) 1 мм – 2,5 с;

по оси абсцисс (вязкости) 1 мм – 10 мм²/с.

Следовательно, доверительный интервал случайной составляющей погрешности измерения времени истечения смолы при $\varepsilon_t = 0,27 \text{ с}$ на графике будет составлять 0,108 мм, что соответствует условной вязкости $\nu = 1,08 \text{ мм}^2/\text{с}$ или динамической вязкости $\eta = 1,306 \text{ сП}$.

Расстояния на графике рис. 2.2 измеряются линейкой с ценой деления 1 мм и предельной погрешностью измерения 0,5 мм. Кривая зависимости времени истечения от вязкости при диаметре сопла 4 мм проходит ориентировочно под углом 45 °, поэтому погрешность измерения 0,5 мм по оси ординат приводит к погрешности 0,5 мм по оси абсцисс. Кроме того, измерение линейкой по оси абсцисс также дает погрешность 0,5 мм. Следовательно, измерение линейкой на графике при диаметре сопла 4 мм и времени истечения 40,99 с вызывает неисключенную систематическую составляющую погрешности измерения 1 мм, что соответствует кинематической вязкости $\theta_v = 10 \text{ мм}^2/\text{с}$ или динамической вязкости $\theta_\eta = 12,094 \text{ сП}$.

Результаты определения погрешностей измерения приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Результаты анализа погрешностей измерения вязкости смолы

| Вискозиметр | Погрешности, сП | | | Относительная, δ |
|-------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| | систематич., θ_η | случайная, ε_τ | полная, Δ_η | |
| ВПЖ-2 | 0,54 | 0,91 | 0,95 | 0,45 % |
| ВЗ-4 | 12,09 | 1,31 | 12,09 | 5,7 % |

Соотношение $\theta_\eta / s_{\bar{\eta}} = 124,3$. Следовательно, случайной составляющей можно пренебречь и погрешностью результата измерения являются границы неисключенной систематической составляющей погрешности измерения $\Delta_\eta = \pm 12,094 \text{ сП}$. В относительной форме $\delta_\eta = \pm 5,69 \%$ [109].

2.2.3 Исследование влияния на вязкость смолы температуры ее нагрева и времени хранения

Для обеспечения заданных требований к эксплуатационным свойствам изделий проведен анализ изменений характеристик смолы СФЖ-3031 от состава, температурных режимов, времени хранения, что позволит установить их оптимальные значения.

Исследован переход резольной смолы с течением времени при «старении» к стадии резитол. Для ускоренного моделирования данного процесса осуществлялось нагревание раствора смолы от 20°C до 100°C.

Базовые величины характеристик образца:

Значение динамической вязкость раствора смолы $\eta = 243,7 \text{ сП}$ (при 20 °С);

Значение плотность смолы $\rho^{20} = 1,22 \text{ г/см}^3$.

Осуществлялось постепенное нагревание пробы смолы массой 100 г. термометром лабораторным (пределами измерения 0...350 °С, погрешность ± 1 °С). Спустя 8 мин. от начала эксперимента при 70 °С был отмечен характерный звук «потрескивания» раствора смолы. Происходило испарение содержащейся воды, без кипения смолы. При достижении 90°C было отмечено появление характерных маленьких пузырьков. При температуре в 100 °С эксперимент завершился.

Полученные величины характеристик раствора смолы для различных значений температуры указаны в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Значения кинематической и динамической вязкости смолы СФЖ-3031 от температуры

| № измерения | Температура, °С. | Время истечения смолы, с | Кинематическая вязкость, сСт | Динамическая вязкость, сП |
|-------------|------------------|--------------------------|------------------------------|---------------------------|
| 1 | 20 | 49,8 | 200 | 243,7 |
| 2 | 35 | 41,4 | 170 | 207,1 |
| 3 | 40 | 29 | 130 | 158,4 |
| 4 | 45 | 22,3 | 85 | 103,6 |
| 5 | 55 | 19,5 | 70 | 85,3 |
| 6. | 65 | 16,4 | 43 | 52,4 |
| 7. | 80 | 15,5 | 33 | 40,2 |
| 8. | 100 | 14,7 | 27 | 32,9 |

Зависимости влияния нагревания смолы и времени истечения в вискозиметре, приведены на графиках рисунков 2.3 и 2.4.

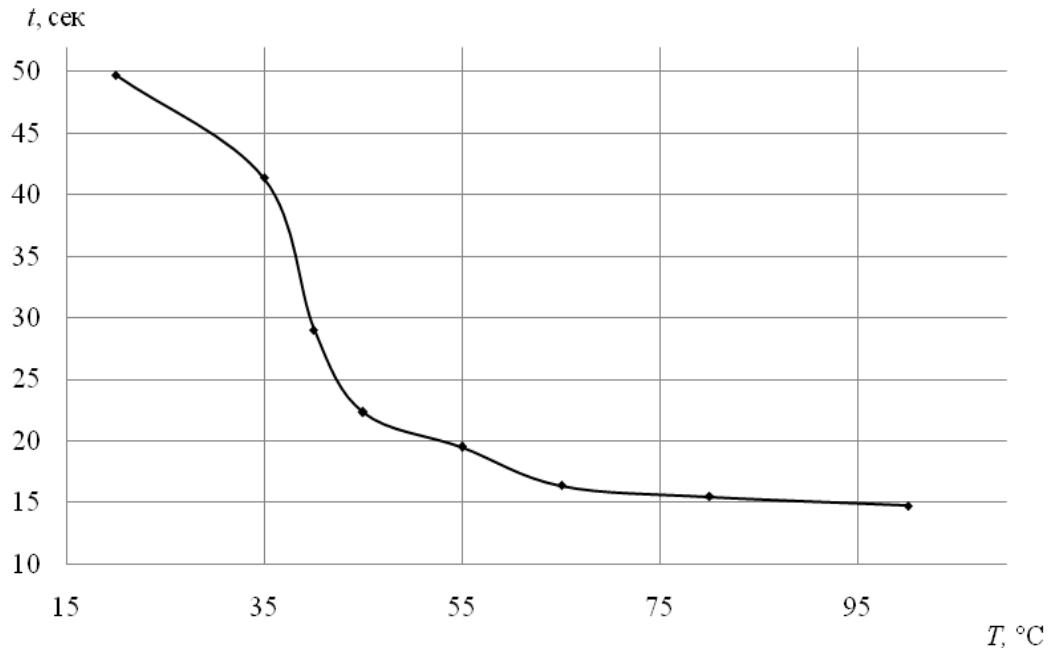


Рис. 2.3 Влияние температуры нагрева смолы на время истечения в вискозиметре ν , сСт, η , сП

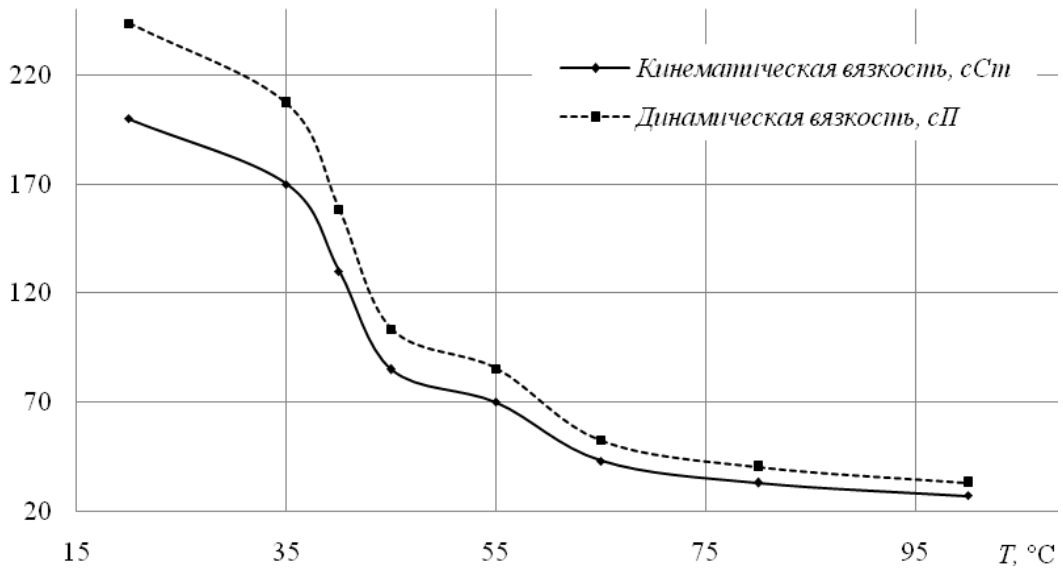


Рис. 2.4 Зависимость значений вязкости от температуры

Аппроксимация данных, полученных экспериментально для величины динамической вязкости во взаимосвязи от температуры:

$$\eta = 23723,3 \cdot T^{-1,42} \quad (2.9)$$

Кривые теоретических и экспериментальных значений показаны на рисунке 2.5, они демонстрируют хорошую сходимость.

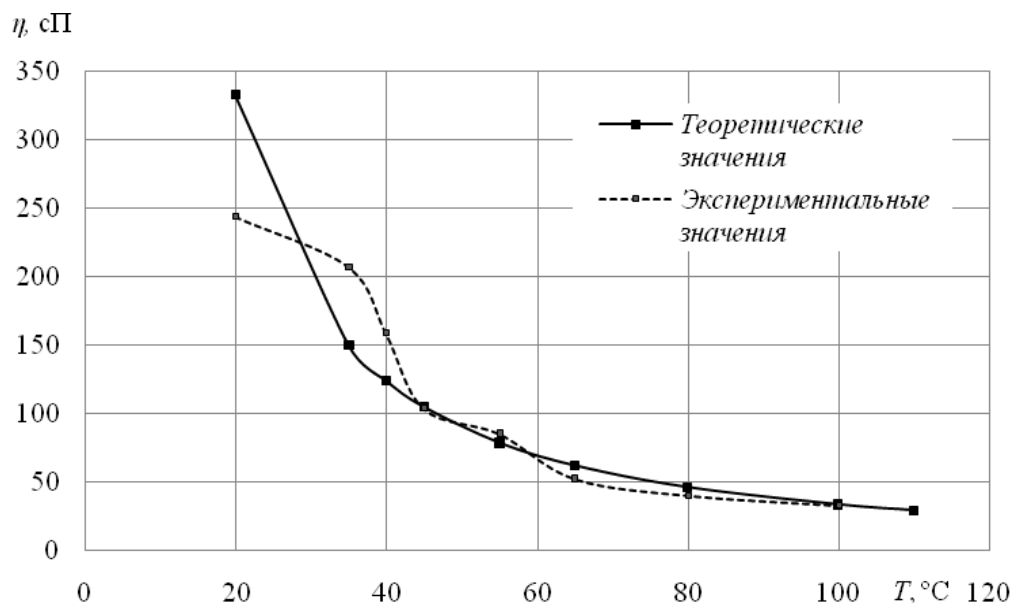


Рис. 2.5 Кривые теоретических и экспериментальных значений динамической вязкости от влияния нагревания

Нагревание до температуры в 65 °С существенно уменьшает вязкость смолы, однако дальнейший нагрев оказывает незначительное влияние. В ходе нагрева смолы до 75-80 °С идет испарение имеющейся воды в растворе смолы и отмечен постепенный её переход к состоянию резитол. При охлаждении пробы от 100 °С до нормальной температуры, наблюдалось возрастание вязкости раствора смолы по близкой зависимости, но с учетом уменьшения содержания влаги.

Проанализирована динамика состояний исследуемой пробы смолы СФЖ-3031, определены значения динамической вязкости и плотности раствора смолы после охлаждения до 20 °С и через неделю, при хранения данной пробы в нормальных условиях. Рассчитанные значения (с применением методики ГОСТ 20907-75) указаны в таблице 2.4.

Таблица 2.4

**Динамика состояний исследуемой пробы смолы СФЖ-3031.
Значения динамической вязкости и плотность раствора смолы**

| Состояния исследуемой пробы смолы | Значение динамической вязкость η , сП | Плотность раствора смолы ρ^{20} , г/см ³ |
|--|--|--|
| Резол (стадия А) | 236,5 | 1,22 |
| Резитол (стадия В) | 524,7 | 1,24 |
| Переходное к стадии С Резит (через 7 дней) | 2320,3 | 1,26 |

Динамика изменение массы образца после охлаждения до 20 °С:

Начальная масса образца раствора смолы $m_1 = 100$ г,

Масса образца раствора смолы после нагревания $m_2 = 98,05$ г.

Следовательно, масса растворенной воды в образце: $m_v = m_1 - m_2 = 1,95$ г, или 1,95% от первоначальной массы образца раствора смолы.

Анализ вязкости от влияния времени хранения раствора смолы СФЖ-3031

В ходе эксперимента анализировались 2 партии смолы СФЖ-3031, полученными от одного поставщика. Величины вязкости и плотности раствора смолы для первой партии контролировались в ходе 4 недель, первая проба второй партии – в течение 6 недель. Раствор смолы СФЖ-3031 в обеих партиях хранились при нормальных условиях. Вторая проба из партии 2 с времени поступления от поставщика в течении двух недель хранилась при более низкой температуре (от 0 до +5 °С), после этого осуществлялся анализ её характеристик (с учетом дальнейшего хранения при нормальных условиях). Третья проба из партии 2 в течении четырех недель хранилась при данной более низкой температуре (от 0 до +5 °С), с последующим определением характеристик и хранении образца раствора смолы в нормальных условиях.

Измерения вязкости образцов раствора смолы для анализа динамики от времени хранения проведены по методике ГОСТ 20907-75 (вискозиметра ВПЖ-2), результаты указаны в таблице 2.5.

Таблица 2.5

**Динамика изменения вязкости образцов раствора смолы СФЖ-3031
в зависимости от времени ее хранения**

| Период времени | 1 неделя | | 2 недели | | 3 недели | | 4 недели | | 5 недель | | 6 недель | |
|----------------------|-------------|---------------------------------|-------------|---------------------------------|-------------|---------------------------------|-------------|---------------------------------|-------------|---------------------------------|-------------|---------------------------------|
| | η , сП | ρ^{20} , г/см ³ | η , сП | ρ^{20} , г/см ³ | η , сП | ρ^{20} , г/см ³ | η , сП | ρ^{20} , г/см ³ | η , сП | ρ^{20} , г/см ³ | η , сП | ρ^{20} , г/см ³ |
| Партия 1 | 170,6 | 1,206 | 213,0 | 1,208 | 214,6 | 1,209 | 227,0 | 1,222 | - | - | - | - |
| Партия 2 (1 образец) | 213,0 | 1,209 | 214,0 | 1,210 | 226,1 | 1,218 | 327,0 | 1,224 | 347,3 | 1,228 | 377,6 | 1,231 |
| Партия 2 (2 образец) | - | - | - | - | 216,5 | 1,214 | 236,5 | 1,218 | 287,4 | 1,220 | 338,8 | 1,227 |
| Партия 2 (3 образец) | - | - | - | - | - | - | - | - | 223,8 | 1,216 | 261,6 | 1,219 |

С течением времени (за месяц) динамическая вязкость раствора смолы η партии 1 изменилась с 170,6 до 227,0 *сП*, или на 33%, при этом не достигнув наименьшего допустимого значения по ГОСТ 20907-75. Плотность смолы ρ^{20} за этот же период возросла на 1,32%, достигнув наибольшего допустимого значения.

При хранении второй партии смолы (проба 1) при нормальных условиях динамическая вязкость η за время гарантийного срока (6 недель) изменилась от 213 до 377,6 *сП* (на 77,3 %), стало больше наибольшего значения по ГОСТ 20907-75 через 5 недель. Значение плотности смолы ρ^{20} увеличилось на 1,8 %, превысив через 4 недели наибольшее допустимое значение.

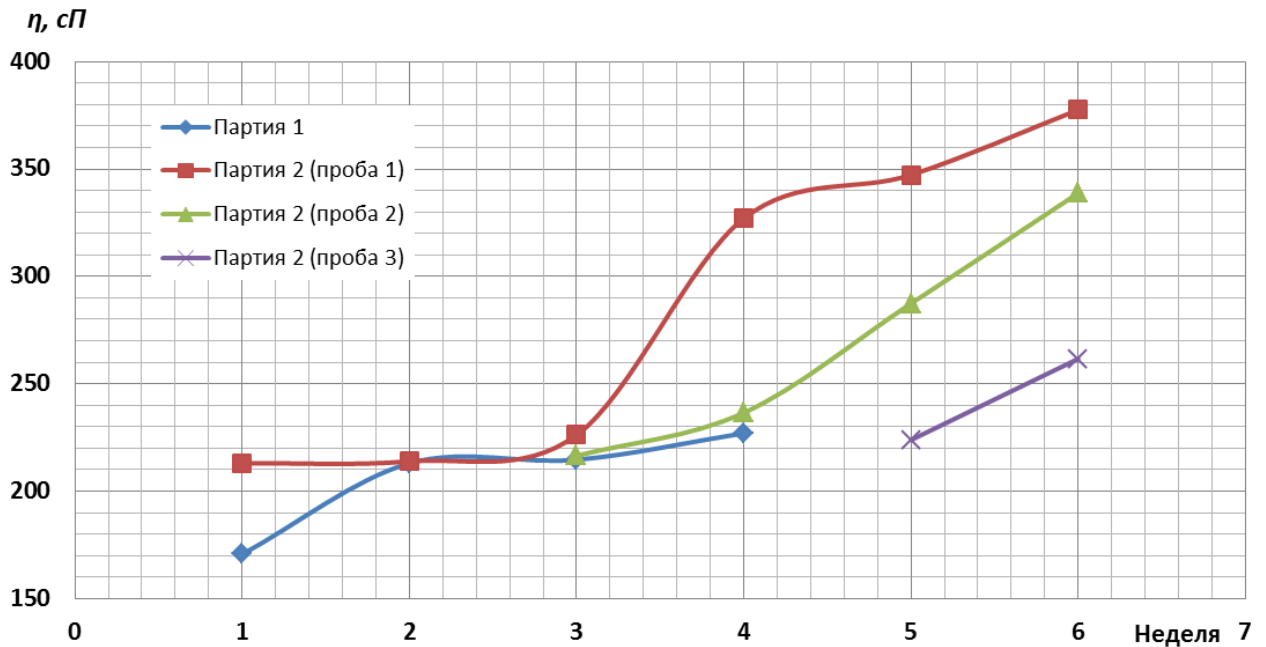


Рис. 2.6 Динамика вязкости образцов раствора смолы СФЖ-3031 от времени ее хранения

Хранившийся в течение 5 недель при более низкой температуре третий образец раствора смолы партии 2, имел величину вязкости в пределах допустимого значения, как и величина плотности.

2.2.4 Определение гранулометрического состава исходного материала

Гранулометрический анализ – метод определения содержания частиц различного размера (размерных фракций) в порошке. Выраженный в виде таблиц, либо графически в виде кривой зернистости.

Гранулометрический состав порошка определяют ситовым, микроскопическим, седиментационным, кондуктометрическим и другими методами анализа.

Анализ проводят по ГОСТ 23402—78 для определения размеров частиц от 1 до 100 мкм при их сферической или полиэдрической форме.

Увеличение микроскопа подбирают в зависимости от размеров контролируемых частиц. Измерение частиц проводят в поле зрения, ограниченном прямоугольником или кругом с нанесенным диаметром; в нем должно находиться <150 частиц, при этом расстояние между ними должно быть не меньше размера большей из соседствующих между собой частиц.

Исследование гранулометрического состава каолина проводилось на инструментальном микроскопе БМИ-1Ц с насадкой осветителя для работы в отраженном свете. Цена деления прибора 0,001 мм и предельная погрешность измерения 0,004 мм.

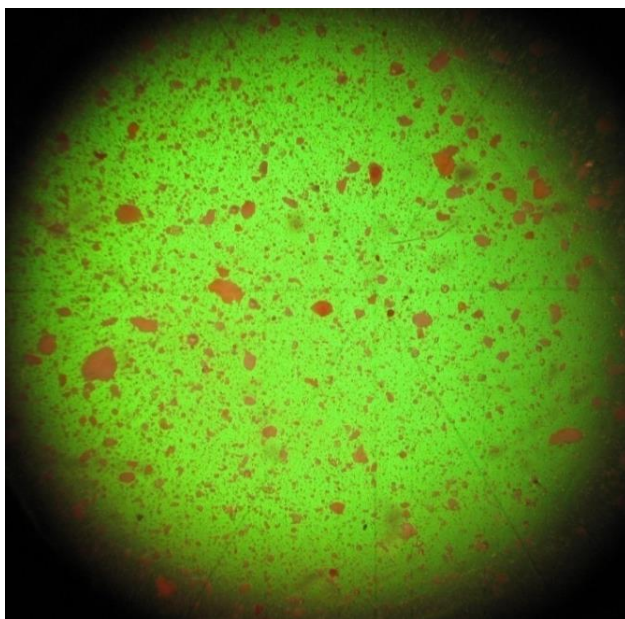


Рис.2.7. Исследование гранулометрического состава каолина

Количество опытных выборок -5.

Измерено по 100 частиц в вертикальном и горизонтальном направлениях на инструментальном микроскопе БМИ-1Ц.

Полученные значения и их основные характеристики приведены в таблице (Приложение А). В нижней части таблицы 1 (Приложение А) приведены основные характеристики выборок:

- 1) среднее арифметическое значение (\bar{x});
- 2) среднее квадратическое отклонение (S_x);
- 3) максимальное значение для данной выборки (x_{\max});
- 4) минимальное значение для данной выборки (x_{\min}).

Для всей выборки (500 значений) получена гистограмма (рис. 2.8), характеризующая близость распределения к нормальному.

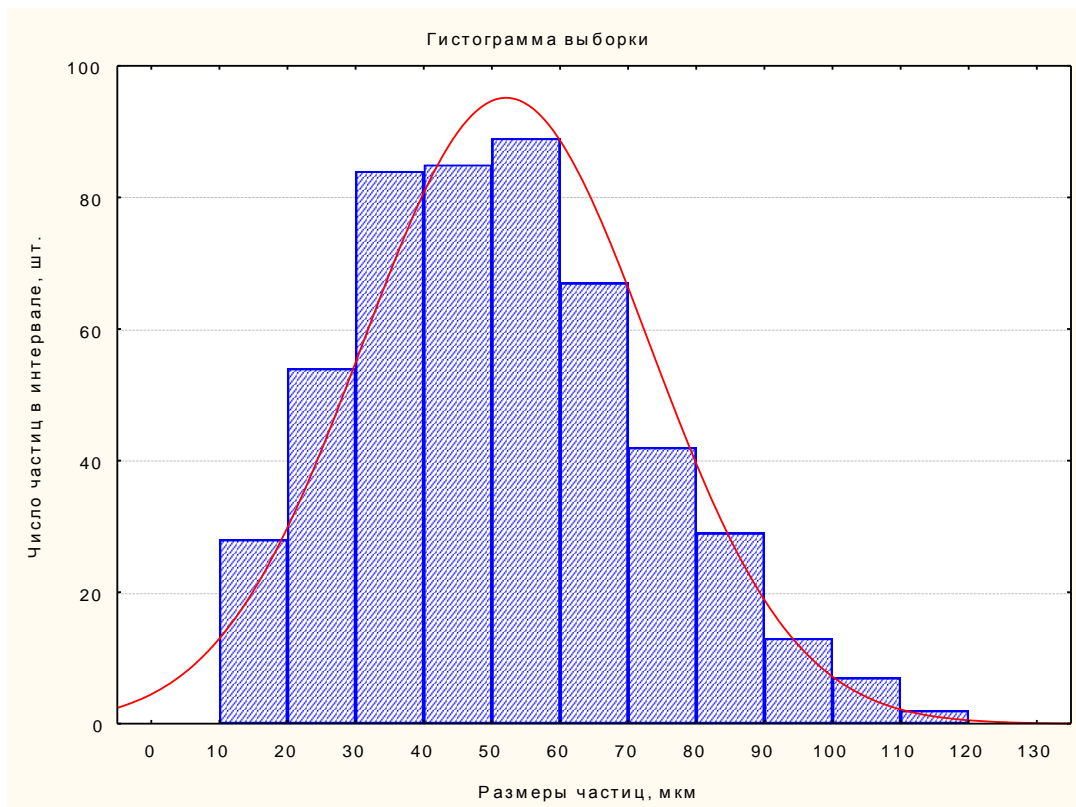


Рис. 2.8. Гистограмма выборки частиц каолина

По форме кривой распределения выборки видно, что распределение размеров генеральной совокупности соответствует нормальному закону.

Таким образом, размеры совокупности частиц, используемых для получения порошка нового материала, изменяются в пределах от 12 до 112 мкм. Среднее значение размеров частиц $\bar{x} = 51,8$ мкм, среднее квадратическое отклонение размеров $S_x = 20,6$ мкм.

2.3 Технология и оборудование для производства деталей из полимерного композиционного материала

Для разрабатываемого композиционного материала проанализирован технологический процесс получения заготовок [6, 7, 9].

На рис.2.9. представлен технологический процесс получения изделий из разработанного композиционного материала.

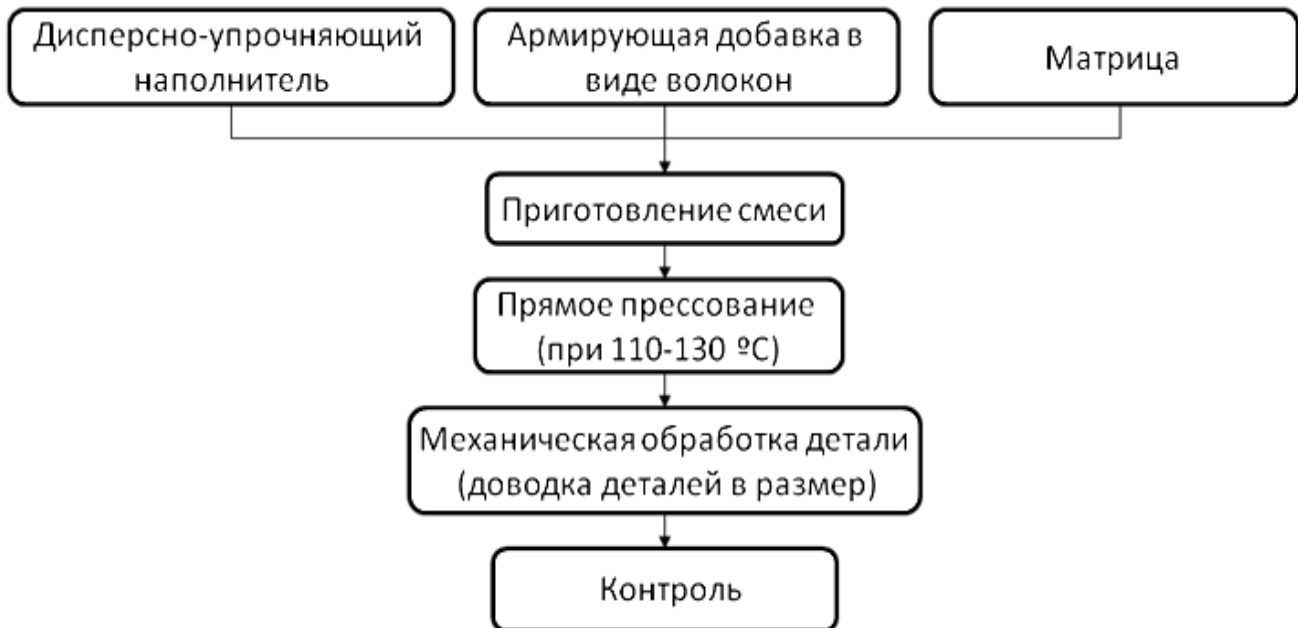


Рис.2.9. Технологический процесс получения композиционного материала

Применяется метод прямого прессования. Берутся компоненты: дисперсно-упрочняющий наполнитель, армирующая добавка в виде волокон и матрица (связующее).

Затем происходит смешивание компонентов, образуется вязкая пластилинообразная масса, которую подсушивают для получения гранул для дальнейшего прессования.

Далее применяют прессование при температуре 110 – 130 °С. При этом происходит полимеризация связующего.

Следующим этапом является механическая обработка. После получения изделий проводится контроль твердости и линейных размеров.

На твердость изделия влияют время и способ перемешивания порошковой смеси. От времени перемешивания зависит производительность всего процесса изготовления. При недостаточном перемешивании смеси возможно наличие на поверхности гетерогенных включений (волокна асбеста), которые могут быть источниками напряжений и приводить к разрушению изделия.

Применяемое оборудование:

Подготовка исходных материалов:

Оборудование: Печь СНОЛ-900.

Исходные материалы:

- хризотил коротковолокнистый ТУ 5721-014-00281476-2007 Марка 7R;
- хризотил наполнитель ТУ 21-22-23-86 Марка АН-К6
- асбест хризотилковый ГОСТ 12871-93 Марка А-6-30.

Навеска компонентов

Оборудование: Весы электронные MW – II.

Смешивание компонентов

Оборудование: Промышленный миксер BOSCH 350 W

Продолжительность смешивания – 10-15 минут.

Экструдирование смеси

Оборудование: Экструдер шнекового типа.

Однородность смеси (не допускается видимых комков наполнителя) – оценивается визуально.

Просушивание смеси

Оборудование: Сушильный шкаф СНОЛ – 3,5.

При необходимости, частицы измельчаются.

Прессование

Технологические режимы:

- время прессования формуемого изделия – 6 мин.
- усилие прессования 150 атм.
- температура прессования – 110 – 130°C.

пресс: СГУ – 100;
оснастка: Пресс форма НЦВР294251044;
шкаф управления с прибором;
часы электронные настольные.

Контроль:

Масса полученных заготовок – весы электронные MW – II.

Линейные размеры: средство измерений - штангенциркуль электронный MATRIX, диапазон измерения 0-150 мм; дискретность 0,01 мм; погрешность $\pm 0,02$ мм.

Экспериментальное исследование влияния способа и времени перемешивания.

Для экспериментального установления влияния времени перемешивания смеси с использованием вертикального атритора на твердость были выполнены 3 экспериментальные партии деталей с временем перемешивания 60, 90 и 120 минут.

Данная разновидность атриторного устройства имеет неподвижную емкость, внутри которой вращается вертикальная лопастная мешалка. Гребки, наклонно укрепленные на лопастях мешалки, обеспечивают циркуляцию размольных тел и истирание измельчаемого материала. Вращение мешалки способствует перемещению в объеме атритора относительно небольшого количества размольных тел, а движение остальных происходит путем эстафетной передачи импульса от одного единичного размольного тела к другому.

Средние значения твердости по результатам измерений в зависимости от времени смешивания приведены в табл.2.6.

Наименьший временной интервал перемешивания не обеспечивает заданного минимального значения твердости, т.е. меньше НВ 28. При перемешивании в течение 90 минут среднее значение твердости обеспечивается, но были некоторые значения меньше НВ 28. И только время перемешивания 120 минут обеспечивает значения НВ всегда больше 28 единиц.

Значения твердости в зависимости от времени перемешивания

| | | | |
|------------------|---------|---------|----------|
| Время смешивания | 60 мин. | 90 мин. | 120 мин. |
| Значение HB | 27,40 | 28,67 | 31,84 |

Но в этом случае существенно увеличивается длительность процесса и затраты на изготовление. В ходе анализа технических возможностей производства для смешивания компонентов смеси был применен атриторный аппарат по принципу современного миксера с двумя вращательными движениями, одно относительно общей оси, второе – каждой лопастью относительно своей оси. В результате получена опытная партия из 12 деталей, после перемешивания – 60 минут. Статистические характеристики после обработки результатов измерений твердости этой партии приведены в табл.2.7, где обозначены:

\overline{HB} - среднее значение; S_{HB} - среднее квадратическое отклонение;

HB_{\max} - максимальное значение; HB_{\min} - минимальное значение.

Таблица 2.7

Статистические характеристики твердости

| | | | | |
|----------|-----------------|----------|-------------|-------------|
| Параметр | \overline{HB} | S_{HB} | HB_{\max} | HB_{\min} |
| Значения | 38,83 | 2,85 | 42,42 | 33,59 |

Проверка выборки по v – критерию показала, что грубых погрешностей в результатах измерений нет, поскольку расчетные значения не превысили допустимого значения $v_{\text{доп}}$ (при вероятности $P = 0,99$ $v_{\text{доп}} = 2,66$).

Таким образом, доверительный интервал для истинного значения твердости HB с доверительной вероятностью 0,99 будет находиться в пределах:

$$36,27 \leq HB \leq 41,38; P = 0,99.$$

Таким образом, применение атриторного устройства миксерного типа с двумя вращательными движениями при минимальном времени перемешивания 60 минут обеспечивает получение высокого уровня значений твердости изделий и сокращение времени процесса. С другой стороны, рассеяние значений твердости в одной партии существенно. И при ограничении верхнего предельного значения

твердости необходимо предусмотреть мероприятия по улучшению стабильности процесса с целью уменьшения рассеивания значений $HB (s_{HB})$ и не только в одной партии.

Перемешивание влияет не только на твердость, но и на однородность поверхности, то есть на наличие инородных включений. Эти включения являются концентраторами дополнительного напряжения, что может в дальнейшем привести к разрушению изделия. При более качественном перемешивании размеры гетерогенных включений меньше и поверхность более однородна (одни и те же включения могут быть разных размеров в зависимости от качества перемешивания и других факторов).

2.4 Методы и средства измерений эксплуатационных параметров

Исследования свойств армированного композиционного материала на основе реактопластов проводилось на образцах в виде параллелепипеда с предельными размерами $10 \times 11 \times 55$ мм. В качестве армирующего наполнителя использовался хризотил (марки АН-К6, 7R и А-6-30), в качестве матрицы принята термореактивная смола СФЖ-3031), процентное соотношение компонентов по п.2.2 (смеси 1-3).

Для испытаний были отобраны 3 образца из каждой партии. Выборка осуществлялась из начала, середины и конца партии. Все поверхности образцов были плоскими, взаимно перпендикулярными и параллельными. Царапины, вмятины, раковины и заусенцы на поверхности и краях образцов не допускались.

Линейные размеры изделия измеряются штангенциркулем электронным MATRIX: диапазон измерения 0-150 мм; дискретность 0,01 мм; погрешность $\pm 0,03$ мм.

Масса полученных заготовок контролировалась на оборудовании – весы электронные MW – II с погрешностью $\Delta_m = 0,05$ г.

В ходе анализа основных физико-механических свойств были исследованы параметры:

2.4.1 Определение линейной усадки

Усадка характеризует изменение размеров при формовании изделия и термообработке, зависит от способа формования изделия и вида реакции сшивания (полимеризации или поликонденсации). Чем больше время выдержки в процессе усадки, тем полнее протекает химическая реакция и меньше усадка изделия после извлечения из формы. При дальнейшей выдержке в течение некоторого времени усадка остается постоянной.

При увеличении температуры усадка увеличивается прямо пропорционально. После обработки усадка также зависит от влажности прессматериала и времени предварительного нагрева (увеличение влажности увеличивает усадку, увеличение времени предварительного нагрева – уменьшает). Оптимальное содержание влаги у реактопластов 2,5 - 3,5%. Наблюдается анизотропия усадки армированных реактопластов (в различных направлениях по отношению к направлению течения различна). Усадка пластиков рассчитывается по формуле

$$U = (L_{\phi} - L_{и}) / L_{\phi} * 100, \% \quad (2.10)$$

где U - усадка после формования и охлаждения;

L_{ϕ} и $L_{и}$ - размеры формы и изделия после охлаждения (измерялись микрометром гладким... с пределом допускаемой погрешности измерения 0,004 мм).

Были проанализированы величины линейной и объемной усадок для указанных смесей по табл.2.8. Минимальные значения усадки составила для смесей с волокнистым наполнителем А-6-30. Величина значений усадки сторон образцов представлены в табл.2.9.

Таблица 2.8.

Линейная усадка сторон образцов

| Материал | Номер смеси | Среднее значение усадки, % | | |
|---|-------------|----------------------------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| хризотил наполнитель Марка АН-К6 | 1 | 0,488 | 0,537 | 0,227 |
| | 2 | 0,269 | 0,279 | 0,145 |
| | 3 | 0,221 | 0,275 | 0,172 |
| хризотил коротковолокнистый Марка 7R | 1 | 1,101 | 1,197 | 0,351 |
| | 2 | 0,195 | 0,259 | 0,102 |
| | 3 | 0,731 | 0,663 | 0,368 |
| асбест хризотилковый | 1 | 0,145 | 0,192 | 0,117 |

| | | | | |
|--------------|---|-------|-------|-------|
| Марка А-6-30 | 2 | 0,245 | 0,325 | 0,102 |
| | 3 | 0,161 | 0,232 | 0,070 |

Таблица 2.9

Величина значений линейной усадки сторон деталей

| Марка волокнистого наполнителя | Номер смеси | Линейная усадка ср. знач., % | | |
|--------------------------------|-------------|------------------------------|--------------|--------------|
| | | <i>a</i> , % | <i>b</i> , % | <i>c</i> , % |
| А-6-30 | 1 | 0,145 | 0,192 | 0,117 |
| | 2 | 0,245 | 0,325 | 0,102 |
| | 3 | 0,161 | 0,232 | 0,070 |

Линейная усадка образцов составила от 0,102% до 1,101% в зависимости от применяемой марки волокнистого наполнителя.

2.4.2 Определение ударной вязкости

Ударная вязкость материала – это способность материала поглощать механическую энергию в процессе деформации и разрушения под воздействием ударной нагрузки. Для испытания применяют маятниковые копры по ГОСТ 10708-82, которые обеспечивают измерение энергии удара на разрушение образца.

Суть метода: контролируемый образец, опирающийся концами на опоры, изгибается при одном ударе маятника с номинальной постоянной скоростью по линии удара, проходящей посередине между опорами.

Ударную вязкость образцов без надрезов (a_n) в кДж/м² (кгс·см/см²) рассчитывают:

$$a_n = \frac{A_n}{b \cdot s} \cdot 10^3, \text{ кДж/м}^2 \quad (2.11)$$

где A_n - энергия удара, затраченная на разрушение образца без надреза, Дж (кгс·см);

b - ширина образца, мм (см);

s - толщина образца, мм (см).

Полученные значения ударной вязкости материала приведены в таблице 2.10.

Значения ударной вязкости

| Материал | Номер смеси | Ударная вязкость, кДж/м ² | | |
|---|-------------|--------------------------------------|----------|----------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| хризотил наполнитель Марка АН-К6 | 1 | 1982,868 | 1875,025 | 1275,230 |
| | 2 | 1748,428 | 1745,079 | 2421,401 |
| | 3 | 1821,216 | 1340,590 | 1542,227 |
| хризотил коротковолокни- стый Марка 7R | 1 | 2013,060 | 2011,020 | 2501,819 |
| | 2 | 2600,843 | 2503,269 | 2303,008 |
| | 3 | 1996,652 | 1804,128 | 2505,733 |
| асбест хризотилковый Марка А-6-30 | 1 | 2544,726 | 2547,401 | 2449,424 |
| | 2 | 2331,238 | 2423,721 | 2615,113 |
| | 3 | 3175,573 | 2476,071 | 2977,100 |

Получены значения ударной вязкости от 1275,230 до 3175,573 кДж/м² в зависимости от применяемой марки волокнистого наполнителя.

2.4.3 Испытание на растяжение образцов

По ГОСТ 11262-80 Пластмассы. Метод испытания на растяжение, испытание осуществляется на машине, обеспечивающей при растяжении образца измерение нагрузки с погрешностью не более 1% от измеряемой величины и постоянную скорость раздвижения зажимов.

Прибор для измерения ширины и толщины образцов должен обеспечивать измерение с погрешностью не более 0,01 мм. При измерении толщины образцов прибор должен оказывать давление на образец до 0,03 МПа (0,3 кгс/см²).

Значения прочности (σ) при испытании на растяжение в МПа (Н/мм²) вычисляются по формулам:

Прочность при разрыве (σ_{pp})

$$\sigma_{pp} = \frac{F_{pp}}{A_0}, \text{ Н/мм}^2 \quad (2.12)$$

где F_{pp} - нагрузка, при которой образец разрушился, Н;

A_0 - начальное поперечное сечение образца, мм².

Результатом испытаний является среднее арифметическое (с учетом до третьей значащей цифры).

Удлинение (ε) в % рассчитывается по формуле:

Относительное удлинение при разрыве (ε_{pp})

$$\varepsilon_{pp} = \frac{\Delta l_{op}}{l_0} \cdot 100, \% \quad (2.13)$$

где Δl_{op} – величина изменения расчетной длины образца в момент разрыва, мм;

l_0 – значение начальной расчетной длины образца, мм.

Результатом испытания является среднее арифметическое значение, с округлением до двух значащих цифр.

Значения прочности и относительное удлинение образцов при разрыве приведены в таблице 2.11.

Таблица 2.11

Значения прочности и относительного удлинения при разрыве

| Материал | Номер смеси | Прочность при разрыве, Н/мм ² | | | Относительное удлинение при разрыве, % | | |
|--------------------------------------|-------------|--|------|------|--|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| хризотил наполнитель Марка АН-К6 | 1 | 14,5 | 15,2 | 14,8 | 4,61 | 2,58 | 3,61 |
| | 2 | 15,3 | 15,2 | 15,1 | 5,16 | 3,11 | 4,13 |
| | 3 | 8,5 | 8,8 | 8,6 | 1,35 | 0,95 | 1,15 |
| хризотил коротковолокнистый Марка 7R | 1 | 24,4 | 21,4 | 22,8 | 6,23 | 5,15 | 5,67 |
| | 2 | 19,7 | 23,2 | 23,2 | 4,06 | 8,40 | 6,24 |
| | 3 | 19,9 | 18,6 | 19,2 | 3,39 | 3,12 | 3,26 |
| асбест хризотилковый Марка А-6-30 | 1 | 21,7 | 23,3 | 22,4 | 6,76 | 6,63 | 6,70 |
| | 2 | | | | | | |
| | 3 | 28,6 | 27,2 | 28,0 | 7,30 | 7,43 | 7,38 |

Прочность при разрыве: от 8,6 до 28,6 Н/мм²

Относительное удлинение при разрыве, от 0,95 до 8.40 %

2.4.4 Испытание образцов на изгиб

По ГОСТ 4648-71 ГОСТ 4648-71 Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб, осуществляется на испытательной машине по схеме рис. 2.10, которая обеспечивает равномерную скорость v относительного движения нагружающего наконечника и опор и позволяет осуществлять измерение нагрузки с величиной

погрешности $\pm 1\%$, а прогиба - с погрешностью $\pm 2\%$ [72]. Расстояние между опорами должно быть регулируемым.

На испытательной машине должно быть размещено устройство с нагружающим наконечником и опорами. Сближение их должно осуществляться с постоянной скоростью и с учетом допусков.

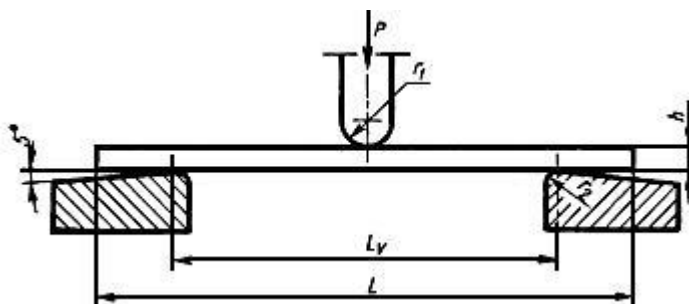


Рис. 2.10 Схема испытания образца на изгиб

Используемое оборудование имеет свидетельство о поверке.

Изгибающее напряжение ($\sigma_{изг}$) в МПа при нагрузке вычисляют по формуле [72]:

$$\sigma_{изг} = \frac{M}{W}, \text{ МПа} \quad (2.14)$$

где M - изгибающий момент, Н*мм;

W - момент сопротивления сечения образца мм³.

Изгибающий момент (M) в Н*мм определяют по формуле:

$$M = \frac{P \cdot L_v}{4}, \text{ Н*мм} \quad (2.15)$$

где P – нагрузка (Н),

L_v - расстояние между опорами, мм.

Момент сопротивления сечения образца (W) в мм³ вычисляют по формуле:

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6}, \text{ мм}^3 \quad (2.16)$$

где b - ширина образца, мм;

h - толщина образца, мм.

$$\sigma_{изг} = \frac{3 \cdot 9.8 P \cdot L_v}{2 b h^2}, \text{ МПа} \quad (2.17)$$

Значения изгибающих напряжений в зависимости от марки и процентного содержания наполнителя приведены в таблице 2.12.

Таблица 2.12

Значения изгибающих напряжений

| Материал | Номер смеси | Изгибающее напряжение ($\sigma_{изг}$) в МПа | | |
|---|-------------|--|--------|---------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| хризотил наполнитель Марка АН-К6 | 1 | 44,342 | 39,566 | 36,889 |
| | 2 | 47,526 | 38,983 | 54,840 |
| | 3 | 21,801 | 24,385 | 21,336 |
| хризотил коротковолокнистый Марка 7R | 1 | 62,974 | 44,975 | 59,455 |
| | 2 | 51,417 | 61,928 | 55,590 |
| | 3 | 58,007 | 53,556 | 51,936 |
| асбест хризотилковый Марка А-6-30 | 1 | 57,295 | 47,466 | 52,740 |
| | 2 | 61,435 | 59,195 | 59,200 |
| | 3 | 63,058 | 61,191 | >65,847 |

Изгибающее напряжение $\sigma_{изг}$ составило от 21,385 до 65,847 Мпа.

Суммарно результаты механических испытаний полученного композиционного материала представлены в табл. 2.13.

В таблице приведены результаты испытаний с наилучшими значениями по исследуемым характеристикам для трех видов смесей с марками хризотилового наполнителя АН-К6, 7R и А-6-30.

Таблица 2.13

Результаты механических испытаний композиционного материала

| Армирующий наполнитель (марка) | Разработанный КМ с АН-К6 | Разработанный КМ с 7R | Разработанный КМ с А-6-30 |
|--|--------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Ударная вязкость, кДж/м ² | 1971,6 (смесь 2) | 2469 (смесь 2) | 2876,2 (смесь 3) |
| Изгибающее напряжение, МПа | 47,1 (смесь 2) | 56,3 (смесь 2) | 63,4 (смесь 3) |
| Прочность при разрыве, Н/мм ² | 15,2 (смесь 2) | 22,9 (смесь 1) | 27,9 (смесь 3) |
| Относительное удлинение при разрыве, % | 4,1 (смесь 2) | 6,2 (смесь 2) | 7,4 (смесь 3) |
| Твердость, НВ, Н/мм ² | 25 (смесь 3) | 35 (смесь 1 и 2) | 32 (смесь 1) |

Для анализа полученных характеристик разработанного полимерного композиционного материала исследованы характеристики аналогов [14, 23, 130, 131] -

сверхмолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), полиэтилен низкого давления (ПЭНД) (ГОСТ 16338-85 Полиэтилен низкого давления. Технические условия [129]). Эти материалы являются термопластами и при нагреве переходят в вязкотекучее состояние, поэтому их применение в условиях повышенных температур затруднительно.

Композиции на основе фторопласта-4 (Ф-4) можно применять в качестве материала подшипников, колец, прокладок, деталей, клапанов и других изделий в тех отраслях промышленности, где требуется теплостойкость и химическая стойкость.

Капролон (полиамид 6 блочный, ПА6) – конструкционный полимер с антифрикционными свойствами. Представляет собой продукт активированной анионной полимеризации капролактама, проводимой непосредственно в форме [14, 23].

ПА 6–МГ (модифицированный графитом), характеризуется повышенными антифрикционными и антистатическими свойствами и применяется для изготовления деталей, используемых в нефте-, газо-, горнодобывающих и других отраслях промышленности.

ПА 6–МДМ (модифицированный дисульфидом молибдена) характеризуется повышенными антифрикционными и диэлектрическими свойствами и применяется для изготовления деталей, используемых в нефтехимическом комплексе, сталелитейной, упаковочной, горнодобывающей и прочих отраслях промышленности. Свойства: высокопрочный и эластичный материал, обрабатывается всеми основными видами механической обработки (точением, шлифованием, фрезерованием, сверлением, резанием, строганием) на металлорежущем оборудовании.

Капролон устойчив к щелочам, спиртам и др. Применяется в качестве антифрикционного, электроизоляционного и конструкционного материала в различных отраслях промышленности для изготовления крупногабаритных толстостенных, мелкосерийных нестандартных изделий, деталей широкого применения.

Характеристики разработанного материала с различными марками наполнителей и аналогов

| Материал / Свойства | Разработанный КМ с АН-К6 | Разработанный КМ с 7R | Разработанный КМ с А-6-30 | ПЭНД | СВМПЭ | Ф-4 | ПА 6 - МГ |
|--|--------------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------|---------------------|-------|-----------|
| Ударная вязкость, кДж/м ² | 1971,6 | 2469 | 2876,2 | образец не ломается | образец не ломается | - | 18-50 |
| Изгибающее (разрушающее) напряжение, МПа | 47,1 | 56,3 | 63,4 | 22-32 | 28-32 | - | - |
| Прочность при разрыве, Н/мм ² | 15,2 | 22,9 | 27,9 | 20-29 | 30-40 | 14-35 | 60-70 |
| Относительное удлинение при разрыве, % | 4,1 | 6,2 | 7,4 | 450-700 | 400-500 | - | - |
| Твердость, НВ, Н/мм ² | 25 | 35 | 32 | 45-60 | 40-50 | 30-40 | 130 |
| Коэф. трения | 0,3-0,4 | 0,3-0,4 | 0,3-0,4 | 0,2 | 0,08-0,1 | 0,04 | 0,05-0,1 |

Приведенные аналоги имеют коэффициент трения меньше требуемого (0,05–0,2), большие значения твердости (30–130 НВ) и относительные удлинения (ПЭНД и СВМПЭ). Следовательно, они не могут обеспечить требуемые значения эксплуатационных характеристик.

Как видно из таблицы, по сравнению с аналогами, разработанный материал удовлетворяет заявленным требованиям.

2.4.5 Исследование микроструктуры образцов

Исследование структуры изготовленного композиционного материала, под микроскопом МБС-2 при 100 кратном увеличении.

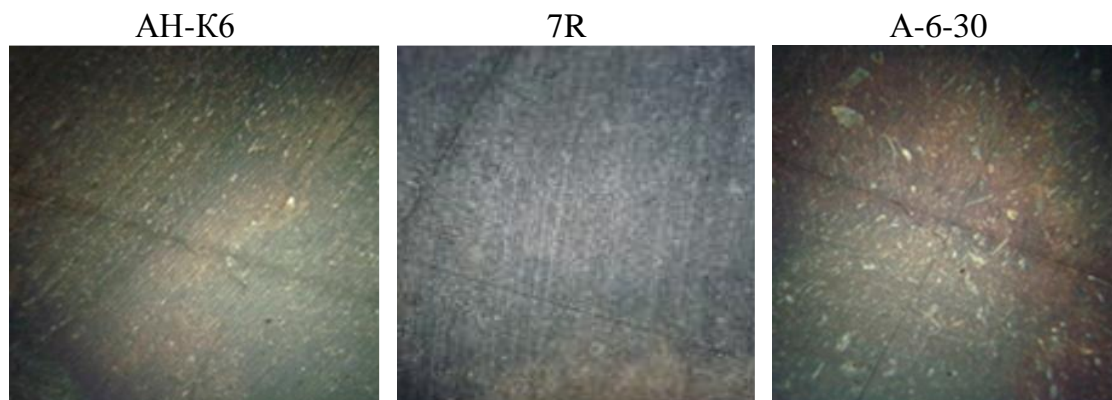


Рис.2.11 Шлифы полученного композиционного армированного материала

Как видно из представленных на рис. 2.11 шлифов, наполнитель равномерно распределен внутри полученного материала.

Проанализирована микроструктура полученного композиционного материала на металлографическом микроскопе «МИМ-7» при 300 кратном увеличении.

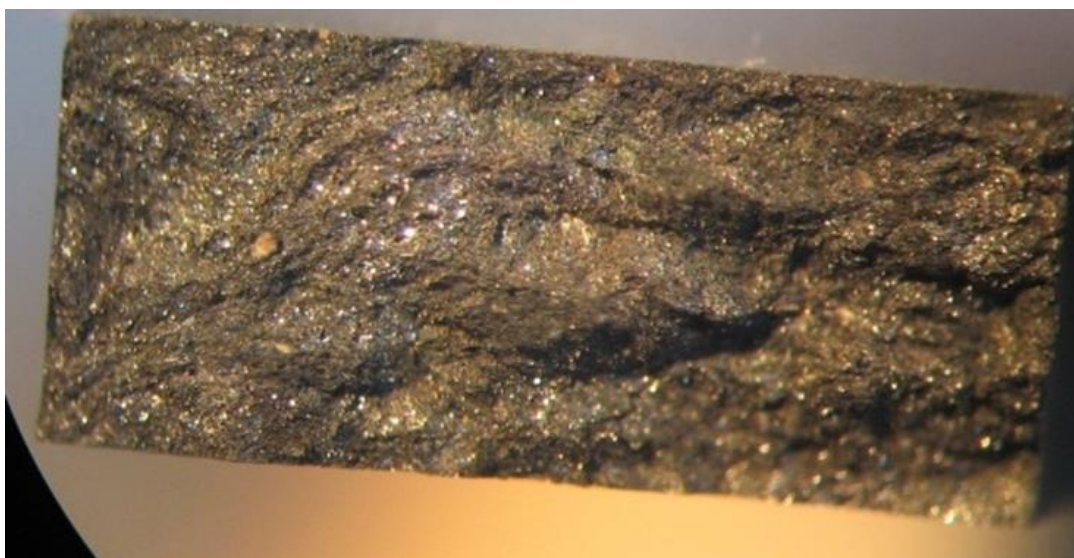


Рис.2.12 Микроструктура полученного композиционного материала

Видны включения хризотила, в целом структура достаточно однородная.

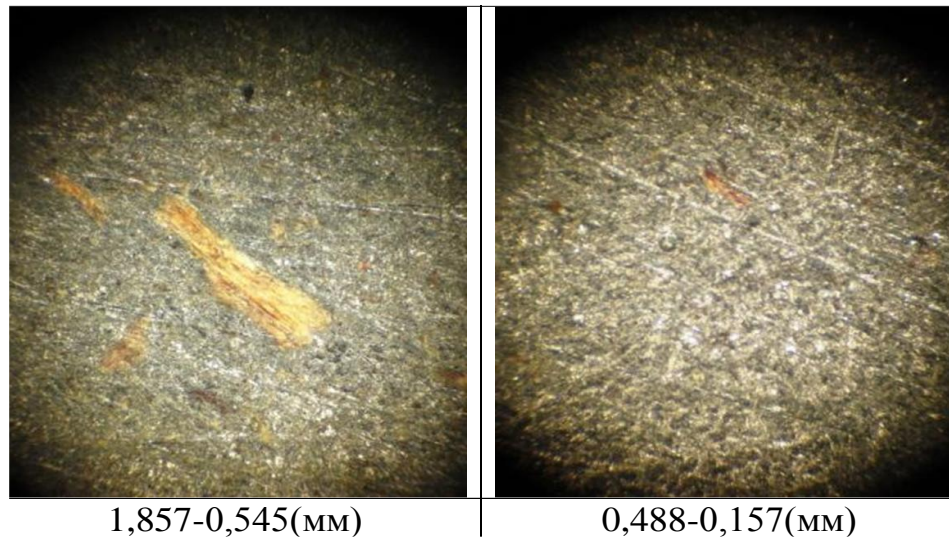


Рис.2.13. Частицы волокнистого наполнителя (хризотила) на поверхности образца

Частицы волокнистого наполнителя на поверхности образцов представлены на рис.2.13. Частицы большего размера 1,857-0,545 мм при использовании марки наполнителя АН-К6, частицы 0,488-0,157 - хризотил коротковолокнистый марка 7R. Использование смесей с хризотилом коротковолокнистым марки 7R позволяет получить более однородную поверхность материала.

2.4.6 Трибологический анализ взаимосвязи эксплуатационных показателей

Изделия из исследуемого материала применяются в различных демпфирующих устройствах и конструкциях, обеспечивающих затухание колебаний в механизме преобразованием энергии движения в тепловую, подвергая при этом минимальному износу сопрягаемую деталь. При этом особенно важным является фрикционное свойство материала. Основным показателем является значение коэффициента трения. Для достоверного определения величины коэффициента трения при приемо-сдаточных испытаниях изделий, необходимо дополнительно проанализировать существующие методы и средства исследования коэффициента трения.

Исследуемое изделие применяется в демпфирующих устройствах и конструкциях, обеспечивающих затухание колебаний в механизме преобразованием энергии движения в тепловую, не подвергая при этом износу сопрягаемую деталь. В

этом случае наиболее важным является фрикционное свойство материала, которое выражается коэффициентом трения f_T , значение которого определено в пределах 0,3...0,4. Сложность и трудоемкость поставленной задачи связана с отсутствием простых устройств текущего контроля коэффициента трения, поэтому возникла необходимость анализа взаимосвязи данного свойства с характеристикой, более удобными для текущего контроля - твердостью.

Взаимосвязь свойств композиционного материала – коэффициента трения f_T и твердости НВ установлена исследованиями Крагельского И. В., Чичинадзе А.В. и Михина Н.М.

При ненасыщенном контакте и пластических деформациях коэффициент трения можно определить:

$$f_T = F_T / F_N, \dots \dots \dots (2.18)$$

где F_T - сила трения, F_N - сила, действующая по нормали к поверхности

Силловые воздействия твердых тел при внешнем трении наибольшим образом зависят от напряженно-деформированного состояния зон контактов микронеровностей. Силловые взаимодействия в таких случаях являются, как правило, минимальными при упругих деформациях и максимальными при пластических.

По исследованиям А.В. Чичинадзе, М.А. Мамхегова и Н.А. Михина [10, 11, 39, 40, 62, 64, 71, 77, 78] коэффициент трения можно определить, как зависимость:

(2.19)

$$f_T = \frac{\tau_0}{HB} + k^0 \left(\frac{\rho_c}{HB} \right)^m,$$

В формуле (2.21) использованы параметры для данного материала:

| | |
|-------------|---|
| $\tau_0=10$ | Фрикционная константа, зависящая от физико-химического состояния поверхностей контактирующих тел; |
| $k^0=0,056$ | Константа, определяемая в зависимости от значений шероховатости поверхностей трения и степени насыщенности контакта |
| $m=0,75$ | Константа, зависящая от параметров шероховатости |

По формуле (2.19) и, приведенным ниже величинам, построена зависимость твердости от коэффициента трения (рис.2.14.).

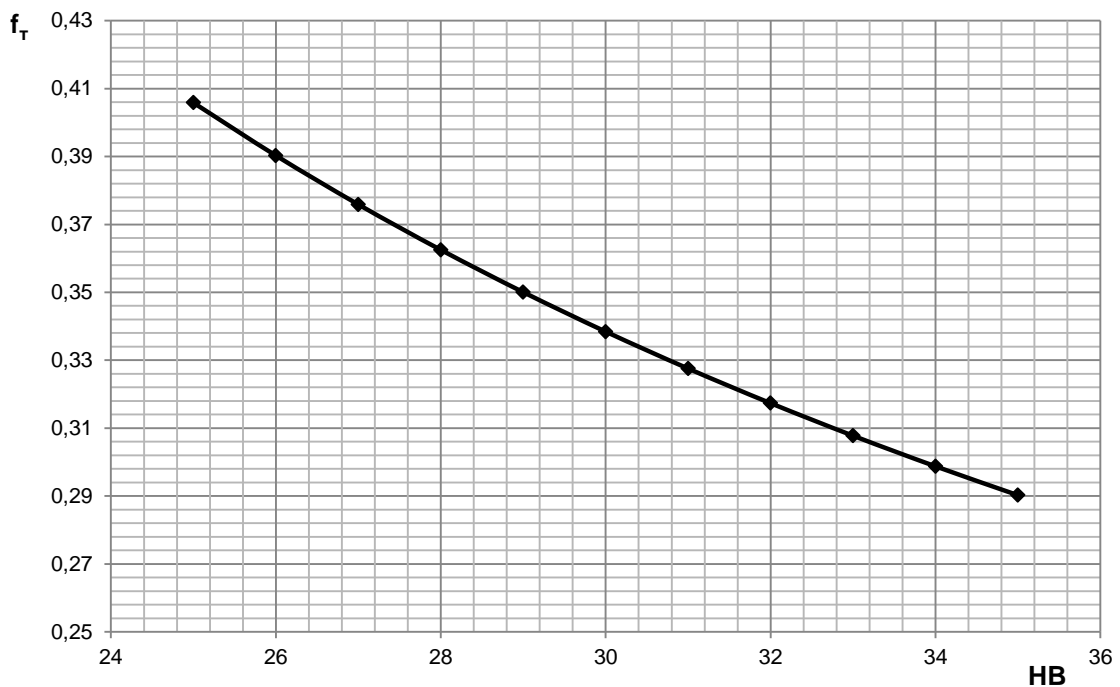


Рис.2.14. График взаимосвязи твердости и коэффициента трения

Расчеты по формуле (2.19) и построенный по ней график рис.2.14 показывают, что заданный уровень коэффициента трения в пределах $f_T = 0,31 \dots 0,39$ обеспечивается твердостью в пределах НВ 26...33. В связи с тем, что в данной модели учтены не все действующие факторы, то реальная зависимость будет отличаться от теоретической, поэтому в технических требованиях к изделию устанавливаем пределы НВ 28...32.

2.4.7 Выбор средств контроля твердости материала

В настоящее время отсутствуют специализированные методики для контроля твердости композиционных материалов. Для разработки методики определения их твердости проанализированы стандарты в области контроля твердости для пластиков, металлов и сплавов.

**Межгосударственные стандарты в области контроля твердости,
введенные в действие на территории РФ**

| Металлы | Композиционные материалы на основе полимерной матрицы | Пластики |
|---|---|---|
| по Бринеллю (HB) ГОСТ 9012-59 (ИСО 6506-81, ИСО 410-82) (в редакции 1990г.). по Роквеллу (HR) ГОСТ 9013-59 (в редакции 1989г.). по Виккерсу (HV) ГОСТ 2999-75 (в редакции 1987г.). Измерение микротвёрдости ГОСТ 9450-76 | — | по Бринеллю ГОСТ 4670-91 по Роквеллу ГОСТ 24622-91 Твёрдость по Шору ГОСТ 24621 |

Таблица 2.16

Международные и европейские стандарты в области контроля твердости

| Металлы | Композиционные материалы на основе полимерной матрицы | Пластики |
|---|---|---|
| по Бринеллю (HB) DIN EN ISO 6506, ASTM E 10 по Роквеллу (HR) DIN EN ISO 6508, ASTM E 18 по Виккерсу с измерением глубины (HVT) VDI/VDE 2616-1 по Бринеллю с измерением глубины (HBT) VDI/VDE 2616-1 по Виккерсу (HV) DIN EN ISO 6507, ASTM E 92 | — | по Бринеллю ISO 2039-1 по Роквеллу ISO 2039-2 Твёрдость по Шору ISO 868 (DIN 53505, ASTM D2240) (ASTM (Американского общества по испытанию материалов)) |

Методики отличаются применяемой нагрузкой, инденторами, принципом измерения и применяемыми средствами контроля. Существенно отличаются методики для металлов и пластиков. Для композиционных материалов, ввиду их разнообразия и новизны, отсутствует нормативная база по контролю твердости.

Для установления значений нагрузки и размера индентора, трибологическим анализом было определено, что при упругом ненасыщенном контакте нормальная

нагрузка в зависимости от сближения между поверхностями взаимодействия твердых тел (2.20):

$$P = \frac{1,33 A_c b^{\frac{2\nu+1}{2\nu}} + \nu(\nu-1)k_1 E \varepsilon^{\frac{2\nu+1}{2\nu}}}{2\pi\sqrt{R(1-\mu^2)}}, \quad \text{Н} \quad (2.20)$$

Значения параметров формулы (2.20), принятые для исследуемого изделия:

| | |
|-------------------|--|
| $A_c=125,6$ | Контурная площадь контакта |
| $b=1,414214$ | Коэффициент диссипации |
| $\nu=1,5$ | Показатель опорной кривой профиля поверхности |
| $\varepsilon=0,3$ | Относительный уровень опорной длины профиля |
| $\tau_0=10$ | Фрикционная константа, зависящая от физико-химического состояния поверхностей контактирующих тел |
| $k_1=1$ | Коэффициент, зависящий от параметра ν |
| $E=40000$ | Модуль упругости деформируемого материала, (Н/мм ²) |
| $\mu=0,4$ | Коэффициент Пуассона |
| R | Радиус индентора, мм |

На рис. 2.15 по указанным данным построена зависимость нормальной нагрузки от величины радиуса индентора.

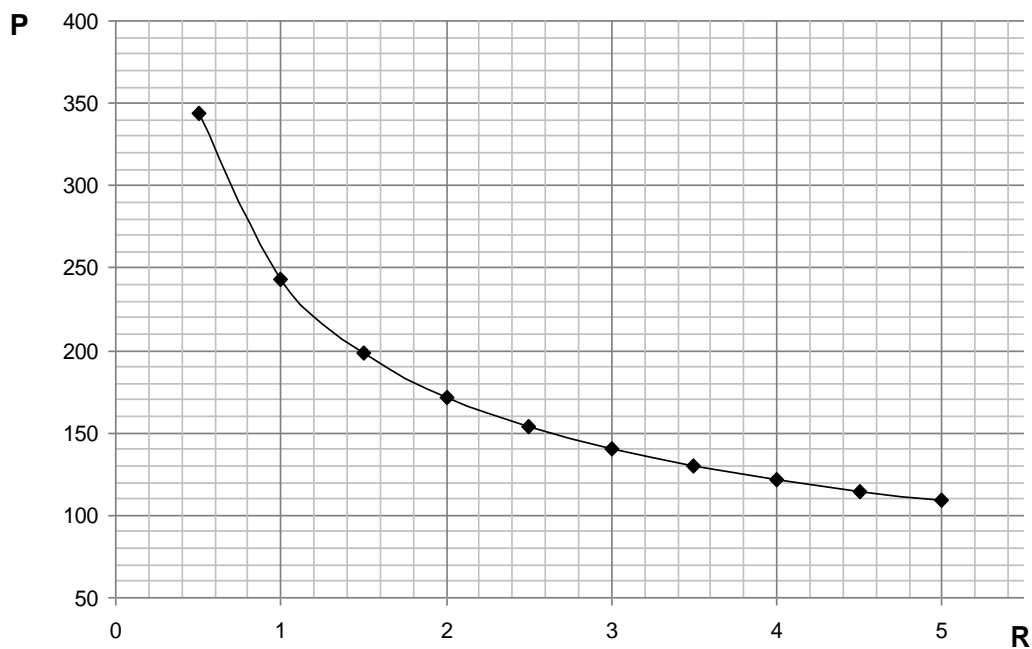


Рис.2.15 Взаимосвязь размера индентора и нормальной нагрузки

Данная зависимость хорошо согласуется с методикой ГОСТ 4670-91. Пластмассы. Определение твердости. Метод вдавливания шарика. Где предусмотрена испытательная нагрузка $F_m = 132$ Н и использование шарика $d = 5$ мм. По графику нагрузка $P = 150$ Н и использование индентора $d = 5$ мм.

Методика проведения испытаний по ГОСТ 4670-91 «Пластмассы. Определение твердости. Метод вдавливания шарика» предусматривает [73]:

- **Испытательная нагрузка F_m** (допуск ± 1 %) должна иметь одно из следующих значений: 49,0; **132**; 358; 961; 1470 Н.

- **Диаметр шарика должен быть $(5,0 \pm 0,05)$ мм.**

- Предварительная нагрузка F_o (допуск ± 1 %) должна быть 9,8 Н.

- Предельная глубина вдавливания должна быть не более 0,4 мм и должна измеряться с точностью $\pm 0,005$ мм.

- Устройство для измерения времени с точностью $\pm 0,1$ с. Допускается применять устройство для измерения времени с точностью $\pm 0,5$ с.

Образцы для испытания – это гладкие плоские пластины или блоки достаточного размера для исключения влияния краевых эффектов на результаты испытаний. Допустимым является применение плоскопараллельных образцов (размер поверхности не менее 10×10 мм или диаметр 10 мм) [73].

В расчетах берется среднее значение диаметра отпечатка. Уменьшенное значение нагрузки F_r в Ньютонах вычисляют по формуле (2.21):

$$F_r = F_m \frac{0,21}{(h - h_r) + 0,21}, \dots \dots \dots (2.21)$$

где F_m – нагрузка на индентор при испытании, в Ньютонах;

h_r – уменьшенная глубина вдавливания (0,25 мм);

h_1 – глубина вдавливания индентора под испытательной нагрузкой, в мм;

h_2 – деформация корпуса прибора под испытательной нагрузкой, в мм;

0,21 – коэффициент приведения нагрузки к глубине вдавливания h_r , равной 0,25 мм;

$h = h_1 - h_2$ – глубина вдавливания после внесения поправки на деформацию корпуса прибора, в мм;

Твердость при вдавливании шарика H в Н/мм^2 вычисляют по формуле (2.22)

$$H = \frac{1}{5\pi} \times \frac{F_r}{h_r}, \dots \dots \dots (2.22)$$

где H - твердость при вдавливании шарика, в Н/мм^2 ;

F_r - уменьшенная нагрузка при испытании, Н. (2.21);

h_r - уменьшенная глубина вдавливания в мм.

Значения твердости при вдавливании шарика как функции глубины вдавливания и нагрузки при испытании приведены в справочном приложении стандарта ГОСТ 4670-91 [73].

Таблица 2.17

**Результаты измерения твердости по ГОСТ 4670-91 Пластмассы.
Определение твердости. Метод вдавливания шарика**

| Диаметр шарика/нагрузка | Размах показаний на 1 образце | | | Max значение \overline{HB} на 1 образце |
|-------------------------|-------------------------------|-------------------|-------|---|
| | h , мм | HB | % | |
| HB 5/132 | от 0,29 до 0,26 | от 28,32 до 32,18 | 13,62 | 32,18 |

Таблица 2.18

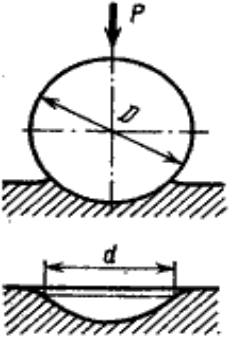

**Погрешности измерения твердости по ГОСТ 4670-91 Пластмассы.
Определение твердости. Метод вдавливания шарика**

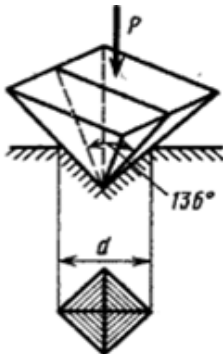
| Число измерений, n | Среднее значение, h | Размах результатов, R | СКО результатов, S_d | Погрешность, ϵ_d |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|---------------------------|
| 12 | 27,75 HB | 1,75 HB | 1,215431 HB | 2, 274 HB |

Таблица 2.19

Анализ методов контроля твердости

| Метод измерения | Условия проведения | Результат |
|--|--|--|
| по Бринеллю (HB) ГОСТ 9012-59 (ИСО 6506-81, ИСО 410-82) (в редакции 1990г.) | Индентор: d=2,5 мм Нагрузка: 15,625 кгс (153 Н) | Размах показаний на 1 образце от 1,7 до 7,1 (от 6,98 до 25 %) Max значение твердости на 1 образце 37,1 HB. |

| | | |
|---|--|--|
|  | <p>Индентор: d=5 мм</p> <p>Нагрузка: 62,5 кгс (613 Н)</p> | <p>Размах показаний на 1 образце от 0,4 до 3,3 (от 1,38 до 14,5 %) <i>Max</i> значение твердости на 1 образце 29,3 НВ.</p> |
|  | <p>Индентор: d=10 мм</p> <p>Нагрузка: 250 кгс (2450 Н)</p> | <p>Получен отпечаток: $d_{\text{отпечатка}} = 3,2 \text{ мм}$ (30, 2 НВ) Не выполняются условия по п.4.9. ГОСТ 9012 Расстояние между центром отпечатка и краем образца должно быть не менее 2,5 диаметров отпечатка d; расстояние между центрами двух смежных отпечатков должно быть не менее четырех диаметров отпечатка; для материалов с твердостью до 35 НВ (НВW) эти расстояния должны быть соответственно 3d и 6d.</p> |
| <p>по Бринеллю (НВ) ГОСТ 4670-91 ПЛАСТМАССЫ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ Метод вдавливания шарика</p> | <p>Индентор: d=5 мм</p> <p>Нагрузка: 132 Н</p> | <p>Размах показаний на 1 образце от 28,32 до 32,18 НВ, СКО результатов, $S_d = 1,21 \text{ мм}$, доверительный интервал для истинного значения величины твердости составил $27,75 \pm 2,27 \text{ НВ}$ при вероятности $P = 0,95$</p> |
| <p>по Роквеллу (HR) ГОСТ 9013-59 (в редакции 1989г.) Стандарт устанавливает метод измерения твердости по Роквеллу (шкалы А, В, С, D, E, F, G, H, К). Сущность метода заключается во внедрении в поверхность образца (или изделия) алмазного конус-</p> | <p>Индентор: стальной сферический наконечник d=1,588 мм (шкала В)</p> <p>Нагрузка: Предварительное усилие $F_0=98,07(10) \text{ Н(кгс)}$; Основное усилие $F_1 = 882,6(90) \text{ Н(кгс)}$; Общее усилие $F = 980,7(100) \text{ Н(кгс)}$.</p> | <p>Неинформативен. Идет разрушение объекта измерения. Это связано с малой величиной индентора и свойствами материала (наличие включений). Полученные значения находятся в диапазоне 109...113 HRV</p> |

| | | |
|--|---|--|
| <p>ного (шкалы А, С, D) или стального сферического наконечника (шкалы В, Е, F, G, H, K) под действием последовательно прилагаемых усилий предварительного F_0 и основного F_1 усилий и в определении глубины внедрения наконечника после снятия основного усилия (F_1).</p> <p>По ГОСТ 9013 п.3.3 наконечник шариковый стальной. Номинальные диаметры шариков должны быть 1,588 (шкалы В, F, G) и 3,175 мм (шкалы Е, H, K) по ГОСТ 3722</p> | <p>Индентор: алмазный конус с углом при вершине 120° (шкалы А и С).</p> <p>Нагрузка: шкала А Предварительное усилие $F_0=98,07(10)$ Н(кгс); Основное усилие $F_1 = 490,3(50)$ Н(кгс); Общее усилие $F = 588,4(60)$ Н(кгс).</p> <p>Нагрузка: шкала С Предварительное усилие $F_0=98,07(10)$ Н(кгс); Основное усилие $F_1 = 1373(140)$ Н(кгс); Общее усилие $F = 1471(150)$ Н(кгс).</p> | <p>Неинформативен. Идет разрушение объекта измерения. Это связано с малой величиной индентора и свойствами материала (наличие включений).</p> <p>По анализу полученных данных результат измерений в диапазоне: 36...42 HRC (шкала С) 70...71 HRA (шкала А)</p> |
| <p>по Роквеллу (HR) ГОСТ 24622-91 Стандарт устанавливает метод определения твердости пластмасс по Роквеллу с использованием шкал Е, М, L и Р. Показатель твердости по Роквеллу с помощью этого метода определяют по чистому увеличению глубины вдавливания в то время, как нагрузка на шарик возрастает от предварительной заданной нагрузки до общей и снова возвращается к той же самой предварительной нагрузке.</p> | <p>Предварительная нагрузка: 98,07 Н Общая нагрузка: 588,4 Н (шкалы Р, L); Общая нагрузка: 980,7 Н (шкалы М, Е);</p> <p>Диаметр шарика, мм: $12,7 \pm 0,015$ (шкала Р); $6,35 \pm 0,015$ (шкала L); $6,35 \pm 0,015$ (шкала М); $3,175 \pm 0,015$ (шкала Е).</p> | <p>Не выполняются условия по п.7.4. ГОСТ 24622 На поверхности одного испытуемого образца проводят не менее 5 измерений. Не следует проводить измерения на расстоянии ближе 10 мм от края образца. Расстояние между двумя измерениями должно быть не менее 10 мм.</p> |
| <p>по Виккерсу (HV) ГОСТ 2999</p>  | <p>Алмазный индентор имеющий форму правильной четырехгранной пирамиды с двухгранным углом, равным 136° при вершине.</p> <p>При измерении твердости алмазной пирамидой применяются следующие нагрузки: 9,807 (1); 19,61 (2); 24,52 (2,5); 29,42 (3); 49,03 (5); 98,07 (10); 196,1 (20); 294,2 (30); 490,3 (50); 980,7 (100) Н (кгс).</p> | <p>Неинформативен. Полученный отпечаток очень мал. Диагональ отпечатка: 0,29...0,32 мм, что соизмеримо с величиной включений материала и не может в полной мере отражать исследуемое свойство.</p> <p>По анализу полученных данных результат измерений в диапазоне: 353...413 HV</p> |

| | | |
|---|---|---|
| <p>Твердость по Шору ГОСТ 24621-91 Пластмассы и эбонит. Определение твердости при вдавливании с помощью дюрометра (твердость по Шору)</p> <p>Индентор для дюрометра типа D</p>  | <p>Стандарт устанавливает метод определения твердости пластмасс и эбонита вдавливанием с помощью дюрометров двух типов: дюрометра типа А, применяемого для испытания более мягких пластмасс, и дюрометра типа D, применяемого для испытания более твердых пластмасс</p> <p>Соотношение шкал твердости</p>  | <p>Не выполняются условия по п. 5.1. ГОСТ 24621 Толщина образца для испытания должна быть не менее 6 мм и п. 5.2. Размеры образцов должны позволять проводить испытание на расстоянии не менее 12 мм от любого края, если только заранее не будет известно, что при испытаниях на меньшем расстоянии от края достигаются идентичные результаты.</p> <p>По анализу полученных данных результат измерений в диапазоне: 50...75 HSh</p> |
| <p>Микротвёрдость ГОСТ 9450-76 твёрдость отдельных фаз и структурных составляющих, твёрдость внутри отдельных зёрен, тонкого поверхностного слоя (после химико-термической обработки) и тонких листов и фольги</p> | <p>Измеряется вдавливанием алмазной пирамидки под нагрузкой менее 2 н (200 гс) по методу восстановленного отпечатка (основной); по методу невосстановленного отпечатка (дополнительный).</p> | <p>Неинформативен, поскольку относится к микромеханическим испытаниям, которые были разработаны для металлографических исследований свойств отдельных структурных составляющих сплавов. Позволят получить данные по отдельным включениям материала, что в полной мере не отражает свойство материала.</p> |

При выборе диаметра индентора также был выполнен анализ погрешностей измерений. При измерении твердости на приборе DIA TESTOR 2RC шариком 2,5 мм с соответствующей нагрузкой 15,625 Н размеры отпечатков можно определять на самом приборе. В данном случае также необходимо оценить значение субъективной погрешности измерения. Для этого были выполнены измерения на 9 образцовых кольцах разных диаметров в 3-х равноудаленных точках с использованием шариков диаметрами 2,5 и 5,0 мм. Субъективная погрешность оценивалась по наибольшему размаху результатов показаний на одном образце тем и другим индентором (табл. 2.20). При этом на одном из 9 образцов среднее значение

ние твердости НВ 2,5/15,625 получилось равным 37,125 единиц, а НВ 5/62,5 – 29,27 единиц.

Таблица 2.20

Результаты измерения твердости на приборе DIA TESTOR 2RC

разными шариками

| Диаметр шарика/нагрузка | Размах показаний на 1 образце | | Max значение \bar{H}_{VB} на 1 образце |
|-------------------------|-------------------------------|----------------|--|
| | НВ | % | |
| НВ 2,5/15,625 | от 1,73 до 7,09 | от 7 до 25 | 37,13 |
| НВ 5/62,5 | от 0,36 до 3,32 | от 1,4 до 14,5 | 29,27 |

Анализ погрешностей измерения показал низкий уровень точности получаемых результатов измерения этим методом: размах показаний на 1 образце от 28,32 до 32,18 НВ, СКО результатов, $S_d = 1,21$ мм, доверительные границы для истинного значения величины твердости составил $27,75 \pm 2,27$ НВ при вероятности $P = 0,95$.

Наименьшая погрешность при измерении твердости по НВ будет при использовании шарика диаметром 5 мм с нагрузкой 62,5 Н и измерении отпечатка на инструментальном микроскопе с насадкой осветителя для работы в отраженном свете. Полученные значения позволили принять условия анализа величины твердости ближе к методике Бринелля по ГОСТ 9012-59 (НВ 5/62,5-2,5).

Для определения параметров деталей выбраны средства измерений с метрологическими характеристиками, обеспечивающими необходимую достоверность и точность.

Измерение твердости осуществлялось по методу Бринелля, что предполагает вдавливание в исследуемый образец стального шарика заданного диаметра D под воздействием нагрузки P в течение заданного времени. Твердость по Бринеллю (НВ), представляет собой отношение нагрузки P к площади поверхности сферического отпечатка на испытываемой поверхности. Площадь поверхности отпечатка рассчитывается по среднему диаметру отпечатка.

$$H_{VB} = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \frac{кгс}{мм^2} = \frac{9,81 \cdot 2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \text{ МПа}, \quad (2.23)$$

где d – диаметр отпечатка.

Для обоснования выбора средств и методики определения твердости были проведены исследования погрешностей измерений. При исследовании субъективной погрешности использовались методы статистического анализа данных и определены точечные оценки с вероятностью $P = 0,95$.

Диаметр отпечатка измеряется микроскопом МПБ-3, цена деления которого 0,05 мм, предел допускаемой погрешности измерения 0,02 мм.

Принимая исходное уравнение при соблюдении перечисленных условий, можно определить предельную погрешность метода измерения, как погрешность косвенных измерений, когда известны предельные отклонения диаметра шарика, прикладываемой нагрузки и предельная погрешность измерения диаметра отпечатка (микроскопа МПБ-3). Расчетное значение методической погрешности в этом случае составляет $\pm 1,8\%$, что соответствует характеристике прибора, указанной в паспортных данных. Однако, при измерении диаметра отпечатка микроскопом МПБ-3 существенное значение имеет субъективная погрешность, так как края отпечатка не всегда четко видны. Поэтому измерения диаметра отпечатка были выполнены на инструментальном микроскопе БМИ-1Ц с насадкой осветителя для работы в отраженном свете. Цена деления отсчетного устройства БМИ-1Ц 0,001 мм, предел допускаемой погрешности измерения прибора 0,004 мм.

Анализ субъективной погрешности

Были получены 12 результатов наблюдений одних и тех же отпечатков микроскопами МПБ-3 и БМИ-1Ц, выполненные разными операторами. Результаты расчета параметров рассеяния этих результатов каждым прибором приведены в табл. 2.21.

Таблица 2.21

Погрешности измерения отпечатков микроскопами МПБ-3 и БМИ-1Ц

| Тип микроскопа | Число измерений, n | Среднее значение, \bar{d} | Размах результатов, R | СКО результатов, S_d | Погрешность, ϵ_d |
|----------------|----------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------------|---------------------------|
| МПБ-3 | 12 | 1,486 мм | 0,1 мм | 0,034 мм | 0,0215 мм |
| БМИ-1Ц | 12 | 1,654 мм | 0,071 мм | 0,021 мм | 0,012 мм |

Субъективная погрешность измерений на микроскопе БМИ-1Ц с вероятностью $P = 0,95$ составляет 0,72 % от среднего значения, СКО результатов измерений – 1,13 %, размах – 4,3 %. Соответственно, погрешность измерений на микроскопе МПБ-3 с вероятностью $P = 0,95$ составляет 1,45 % от среднего значения, СКО результатов измерений – 2,28 % и размах – 6,73 %.

Следовательно, субъективная составляющая случайной погрешности измерения при использовании инструментального микроскопа уменьшается в 2 раза.

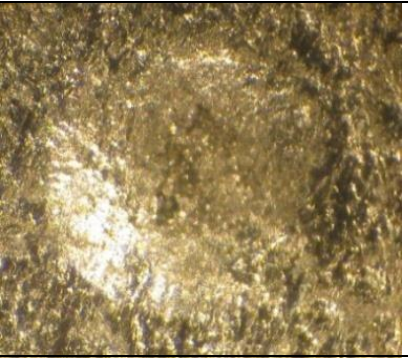
Также, проведено исследование влияния субъективной погрешности оператора при измерении твердости по методу Бринелля в зависимости от используемых методик контроля отпечатка.

Решаемой задачей является анализ погрешности измерений твердости при использовании шарика диаметром $5 \pm 0,004$ мм (НВ 5/62,5) при измерении одного и того же отпечатка микроскопом БМИ-1Ц разными операторами. При исследовании субъективной погрешности использовались методы статистического анализа данных, были определены точечные оценки с вероятностью $P = 0,95$.


В ходе эксперимента 8 операторов определяли размер диаметра отпечатка по вертикали и горизонтали. Один и тот же отпечаток контролировался двумя методами - с использованием графита и цветного геля в качестве контрастного заполнителя для отпечатка. Таким образом, получены две выборки данных (табл. 2.22, 2.23).

Таблица 2.22

Размеры диаметра отпечатка с использованием графита

| № оператора | $d_{гор.}$ | $d_{верт.}$ | $d_{ср.}$ | НВ | Вид отпечатка |
|-------------|------------|-------------|-----------|--------|--|
| 1 | 1,524 | 1,537 | 1,5305 | 33,174 |  |
| 2 | 1,621 | 1,631 | 1,626 | 29,296 | |
| 3 | 1,609 | 1,554 | 1,5815 | 31,015 | |
| 4 | 1,501 | 1,587 | 1,544 | 32,581 | |
| 5 | 1,585 | 1,735 | 1,66 | 28,074 | |
| 6 | 1,677 | 1,65 | 1,6635 | 27,952 | |
| 7 | 1,682 | 1,624 | 1,653 | 28,319 | |
| 8 | 1,624 | 1,488 | 1,556 | 32,068 | |

Размеры диаметра отпечатка с использованием цветного геля

| № оператора | $d_{гор.}$ | $d_{верт}$ | $d_{ср.}$ | НВ | Вид отпечатка |
|-------------|------------|------------|-----------|--------|--|
| 1 | 1,542 | 1,556 | 1,549 | 32,366 |  |
| 2 | 1,501 | 1,527 | 1,514 | 33,919 | |
| 3 | 1,546 | 1,569 | 1,5575 | 32,005 | |
| 4 | 1,529 | 1,525 | 1,527 | 33,329 | |
| 5 | 1,535 | 1,57 | 1,5525 | 32,217 | |
| 6 | 1,553 | 1,577 | 1,565 | 31,691 | |
| 7 | 1,552 | 1,579 | 1,5655 | 31,669 | |
| 8 | 1,542 | 1,527 | 1,5345 | 32,997 | |

Основные статистические характеристики определения линейных размеров отпечатков рассчитаны с доверительной вероятностью $P = 0,95$. Данные приведены в табл. 2.24.

Субъективная относительная погрешность измерений на микроскопе БМИ-1Ц с вероятностью $P = 0,95$ составляет 2,88 % от среднего значения величины отпечатка по первому методу, для второго метода субъективная относительная погрешность составила 1,01 % . Следовательно, второй метод с использованием цветного геля уменьшает субъективную относительную погрешность в 2,85 раза.

Таблица 2.24

Результаты определения погрешности при использовании графита и геля

| Используемый материал | Число измерений, n | Среднее значение, \bar{d} | Размах результатов, R | СКО результатов, S_d | Погрешность, ϵ , мм |
|-----------------------|----------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------------|
| графит | 8 | 1,6018 мм | 0,1330 мм | 0,0552 мм | 0,0462 |
| гель | 8 | 1,5456 мм | 0,0515 мм | 0,0187 мм | 0,0156 |

Также проанализированы значения твердости по каждому из методов. Размах показаний на 1 образце от 27,95 до 33,17 в НВ по первому методу, от 31,67 до 33,92 единиц по второму методу. Среднее значение твердости НВ 5/62,5 по первому методу составило - 30,31 единиц, по второму методу - 32,52 единиц по НВ.

Наименьшая субъективная погрешность получена при определении твердости по НВ измерением отпечатка на образце на инструментальном микроскопе с

насадкой осветителя для работы в отраженном свете и использованием цветного геля. Данная методика определения твердости будет использоваться в дальнейших исследованиях.

Выводы по главе 2

1. Выбрана методика измерения вязкости смолы с использованием вискозиметра ВПЖ-2, обеспечивающая наименьшую погрешность измерения.

2. Экспериментальными исследованиями получена зависимость динамической вязкости смолы от температуры ее нагрева:

$$\eta = 23723,3 \cdot T^{-1,42}.$$

3. Проведен анализ динамики зависимости вязкости раствора смолы СФЖ-3031 от времени ее хранения, определено незначительное изменение вязкости при нормальных условиях хранения смолы в течение трех недель, наблюдается увеличение с 213 до 226 *сП*, при этом на четвертой неделе и далее идет резкое возрастание вязкости раствора смолы (на конец гарантийного срока увеличивается до 378 *сП*).

4. Выбрано устройство перемешивания смеси, обеспечивающее однородность смеси и необходимую твердость изделий при наименьших затратах времени.

5. Определен гранулометрический состав смеси. Среднее значение размеров частиц 51,8 мкм, среднее квадратическое отклонение 20,6 мкм.

6. Для разработанного композиционного материала установлена взаимосвязь коэффициента трения с твердостью и определены границы возможного рассеивания твердости.

7. На основе стандартных методик измерения твердости для металлов и пластмасс разработана методика контроля твердости изделий из нового материала.

Глава 3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЗАВИСИМОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИЗДЕЛИЯ ОТ ВЛИЯЮЩИХ ФАКТОРОВ

3.1. Разработка плана многофакторного эксперимента

Для получения деталей с заданными требованиями и обеспечения стабильности параметров в процессе их изготовления необходимо установить соответствующие требования к влияющим факторам.

Теория планирования эксперимента получила широкое распространение в различных областях научной и практической деятельности, поскольку позволяет повысить эффективность лабораторных и промышленных экспериментов. Согласно данной теории предполагается [84-88], что:

- множество определяющих факторов задано,
- каждый из факторов управляем,
- результаты опытов воспроизводятся,
- опыты равноценны,
- решается задача поиска оптимальных условий (или в некоторых случаях интерполяции),
- математическая модель процесса заранее не известна [84].

Преимуществами метода планирования эксперимента являются:

- рандомизация условий эксперимента;
- создание плана эксперимента, четкая формализация обработки данных с последующей их аппроксимацией;
- результаты экспериментов можно представить в виде математических зависимостей между воздействующими факторами и изучаемыми параметрами;
- снижение количество необходимых опытов;
- математическое планирование эксперимента позволяет найти область оптимума и получить ее математическую модель.

3.2. Установление взаимосвязи эксплуатационных показателей изделий с влияющими факторами

По результатам анализа составов разрабатываемого материала (глава 2) для дальнейшего моделирования взаимосвязи основных параметров и влияющих факторов была принята смесь 3 с хризотиловыми наполнителями марок А-6-30 и 7R. В ходе предварительного изучения взаимосвязи эксплуатационных показателей изделий были выделены основные влияющие факторы, оказывающие наибольшее влияние на твердость разработанного композиционного материала:

- температура нагрева пресса (t);
- время выдержки в форме (T_{ϕ});
- время выдержки после прессования ($T_{в}$).

Внешний вид экспериментальной детали (рис.3.1) и линейные размеры заготовки:

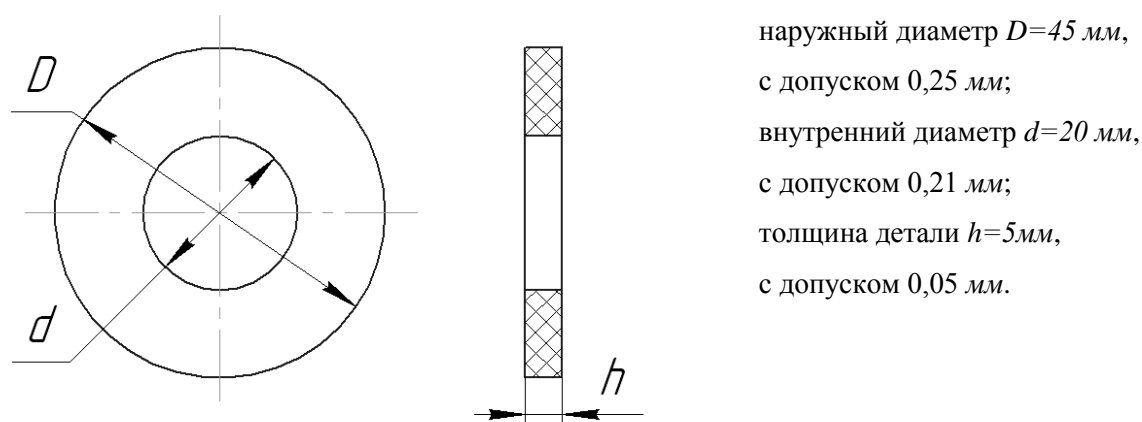


Рис. 3.1. Внешний вид экспериментальной детали

Для составления плана эксперимента определены уровни варьируемых факторов и их кодовые обозначения, которые представлены в табл. 3.1.

В соответствии с планом эксперимента было изготовлено 8 партий образцов деталей из полимерного композиционного материала по 6 штук в каждой партии.

Уровни варьирования факторов

| Уровень факторов | Кодовое обозначение | $t, ^\circ\text{C}$ | $T_\phi, \text{мин.}$ | $T_\theta, \text{дней}$ |
|-----------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|
| | | X_1 | X_2 | X_3 |
| Нижний | - | 120 | 4 | 3 |
| Верхний | + | 132 | 6 | 30 |
| Основной | 0 | 126 | 5 | 17 |
| Интервал варьирования | ΔX_i | 6 | 1 | 14 |

Кодированные переменные принимаются по формулам:

$$x_1 = \frac{t_{\max} - t_0}{\Delta t} = \frac{t - 126}{6} \quad (3.1)$$

$$x_2 = \frac{T_{\max \phi} - T_{0\phi}}{\Delta T_\phi} = \frac{T_\phi - 5}{1} \quad (3.2)$$

$$x_3 = \frac{T_{\max B} - T_{0B}}{\Delta T_B} = \frac{T_B - 17}{14} \quad (3.3)$$

Статистические характеристики экспериментальных значений приведены в табл. 3.2-3.4.

Значения параметров и их характеристик через 3 дня.

| Наполнитель | | асбест хризотилковый Марка А-6-30 (Температура нагрева пресса 125-115°C) | | | асбест хризотилковый Марка А-6-30 (Температура нагрева пресса 140-125°C) | | |
|----------------------|--------|---|---------|---------|---|---------|---------|
| Параметры | | Время выдержки в пресс-форме | | | Время выдержки в пресс-форме | | |
| | | 4 мин. | 5 мин. | 6 мин. | 4 мин. | 5 мин. | 6 мин. |
| $\overline{H_B}$ | верхн. | 27,4208 | 28,3614 | 28,4205 | 32,0218 | 32,0158 | 34,7385 |
| | нижн. | 27,572 | 28,7223 | 28,488 | 31,3748 | 32,1884 | 35,1562 |
| $S_{\overline{H_B}}$ | верхн. | 0,42954 | 0,30278 | 0,3494 | 1,43057 | 0,66838 | 0,8527 |
| | нижн. | 0,66925 | 0,80497 | 0,43744 | 1,35834 | 0,77311 | 1,9946 |
| $D, \text{мм}$ | | 44,985 | 44,93 | 44,9233 | 45,04 | 45,0533 | 45,045 |
| $S_D, \text{мм}$ | | 0,11292 | 0,1 | 0,03077 | 0,0743 | 0,06121 | 0,02258 |
| $d, \text{мм}$ | | 22,549 | 20,875 | 20,9083 | 20,85 | 21 | 20,8917 |
| $S_d, \text{мм}$ | | 0 | 0,02739 | 0,02041 | 0,06325 | 0 | 0,03764 |
| $h, \text{мм}$ | | 5,0325 | 5,04167 | 5,04667 | 5,03167 | 5,02917 | 5,02667 |
| $S_h, \text{мм}$ | | 0,02318 | 0,02927 | 0,02805 | 0,02317 | 0,0206 | 0,01862 |
| $m, \text{г}$ | | 13,1727 | 13,1961 | 13,1733 | 13,1316 | 13,1314 | 13,1159 |
| $S_m, \text{г}$ | | 0,0391 | 0,05203 | 0,06688 | 0,02138 | 0,0387 | 0,0446 |

| Наполнитель | | Хризотил коротковолокнистый Марка 7R (Температура нагрева пресса 125-115°C) | | | Хризотил коротковолокнистый Марка 7R (Температура нагрева пресса 140-125°C) | | |
|---------------------|--------|--|---------|---------|--|---------|---------|
| Параметры | | Время выдержки в пресс-форме | | | Время выдержки в пресс-форме | | |
| | | 4 мин. | 5 мин. | 6 мин. | 4 мин. | 5 мин. | 6 мин. |
| \overline{HB} | верхн. | 28,7698 | 28,2546 | 28,6379 | 32,0072 | 33,0246 | 34,9608 |
| | нижн. | 28,5833 | 28,3043 | 28,7082 | 32,3236 | 32,4953 | 35,2924 |
| $S_{\overline{HB}}$ | верхн. | 0,52555 | 0,19445 | 0,34013 | 0,41425 | 0,66497 | 1,04263 |
| | нижн. | 0,47213 | 0,36502 | 0,5967 | 1,40324 | 1,00314 | 0,96871 |
| D , мм | | 45,1133 | 44,97 | 44,9983 | 45,0733 | 45,005 | 45,045 |
| S_D , мм | | 0,15757 | 0,09778 | 0,0621 | 0,09331 | 0,06686 | 0,02258 |
| d , мм | | 21 | 21 | 20,95 | 21 | 21 | 20,8917 |
| S_d , мм | | 0 | 0 | 0,04472 | 0 | 0 | 0,03764 |
| h , мм | | 5,02 | 5,02333 | 5,03667 | 5,08333 | 5,04583 | 5,02667 |
| S_h , мм | | 0,03017 | 0,03157 | 0,02658 | 0,04179 | 0,02538 | 0,01862 |
| m , г | | 13,1239 | 13,0374 | 13,1109 | 13,2367 | 13,1122 | 13,1159 |
| S_m , г | | 0,05532 | 0,09468 | 0,08317 | 0,06533 | 0,07143 | 0,0446 |

Таблица 3.3

Значения параметров и их характеристик через 7 дней

| Наполнитель | | асбест хризотилковый Марка А-6-30 (Температура нагрева пресса 125-115°C) | | | асбест хризотилковый Марка А-6-30 (Температура нагрева пресса 140-125°C) | | |
|---------------------|--------|---|---------|---------|---|---------|---------|
| Параметры | | Время выдержки в пресс-форме | | | Время выдержки в пресс-форме | | |
| | | 4 мин. | 5 мин. | 6 мин. | 4 мин. | 5 мин. | 6 мин. |
| \overline{HB} | верхн. | 28,5327 | 30,4396 | 29,9559 | 33,8449 | 33,4711 | 37,8018 |
| | нижн. | 28,6807 | 30,5481 | 30,4296 | 34,8241 | 34,3201 | 37,4004 |
| $S_{\overline{HB}}$ | верхн. | 0,65057 | 0,3915 | 0,52982 | 1,60145 | 0,82883 | 1,88127 |
| | нижн. | 0,53896 | 0,95706 | 0,72512 | 1,84634 | 0,92418 | 2,16465 |
| D , мм | | 44,8617 | 44,8933 | 44,9067 | 44,9283 | 44,9792 | 44,9575 |
| S_D , мм | | 0,04324 | 0,05852 | 0,02995 | 0,02823 | 0,056 | 0,02989 |
| d , мм | | 20,8917 | 20,8792 | 20,9 | 20,875 | 20,925 | 20,9167 |
| S_d , мм | | 0,01946 | 0,04502 | 0,03015 | 0,07834 | 0,02611 | 0,03893 |
| h , мм | | 5,03 | 5,04083 | 5,03917 | 5,03083 | 5,025 | 5,02917 |
| S_h , мм | | 0,01758 | 0,0261 | 0,02712 | 0,02152 | 0,01732 | 0,01832 |
| m , г | | 13,1439 | 13,1192 | 13,0622 | 13,0806 | 13,06 | 13,0798 |
| S_m , г | | 0,02837 | 0,05294 | 0,282 | 0,0387 | 0,03851 | 0,03922 |

| Наполнитель | | Хризотил коротковолокнистый Марка 7R (Температура нагрева пресса 125-115°C) | | | Хризотил коротковолокнистый Марка 7R (Температура нагрева пресса 140-125°C) | | |
|---------------------|--------|--|---------|---------|--|---------|---------|
| Параметры | | Время выдержки в пресс-форме | | | Время выдержки в пресс-форме | | |
| | | 4 мин. | 5 мин. | 6 мин. | 4 мин. | 5 мин. | 6 мин. |
| $\overline{H B}$ | верхн. | 29,9781 | 29,9012 | 30,4768 | 33,3406 | 35,207 | 37,4933 |
| | нижн. | 29,4635 | 30,107 | 30,4446 | 33,3337 | 34,4102 | 38,0146 |
| S_{HB} | верхн. | 0,44299 | 0,23457 | 0,46188 | 0,33824 | 0,95873 | 1,1688 |
| | нижн. | 0,42068 | 0,31625 | 0,37154 | 0,30123 | 0,59651 | 0,7709 |
| D, мм | | 44,9175 | 44,91 | 44,9258 | 44,935 | 44,95 | 44,9767 |
| S _D , мм | | 0,03049 | 0,02828 | 0,03942 | 0,02611 | 0,01907 | 0,04418 |
| d, мм | | 20,9125 | 20,9167 | 20,925 | 20,9292 | 20,9292 | 20,925 |
| S _d , мм | | 0,03769 | 0,02462 | 0,02611 | 0,02575 | 0,02575 | 0,03371 |
| h, мм | | 5,02458 | 5,0275 | 5,02833 | 5,05833 | 5,04583 | 5,03167 |
| S _h , мм | | 0,02445 | 0,02735 | 0,03243 | 0,0298 | 0,02843 | 0,02553 |
| m, г | | 13,0645 | 13,0346 | 13,1048 | 13,1764 | 13,1209 | 13,0294 |
| S _m , г | | 0,04669 | 0,07531 | 0,07418 | 0,07507 | 0,05679 | 0,04919 |

Таблица 3.4

Значения параметров и их характеристик через 30 дней

| Наполнитель | | асбест хризотилковый Марка А-6-30 (Температура нагрева пресса 125-115°C) | | | асбест хризотилковый Марка А-6-30 (Температура нагрева пресса 140-125°C) | | |
|---------------------|--------|---|---------|---------|---|---------|---------|
| Параметры | | Время выдержки в пресс-форме | | | Время выдержки в пресс-форме | | |
| | | 4 мин. | 5 мин. | 6 мин. | 4 мин. | 5 мин. | 6 мин. |
| $\overline{H B}$ | верхн. | 32,7374 | 32,5792 | 33,1412 | 36,793 | 35,3464 | 37,9874 |
| | нижн. | 32,4108 | 33,2281 | 33,754 | 33,8772 | 34,6906 | 37,4266 |
| S_{HB} | верхн. | 0,50837 | 0,90062 | 0,5595 | 2,10953 | 1,32738 | 0,90559 |
| | нижн. | 0,34616 | 0,41495 | 1,32086 | 0,53448 | 1,33923 | 0,98082 |
| D, мм | | 44,8467 | 44,8833 | 44,8833 | 44,905 | 44,9183 | 44,9283 |
| S _D , мм | | 0,04761 | 0,03882 | 0,0383 | 0,02429 | 0,02317 | 0,02317 |
| d, мм | | 20,9 | 20,9083 | 20,9167 | 20,9083 | 20,9167 | 20,925 |
| S _d , мм | | 3,90E-15 | 0,02041 | 0,02582 | 0,02041 | 0,02582 | 0,02739 |
| h, мм | | 5,02833 | 5,03667 | 5,03333 | 5,02 | 5,015 | 5,02833 |
| S _h , мм | | 0,01941 | 0,02944 | 0,03077 | 0,01897 | 0,01643 | 0,02137 |
| m, г | | 13,0706 | 13,0542 | 13,0801 | 13,0126 | 13,0091 | 13,0319 |
| S _m , г | | 0,01627 | 0,05773 | 0,05373 | 0,04362 | 0,0377 | 0,04239 |

| Наполнитель | | Хризотил коротковолокнистый Марка 7R (Температура нагрева пресса 125-115°C) | | | Хризотил коротковолокнистый Марка 7R (Температура нагрева пресса 140-125°C) | | |
|---------------------|--------|--|---------|---------|--|---------|---------|
| | | Время выдержки в пресс-форме | | | Время выдержки в пресс-форме | | |
| Параметры | | 4 мин. | 5 мин. | 6 мин. | 4 мин. | 5 мин. | 6 мин. |
| \overline{HB} | верхн. | 32,7792 | 32,7991 | 32,9218 | 35,1053 | 35,6019 | 38,0312 |
| | нижн. | 31,6441 | 32,3563 | 32,6851 | 35,5693 | 36,0512 | 36,6756 |
| S_{HB} | верхн. | 0,36874 | 0,08742 | 0,62769 | 0,82993 | 0,39473 | 1,47012 |
| | нижн. | 0,75457 | 0,54109 | 0,39536 | 2,63931 | 1,4542 | 0,32189 |
| D, мм | | 44,8667 | 44,8733 | 44,8883 | 44,9283 | 44,9217 | 44,9317 |
| S _D , мм | | 0,03011 | 0,04676 | 0,03545 | 0,02787 | 0,03061 | 0,01602 |
| d, мм | | 20,9167 | 20,8917 | 20,9167 | 20,9167 | 20,9167 | 20,9333 |
| S _d , мм | | 0,02582 | 0,02041 | 0,02582 | 0,02582 | 0,02582 | 0,02582 |
| h, мм | | 5,01667 | 5,02833 | 5,02833 | 5,04667 | 5,04333 | 5,03 |
| S _h , мм | | 0,03011 | 0,03061 | 0,03251 | 0,02338 | 0,02658 | 0,02828 |
| m, г | | 13,0506 | 13,0542 | 13,0801 | 13,0126 | 13,0091 | 12,9902 |
| S _m , г | | 0,05404 | 0,05773 | 0,05373 | 0,04362 | 0,0377 | 0,06507 |

Усредненные значения полученных результатов измерений с учетом уровня варьирования факторов, приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Экспериментальные значения характеристик

| № | X ₁ | X ₂ | X ₃ | HB | D, мм | d, мм | h, мм | m, г. |
|---|----------------|----------------|----------------|--------|--------|--------|-------|--------|
| 1 | -1 | -1 | -1 | 28,68 | 45,113 | 21 | 5,02 | 13,124 |
| 2 | +1 | -1 | -1 | 32,165 | 45,073 | 21 | 5,083 | 13,237 |
| 3 | -1 | +1 | -1 | 28,673 | 44,998 | 20,95 | 5,037 | 13,111 |
| 4 | +1 | +1 | -1 | 35,127 | 45,045 | 20,9 | 5,027 | 13,116 |
| 5 | -1 | -1 | +1 | 32,21 | 44,87 | 20,92 | 5,017 | 13,05 |
| 6 | +1 | -1 | +1 | 35,337 | 44,93 | 20,917 | 5,047 | 13,013 |
| 7 | -1 | +1 | +1 | 32,803 | 44,89 | 20,917 | 5,028 | 13,08 |
| 8 | +1 | +1 | +1 | 37,353 | 44,93 | 20,933 | 5,03 | 12,99 |

Где X₁, X₂, X₃ – уровни варьирования факторов по табл. 3.1.

Математическое моделирование характеристик

На основе предварительных исследований и анализа изменения параметров деталей (твердости HB, величины внешнего диаметра D, величины внутреннего

диаметра d , толщины деталей h и массы m) от изменения влияющих факторов в качестве математической модели принимаем зависимость [84, 88]:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_{12} x_1 x_2 + a_{23} x_2 x_3 + a_{13} x_1 x_3 \quad (3.4)$$

где a_0, a_1, a_2, a_3 - коэффициенты регрессии;

x_0, x_1, x_2, x_3 - кодированные переменные.

Расчетные значения коэффициентов регрессии:

$$a_0 = \frac{1}{m} \sum y_i \quad (3.5)$$

$$a_1 = \frac{1}{m} \sum x_{1i} y_i \quad (3.6)$$

$$a_2 = \frac{1}{m} \sum x_{2i} y_i \quad (3.7)$$

$$a_3 = \frac{1}{m} \sum x_{3i} y_i \quad (3.8)$$

Анализ результатов экспериментальных исследований и опыт производства показывают, что температура нагревания пресса (t) и время выдержки в форме (T_ϕ) коррелированы между собой. Коэффициент взаимного влияния выражается формулой:

$$a_{12} = \frac{1}{m} \sum x_{1i} x_{2i} y_i \quad (3.9)$$

В ходе априорного анализа сделан вывод, что коэффициенты, определяющие взаимное влияние факторов температуры нагревания пресса (t) и времени выдержки после прессования (T_B), время выдержки в форме (T_ϕ) и времени выдержки после прессования (T_B) не коррелированы между собой, следовательно, для данного исследования принимаем:

$$a_{23} = \frac{1}{m} \sum x_{2i} x_{3i} y_i = 0 ; \quad a_{13} = \frac{1}{m} \sum x_{1i} x_{3i} y_i = 0$$

По результатам эксперимента тип 2^3 с вариацией трех факторов на двух уровнях в кодированном виде получены искомые зависимости характеристик:

$$HB = 32,8 + 2,207 x_1 + 0,6955 x_2 + 1,632 x_3 + 0,549 x_1 \cdot x_2 \quad (3.10)$$

$$D = 44,981 + 0,0134 x_1 - 0,0154 x_2 - 0,0761 x_3 + 0,0084 x_1 \cdot x_2 \quad (3.11)$$

$$d = 20,942 - 0,0046 x_1 - 0,017 x_2 - 0,0204 x_3 - 0,0039 x_1 \cdot x_2 \quad (3.12)$$

$$h = 5,036 + 0,011 x_1 - 0,0056 x_2 - 0,0056 x_3 - 0,01263 x_1 \cdot x_2 \quad (3.13)$$

$$m = 13,09 - 0,0011 x_1 - 0,016 x_2 - 0,057 x_3 - 0,02 x_1 \cdot x_2 \quad (3.14)$$

По формулам 3.1-3.3 переходим от кодированных значений математических моделей 3.10-3.14 к натуральным:

$$HB = 38,645 - 0,0895 t - 10,834 T_\phi + 0,12 T_B + 0,0915 t \cdot T_\phi \quad (3.15)$$

$$D = 45,751 - 0,0048 t - 0,1918 T_\phi - 0,0054 T_B + 0,0014 t \cdot T_\phi \quad (3.16)$$

$$d = 20,7391 + 0,00245 t + 0,0819 T_\phi - 0,0015 T_B - 0,00065 t \cdot T_\phi \quad (3.17)$$

$$h = 3,5168 + 0,0123 t + 0,259 T_\phi - 0,0004 T_B - 0,0021 t \cdot T_\phi \quad (3.18)$$

$$m = 11,3353 + 0,0165 t + 0,404 T_\phi - 0,014 T_B - 0,0033 t \cdot T_\phi \quad (3.19)$$

По полученным формулам математических моделей и экспериментальным значениям характеристик построены графики, приведенные на рис. 3.2-3.6.

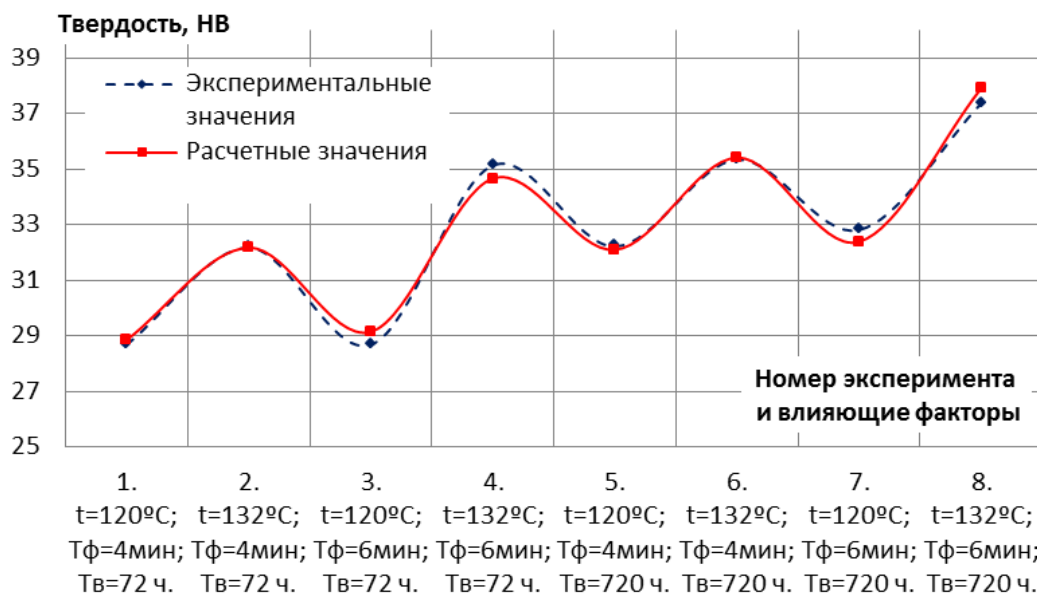


Рис. 3.2. Графики экспериментальных и расчетных значений для твердости HB

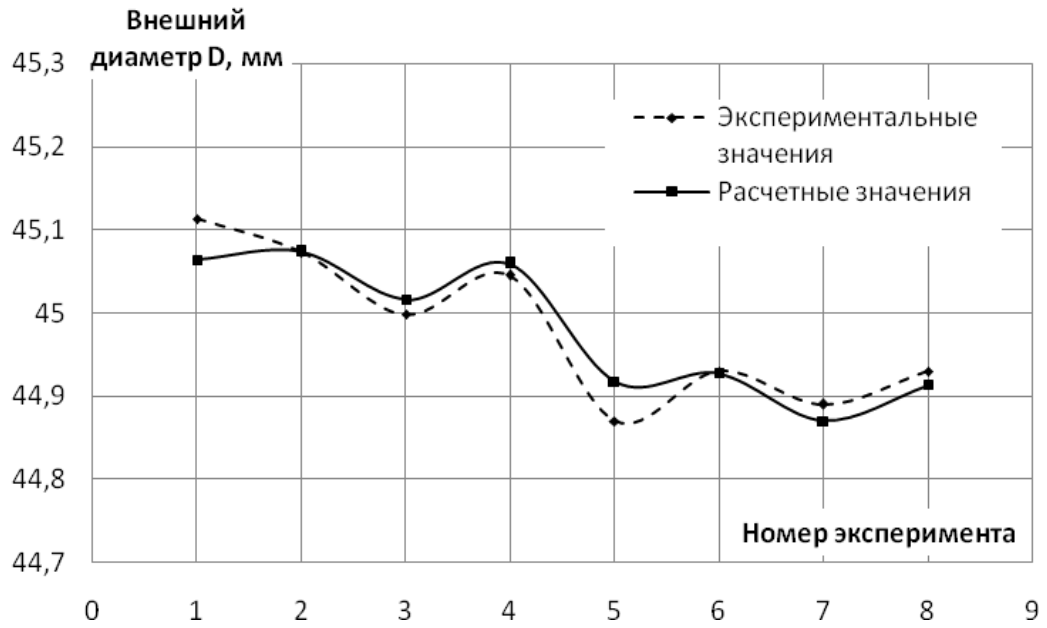


Рис. 3.3. Графики экспериментальных и расчетных значений для внешнего диаметра D

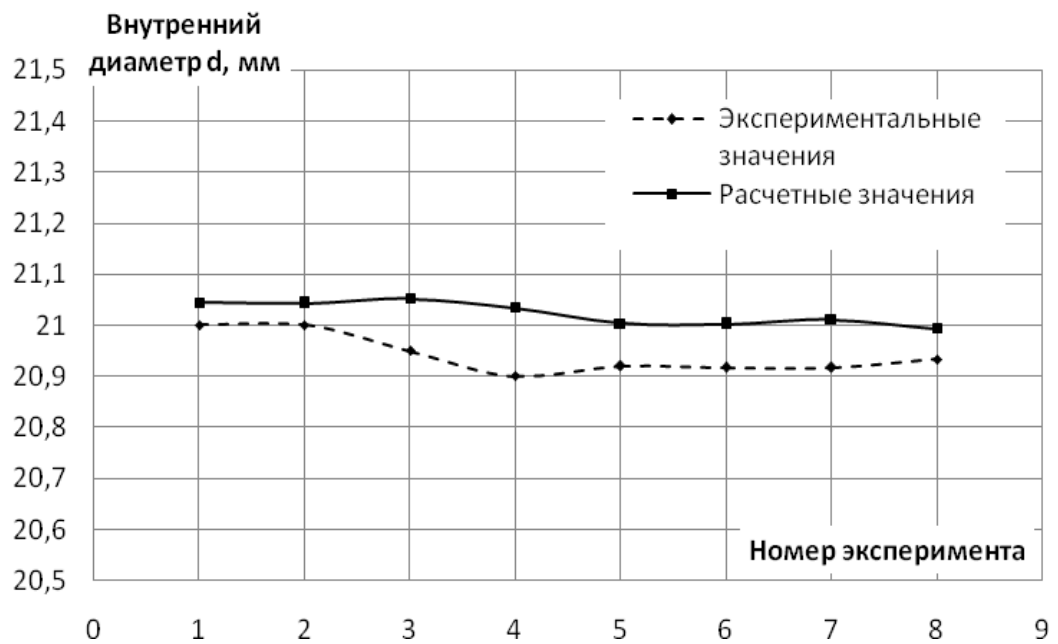
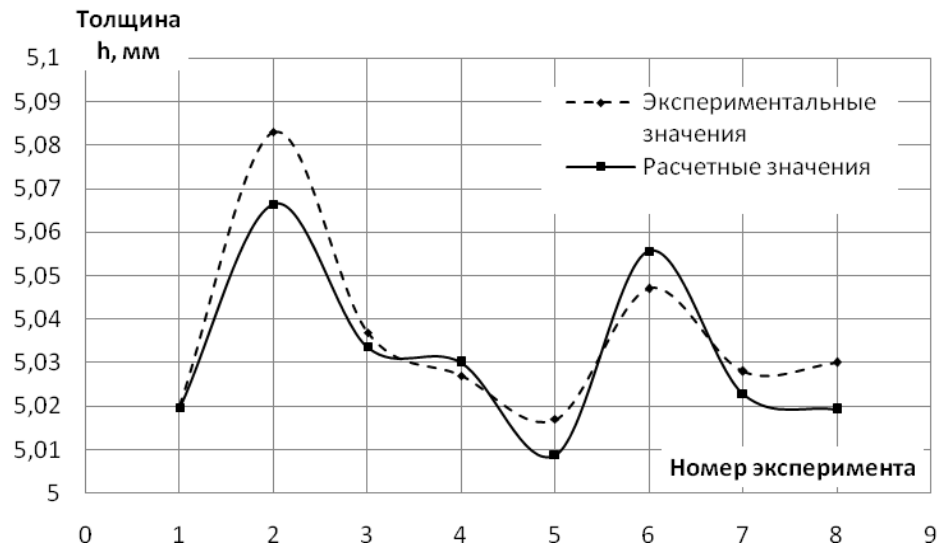
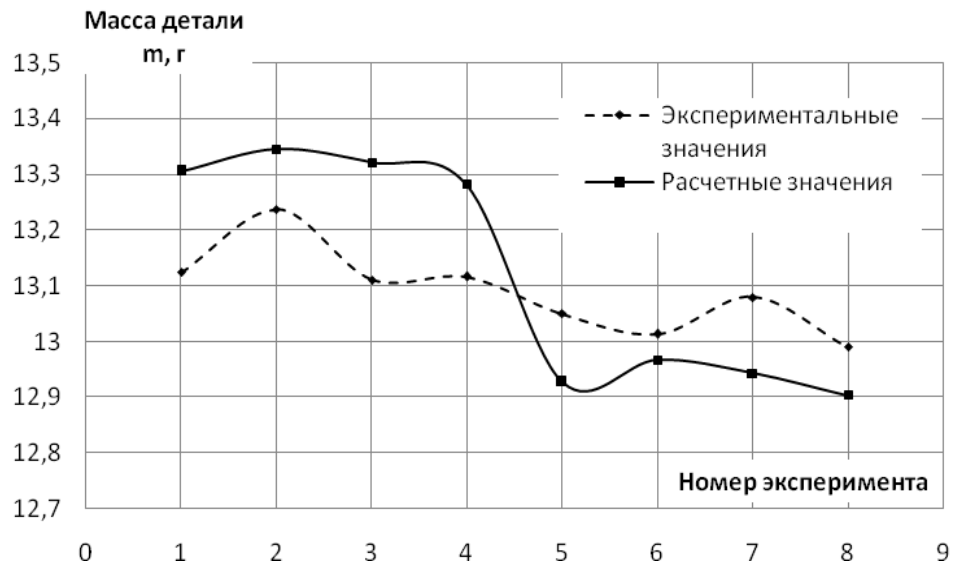


Рис. 3.4 Графики экспериментальных и расчетных значений для внутреннего диаметра d

Рис. 3.5. Графики экспериментальных и расчетных значений толщины h Рис. 3.6. Графики экспериментальных и расчетных значений массы деталей m

Кривые расчетных и экспериментальных зависимостей твердости и линейных размеров изделия от соответствующего сочетания значений влияющих факторов показывают хорошую сходимость. Небольшие расхождения могут быть вызваны погрешностями измерений и другими случайными факторами, которые оказывают несущественное влияние на параметры изделия. Вид кривых модели и результатов эксперимента для массы показывает существенное расхождение, но это определяется малой ценой деления по оси ординат.

3.3. Проверка модели на воспроизводимость и адекватность

Полученные экспериментальные данные необходимо проверить на воспроизводимость результатов измерений с заданной доверительной вероятностью [84, 86]. Для оценки воспроизводимости был использован критерий Кохрена (расчетный):

$$G_p = \frac{\max D_i}{\sum_i D_i}, \quad (3.20)$$

где D_i – наибольшее значение дисперсий из числа рассматриваемых параллельных серий m , $\sum_i D_i$ – сумма дисперсий m серий. Опыты считают воспроизводимыми при соблюдении условия

$$G_p \leq G_T \quad (3.21)$$

Здесь G_T – табличное значение критерия Кохрена при доверительной вероятности $P = 0,95$, в зависимости от числа параллельных серий m и числа степеней свободы $q = n-1$.

Расчетные значения критерия Кохрена (табл. 3.6) получены по формуле (3.20) на основании данных характеристик 8 партий деталей по 6 штук в каждой исходя из значений средних квадратических отклонений: $S_{HB}, S_D, S_d, S_h, S_m$.

Таблица 3.6

Расчетные и теоретические значения критерия Кохрена

| | HB | $D, мм$ | $d, мм$ | $h, мм$ | $m, г.$ |
|-------|----------|---------|----------|----------|----------|
| G_p | 0,261613 | 0,3372 | 0,328407 | 0,243902 | 0,244768 |
| G_T | 0,397 | 0,507 | 0,36 | 0,36 | 0,36 |

В табл. 3.6 приведены значения критерия Кохрена, поскольку расчетные значения не превышают табличных, гипотеза об однородности дисперсий характеристик принимается. Значения считаются воспроизводимыми с вероятностью $P=0,95$.

В ходе проведения эксперимента необходимо также проверить соответствие экспериментальных данных теоретическим. Проверку адекватности математиче-

ской зависимости осуществляем для наиболее важного параметра – твердости НВ. Для проверки гипотезы об адекватности при соответствующем объеме выборки использовали F-критерий Фишера:

$$F = \frac{S^2_{ад.}}{S^2_{воспр.}}, \quad (3.22)$$

где $S^2_{ад.}$ – дисперсия адекватности:

$$S^2_{ад.} = \frac{1}{f} \sum_1^n (x_{i_э} - x_{i_р})^2; \quad (3.23)$$

$S^2_{воспр.}$ – дисперсия воспроизводимости:

$$S^2_{воспр.} = \frac{\sum D_i}{m} = \frac{1}{mn} \sum_1^m (x_i - \bar{x})^2. \quad (3.24)$$

Значения НВ, необходимые для расчета $S^2_{ад}$ приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Значения для определения $S^2_{ад}$

| № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---------------------|---------|----------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|
| НВ _{эсп.} | 28,68 | 32,165 | 28,673 | 35,127 | 32,21 | 35,337 | 32,803 | 37,353 |
| НВ _{расч.} | 28,849 | 32,167 | 29,141 | 34,655 | 32,089 | 35,407 | 32,381 | 37,895 |
| ΔHB^2 | 0,02856 | 0,000004 | 0,21902 | 0,22278 | 0,01464 | 0,0049 | 0,17808 | 0,29376 |

По значениям дисперсий, полученным по формуле (3.15) и экспериментальным значениям (табл.3.2) определяем квадраты разностей величин ΔHB^2 . Сумма квадратов разностей равна: $\Sigma \Delta HB^2 = 0,961762$. Число степеней свободы $f = m - b = 8 - 4 = 4$, поскольку число степеней свободы для дисперсии адекватности равно числу различных опытов, результаты которых используются при подсчете коэффициентов регрессии, минус число определяемых коэффициентов. По полученным значениям таблицы 3.4 и уравнению (3.23) получено значение дисперсии адекватности: $S^2_{ад} = 0,24$

Для определения значения $S^2_{воспр.}$ использованы средние квадратические отклонения значений НВ в 8 партиях деталей по усредненным данным 6 деталей в каждой партии. Полученные значения дисперсий приведены в таблице 3.8.

Значения для определения $S^2_{воспр.}$

| № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | $\Sigma D_{НВ \text{ эксп.}}$ |
|------------------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------------------|
| $D_{НВ \text{ эксп.}}$ | 0,249 | 1,07 | 0,236 | 1,012 | 0,353 | 3,827 | 0,275 | 1,132 | 8,154 |

По формуле (3.24) определяем дисперсию воспроизводимости

$$S^2_{воспр.} = \frac{\sum D_{НВ \text{ эксп.}}}{m} = \frac{8,154}{8} = 1,02$$

где m – число различных опытов.

По полученным значениям дисперсии адекватности и дисперсии воспроизводимости по формуле (3.22) рассчитываем величину критерия Фишера F :

$$F_p = \frac{S^2_{ад.}}{S^2_{воспр.}} = \frac{0,24}{1,02} = 0,235$$

Табличное значение критерия Фишера F при вероятности $P = 0,95$ и соответствующем уровне значимости составляет [84]: $F_T = 3,8$.

Полученная математическая зависимость считается адекватной если:

$$F_p \leq F_T \quad (3.25)$$

Соотношение расчетного и табличного значений критерия Фишера соответствует условию (3.25), следовательно, полученную математическую зависимость для величины твердости НВ можно считать адекватной с вероятности $P=0,95$.

3.4 Определение границ регулирования и экспериментальная проверка математической модели

По установленным теоретическим зависимостям были определены возможные изменения значений влияющих факторов, обеспечивающие значения требования к параметрам деталей в заданных пределах (28-32 НВ). Для этого по уравнению (3.15) были рассчитаны значения твердости при граничных значениях влияющих факторов, которые приведены в табл. 3.9.

Таблица 3.9.

Расчетные значения твердости

| Значения твердости <i>НВ</i> | | | | | |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|
| T_{ϕ} , мин. t , °C | 3 | 3,5 | 4 | 4,5 | 5 |
| 115 | 27,4 | 27,3 | 27,1 | 26,9 | 26,8 |
| 120 | 28,3 | 28,4 | 28,5 | 28,6 | 28,6 |
| 125 | 29,2 | 29,6 | 29,9 | 30,2 | 30,5 |
| 130 | 30,2 | 30,7 | 31,3 | 31,8 | 32,3 |
| 135 | 31,1 | 31,9 | 32,6 | 33,4 | 34,2 |

Из значений таблицы 3.9 видно, что температуры нагрева 115 и 135 °C пресс-формы не обеспечивает заданных значений твердости. Следовательно, температура нагрева пресс-формы может варьироваться в пределах 120-130 °C, а температура выдержки в прессе от 3 до 5 мин. При этом режим выдержки в пресс-форме в течение 5 мин. при температуре 130 °C не следует использовать.

В соответствии с принятыми по табл. 3.9 значениями влияющих факторов получены экспериментальные значения, которые приведены в табл. 3.10.

Результаты экспериментов, приведенные в табл. 3.10, показывают, что установленные значения влияющих факторов обеспечивают заданные требования.

Таблица 3.10.

Экспериментальные значения твердости

| Значения твердости <i>НВ</i> | | | |
|-------------------------------|------|------|------|
| T_{ϕ} , мин. t , °C | 3 | 4 | 5 |
| 120 | 28,9 | 29,0 | 29,3 |
| 125 | 29,4 | 30,1 | 30,2 |
| 130 | 30,5 | 31,5 | 32,3 |

Значения твердости, полученные экспериментально, укладываются в предельные значения, определенные расчетным путем.

По математической модели для НВ (уравнению (3.15) и по экспериментальным значениям табл. 3.10 построены графики зависимостей твердости (рис. 3.7) при варьировании температуры прессования (t) и времени выдержки в пресс-форме (T_{ϕ}).

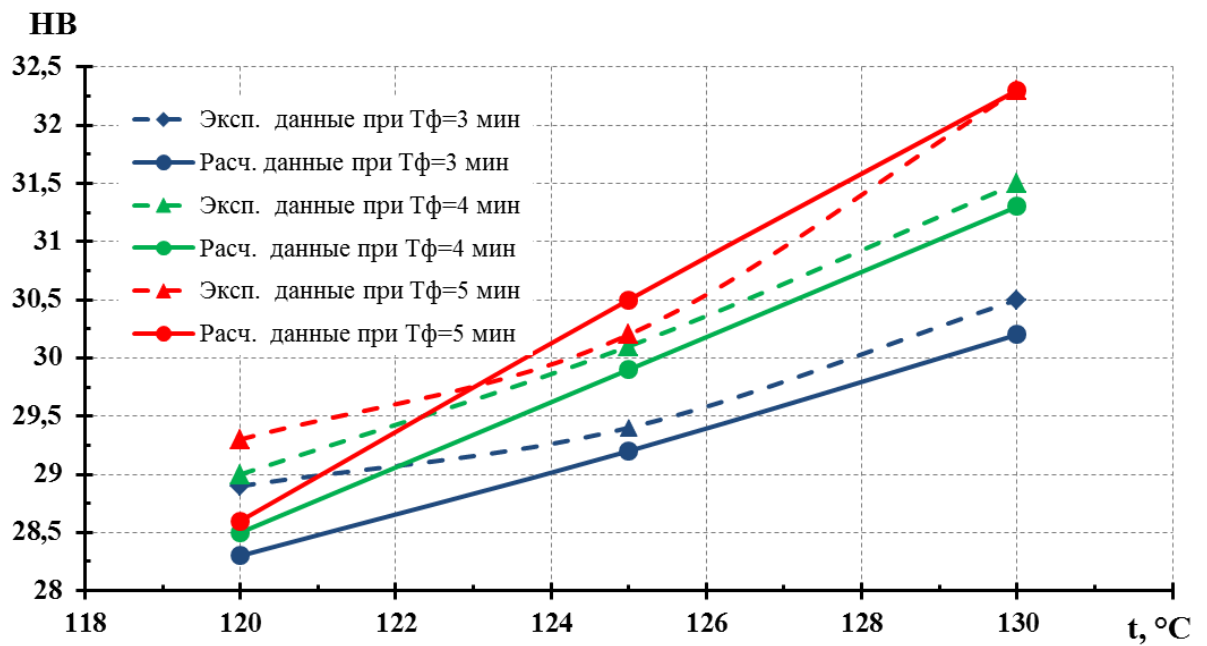


Рис. 3.7. Графики зависимостей расчетных и экспериментальных значений для твердости НВ

Значения твердости, полученные экспериментально, соответствуют предельным значениям, определенным расчетным путем.

Выводы по главе 3

1. Установлены возможные значения регулируемых факторов: температура нагревания прессы 120...132 °С, время выдержки в пресс-форме от 4 до 6 мин. и время выдержки после прессования от 3 до 30 дней.
2. По результатам выполнения полного факторного эксперимента получены аналитические зависимости для характеристик деталей из композиционного материала: твердости HB , величины внешнего диаметра D , величины внутреннего диаметра d , толщины деталей h и массы m .
3. Установлена достоверность экспериментальной зависимости проверкой по критерию Кохрена и соответствие экспериментальных данных выбранной математической модели по критерию Фишера.
4. Экспериментальная проверка изменения значений влияющих факторов в установленных границах показывает, что их регулирование в установленных пределах обеспечивает заданные требования параметров изделия.

Глава 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ ТВЕРДОСТИ И УСТАНОВКИ ДЛЯ ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ

4.1 Определение величины производственного допуска и разработка методики контроля твердости деталей

Особенностью данного композиционного материала является то, что твердость с течением времени увеличивается. По экспериментальным данным для разных условий прессования через 30 дней твердость увеличивается на 2,2...4,1 НВ. По теоретической зависимости для принятой совокупности факторов изменение (увеличение) твердости составило 1,32 НВ и 3,24 НВ соответственно для периодов 14 и 30 дней, что было учтено при разработке методики определения производственного допуска на твердость. На рис. 4.1 показаны зависимости изменения твердости от времени выдержки в пресс-форме соответственно при выдержке после прессования 14 и 30 дней.

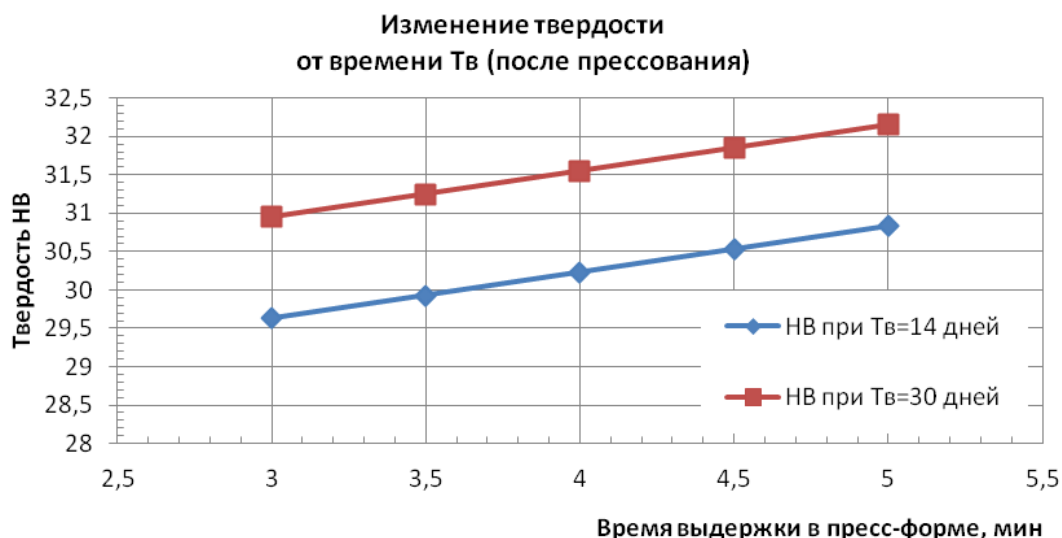


Рис.4.1 Графики расчетных значений для твердости НВ
(от времени выдержки после прессования)

Таким образом, при разработке методики контроля твердости материала на основе ГОСТ 9012 следует учитывать особенности материала по фрикционным свойствам и величину производственного допуска.

Аппроксимация зависимости твердости, полученной при температуре нагрева 115...125 °С и времени выдержки в пресс-форме 5 мин, от времени выдержки после прессования:

$$HV = 26,3 + 1,86 \cdot \ln T_v, \quad (4.1)$$

При этом значение достоверности аппроксимации $R^2 = 0,99$.

Закономерность изменения твердости после прессования в зависимости от времени показана на графике рис. 4.2.

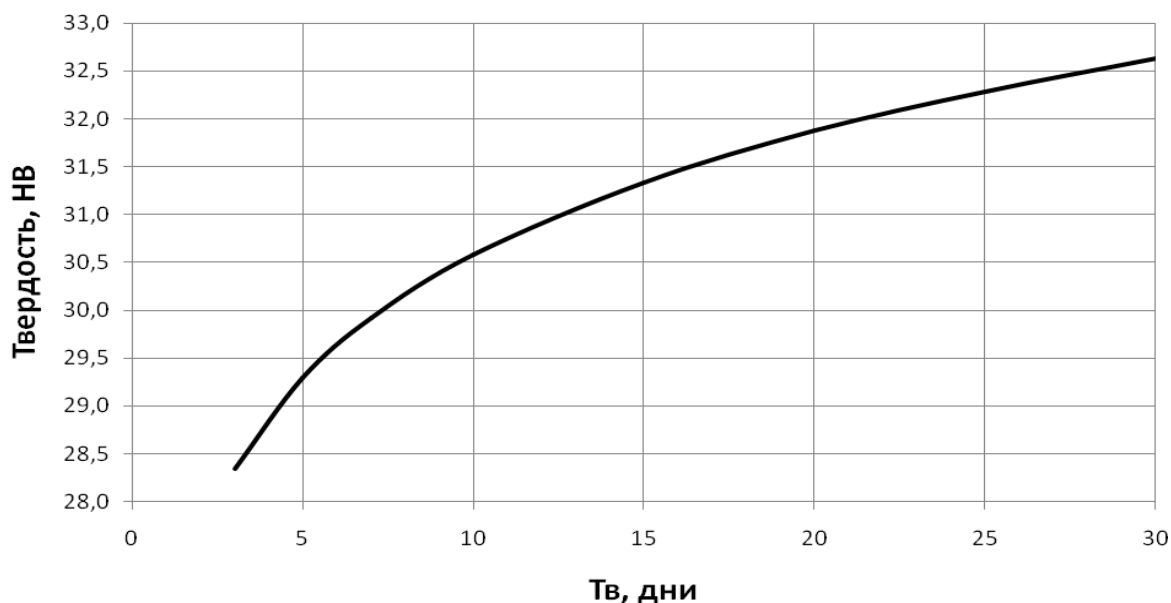


Рис. 4.2 Зависимость изменения твердости от времени выдержки после прессования

Значения твердости, рассчитанные для указанных периодов времени выдержки после прессования по теоретической зависимости (3.4) и полученные экспериментально при температуре нагрева пресс-формы

$t = 115...125$ °С и времени выдержки в пресс-форме $T_{ф} = 5$ мин, приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Сравнение значений твердости, полученных экспериментально и расчетом

| Время выдержки после прессования | Значение твердости HV, полученное | |
|----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| | экспериментально | расчетом по формуле (1) |
| T_v , дни | 3 | 28,343 |
| | 7 | 29,919 |
| | 30 | 32,626 |

Сравнение результатов, полученных расчетом и экспериментально, показывает, что математическую модель (4.1) можно использовать для введения поправки на предельные значения данного параметра при его контроле после прессования через три дня.

Таким образом, учитывая увеличение твердости с течением времени по зависимости (4.1), полученной на основе экспериментальных исследований, при контроле деталей после прессования предельные значения параметра следует уменьшить на 3 НВ, то есть через три дня после прессования значение твердости должно быть в пределах 25...29 НВ.

Следующей особенностью контроля твердости является то, что после ее измерения детали становятся не пригодными к применению, поэтому подвергать их сплошному контролю не представляется возможным. На основе выполненных исследований разработана методика выборочного контроля, которая предполагает проводить измерения на 2% заготовок от партии, но не менее чем на трех заготовках.

На основе полученных результатов диссертационного исследования, на разработанную методику контроля твердости полимерных композиционных материалов получен акт апробации на ОАО «Наномет» Приложение Б и акт о внедрении в учебный процесс Приложение В.

4.2 Разработка и создание установки для анализа фрикционных свойств материалов

При анализе комплекса свойств разрабатываемого композиционного материала, сделан вывод о необходимости анализа коэффициента трения материала как во взаимосвязи с твердостью, так и непосредственно – при приемо-сдаточных испытаниях.

Определение коэффициента трения [30] для различных изделий является актуальным и для его реализации используются различные специальные установки.

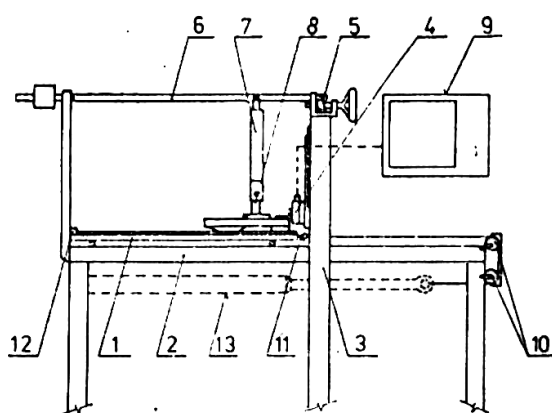


Рис. 4.3. Схема испытательного стенда по Чешскому стандарту ЧСН 74 4507

Установка №1 (рис 4.3) состоит из подвижной платформы (1) на которой размещается исследуемый образец. Сверху на образец с помощью стержня нагрузки (7) прикладывается нормальная сила F_n . После чего гидравлический цилиндр (13) через систему блоков (10) тросом тянет платформу с необходимой скоростью.

Регистрирующим устройством (9) и динамометром снимают показания нормальной силы и силы трения. Данная установка позволяет определить статический и динамический коэффициенты трения скольжения, но исследовать образцы на износ невозможно.

Относительна погрешность косвенного измерения коэффициента трения будет равна $\delta_{\mu} = \delta_{F_T} + \delta_{F_n} = 0,5\% + 0,1\% = 0,6\%$

Также коэффициент трения определяется для следующего испытательного стенда с использованием разрывной машины:

При проведении испытаний на стенде исследуемый образец 8 размещается на расположенной горизонтально платформе испытательного стенда таким образом, чтобы он упирался в неподвижное упорное ребро 3а.

Подвижная грузовая платформа 6 с прикреплённым на ней образцом 8 устанавливается на контртело 1 так, чтобы её продольная ось совпадала с направлением скольжения, и затем загружается прижимающим грузом 9 определенной массы. К платформе закрепляется трос 10, который через систему блоков 11 подсоединяется к измерительной части разрывной машины 12.

Относительная погрешность измерения коэффициента трения этого стенда равна:

$$\delta_{\mu} = \delta_m + \delta_{F_H} = 0,3\% + 1\% = 1,4\% .$$

Все рассмотренные установки конструктивно просты в исполнении, но в то же время имеют ряд недостатков. На установках №1 и №2 можно измерять только большие усилия, так как в одном из них используется гидроцилиндр, а в другом разрывная машина. В результате этого относительная погрешность измерения коэффициента трения составляет от 0,6 до 1,4% соответственно. Кроме этого, все рассмотренные выше установки не дают возможности проводить испытания образцов на износ.

Известен стенд для определения коэффициента трения (патент РФ 49266, МПК G01N19/02, 2005), содержащий станину, два цилиндра со сменными ободами и два цилиндрических прямозубых колеса, которые установлены на горизонтальных валах кинематически связанных между собой двумя промежуточными зубчатыми колесами. Недостатки стенда заключаются в том, что контакт образца с контртелом происходит по образующим цилиндров, коэффициент трения скольжения определяется с большой погрешностью (по периодам колебаний бруса) и нельзя проводить испытания на износ.

Также известна установка (патент РФ 2340886, МПК G01N19/02, 2007), содержащая образец, расположенный на исследуемой поверхности и закрепленный

в каретке, которая жестко соединена с горизонтальным поводком. Второй конец поводка шарнирно соединен с рамой, причем масса поводка значительно меньше массы образца с кареткой, Исследуемая поверхность выполнена в виде цилиндра, жестко соединенного со шкивом равного радиуса, при этом нить с грузом намотана на шкив. Недостатком данного устройства является низкая точность полученных результатов, так как в них не учтены инерционные и фрикционные характеристики шкива. Кроме этого установка не дает возможности проводить испытания образцов на износ.

При анализе и разработке за прототип принята установка М-22П, содержащая корпус, привод, на валу которого установлено контртело в виде диска, суппорт со стержнем, каретка с упором, датчик линейных перемещений, самопишущий прибор (рис.4.4) по ГОСТ 26614-85

«Материалы антифрикционные порошковые. Метод определения триботехнических свойств». В данном стандарте устанавливается метод испытаний антифрикционных порошковых материалов с целью оценки их триботехнических свойств при трении с ограниченной подачей смазки.

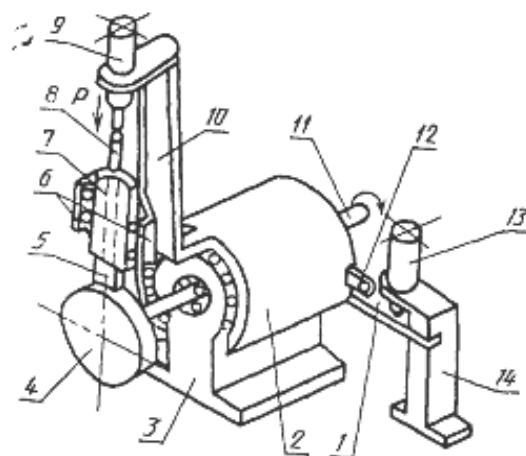


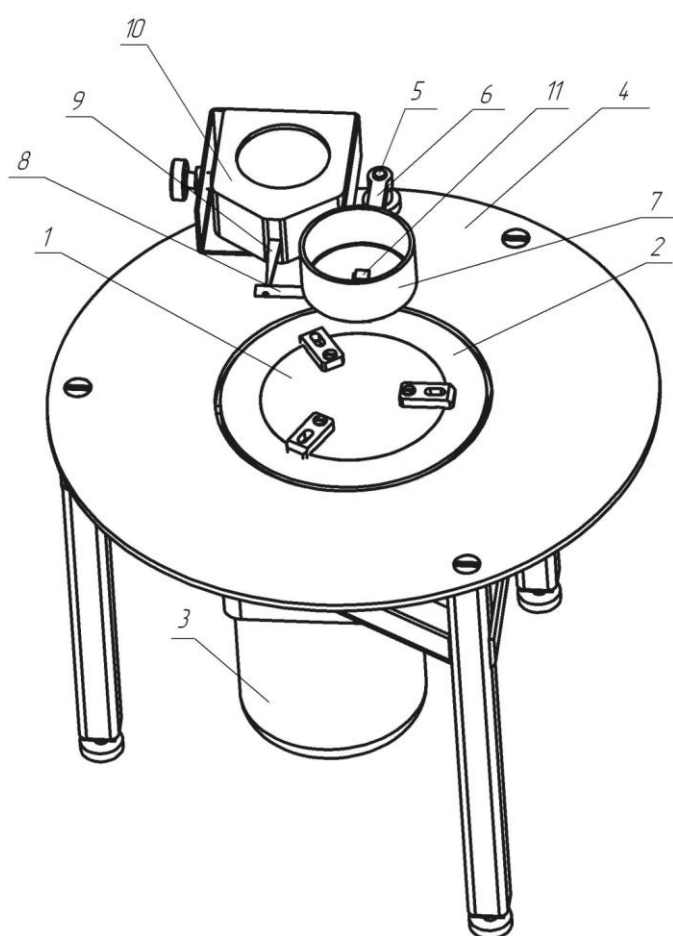
Рис. 4.4 Схема узла трения машины М-22П

Сущность метода заключается в определении зависимости износа и силы трения сопряженных поверхностей образца материала и контробразца от скорости скольжения и силы нагружения, вычислении их интенсивности изнашивания и коэффициента трения. Основным недостатком установки является ее сложность и неудобство использования.

Существующие средства определения коэффициента трения используются только для исследований, имеют сложные конструкции и неудобны для применения в процессах контроля. Следовательно, необходимо разработать установку для

анализа фрикционных свойств материала, которая позволит в производственных и лабораторных условиях контролировать коэффициент трения.

В ходе анализа разработана установка, предназначенная для исследования и анализа фрикционных свойств образцов из металлов и композиционных материалов. Получен патент на полезную модель «Установка для исследования антифрикционных свойств материалов» (заявка на патент № 2010120327, приоритет 20.05.2010) [106]. Которая позволяет в производственных и лабораторных условиях контролировать коэффициент трения материалов.



Установка состоит из рамы, на которой закреплен мотор-редуктор, приводящий во вращательное движение горизонтальный диск с установленным на нем конгртелом в виде кольца. Образец прижимается к конгртелу грузом известной массы. Усилие трения определяется динамометром часового типа.

Рис. 4.5 Проект общего вида установки

На рис. 4.5 изображен проект общего вида установки для исследования фрикционных свойств материалов. На установке представлен диск 1 и жестко закрепленное на нем конгртело 2, сам диск 1 установлен на валу электродвигателя 3. Рабочая поверхность стола 4 содержит закрепленную на ней ось 5, с установленным кронштейном 6 и держателем 7. Кронштейн может поворачиваться вокруг оси 5. Держатель 7 соединен с измерительным наконечником 9 посредством тяги 8 граммометра 10.

Анализируемый образец 11 свободно помещается в отверстие держателя 7 и поджимается к контртелу 2 гирей заданной массы, при этом создается нормальное усилие (F_N). Включением электродвигателя 3 диск 1 с контртелом 2 начинает

вращение. Сила трения перемещает анализируемый образец 11, (в держателе 7 с прикрепленной к нему тягой 8), идет воздействие на измерительный наконечник 9 граммометра 10.



Рис. 4.6 Общий вид установки

На рис. 4.6 представлена усовершенствованная установка, более удобная для определения коэффициента трения материалов

Данная установка позволяет «экспресс-методом» определять силу трения композиционных материалов по ответной поверхности, что позволяет выполнять выходной контроль качества деталей по коэффициенту трения материала.

Таблица 4.2

Основные метрологические и технические характеристики

| № п/п | Основные характеристики | Единица измерения | Величина |
|-------|--|-------------------|-------------------|
| 1 | Диапазон регулирования прижимающей нагрузки на образец | Ньютон, кгс | 2,0-15 0,2-1,5 |
| 2 | Рабочее сечение образца длина | мм×мм мм | 4×4 6-10 |
| 3 | Диапазон измерения силы трения | Ньютон | 0,2 – 2,88 |
| 4 | Линейная скорость движения контртела по средней линии контакта с образцом | м/сек | 0,1 – 0,5 |
| 5 | Максимальное биение плоскости диска относительно корпуса по средней линии контакта контртела и образца | мм | 0,05 – 0,1 |

Созданная установка проста в конструкции, удобна в эксплуатации и обеспечивает высокую точность измерения силы трения. Для разработанной установки были выполнены исследования ее характеристик (п.4.3).

4.3. Определение характеристик погрешности установки для определения коэффициента трения

По разработанной методике выполнялись последовательно по 5 циклов измерений различных мер масс (грузов) при заданной относительной скорости испытываемого материала v . Записывая результаты измерения силы трения при увеличении массы в нечетную строку таблицы отчета, а при уменьшении – в четную.

Далее, определялись статистические оценки характеристик погрешности в каждой точке измерения в соответствии с рекомендациями ГОСТ 8.009-84 "ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. Оценка систематической погрешности определяется по выражению (4.2):

$$\tilde{\Delta}_{SH} = \frac{\overline{F'} + \overline{F''}}{2}, \quad (4.2)$$

$$\text{где } \overline{F'} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F'_i \text{ и } \overline{F''} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F''_i,$$

где F'_i и F''_i – i -е отсчеты погрешностей, полученные экспериментально при изменении входного сигнала со стороны меньших (для F'_i) и больших (для F''_i) значений до значений x ,

n – число реализаций в двух направлениях.

Оценка вариации $\tilde{H} = \left| \overline{F'_1} - \overline{F'_2} \right|$ или $\tilde{H} = \left| \overline{F''_1} - \overline{F''_2} \right|$ при $n = 1$.

Оценка среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности средства измерения с вариацией (4.3):

$$\tilde{\sigma} \left[\overset{\circ}{\Delta}_H \right] = \sqrt{\frac{1}{2n-1} \left[\sum_{i=1}^n (F'_i - \overline{F'})^2 + \sum_{i=1}^n (F''_i - \overline{F''})^2 \right]}, \quad (4.3)$$

Результаты обработки данных приведены в (табл.4.3).

Статистическая оценка характеристик установки

| Относительная скорость, м/с | 0,114 (индикация 400) | | | 0,228 (индикация 800) | | | 0,338 (индикация 1200) | | | |
|-----------------------------|-----------------------|----------|----------|-----------------------|----------|----------|------------------------|----------|----------|--------|
| Нагрузка, кгс | 207,6 | 407,1 | 609 | 207,6 | 407,1 | 609 | 207,6 | 407,1 | 609 | |
| Сила трения, Н | F_T' | 0,074 | 0,1005 | 0,1375 | 0,1335 | 0,184 | 0,1585 | 0,075 | 0,079 | 0,1705 |
| | F_T'' | 0,09 | 0,089 | 0,165 | 0,1205 | 0,137 | 0,1955 | 0,0975 | 0,138 | 0,108 |
| | F_T' | 0,116 | 0,0755 | 0,098 | 0,158 | 0,1405 | 0,1715 | 0,1 | 0,127 | 0,1625 |
| | F_T'' | 0,0905 | 0,088 | 0,1505 | 0,117 | 0,164 | 0,158 | 0,086 | 0,1215 | 0,163 |
| | F_T' | 0,095 | 0,0895 | 0,1655 | 0,155 | 0,161 | 0,1735 | 0,0875 | 0,0975 | 0,1575 |
| | F_T'' | 0,075 | 0,1305 | 0,11 | 0,143 | 0,154 | 0,188 | 0,05 | 0,0835 | 0,149 |
| | F_T' | 0,1285 | 0,1285 | 0,142 | 0,145 | 0,151 | 0,213 | 0,0885 | 0,13 | 0,1585 |
| | F_T'' | 0,0765 | 0,109 | 0,164 | 0,1515 | 0,1725 | 0,209 | 0,0705 | 0,0915 | 0,162 |
| | F_T' | 0,097 | 0,074 | 0,169 | 0,1465 | 0,1465 | 0,191 | 0,086 | 0,1095 | 0,168 |
| | F_T'' | 0,1185 | 0,1005 | 0,135 | 0,1285 | 0,175 | 0,1825 | 0,062 | 0,127 | 0,1405 |
| Средние значения | 0,0961 | 0,0985 | 0,14365 | 0,13985 | 0,15855 | 0,18405 | 0,0803 | 0,11045 | 0,15395 | |
| СКО | 0,019252 | 0,019587 | 0,024423 | 0,016302 | 0,015498 | 0,019027 | 0,015794 | 0,021224 | 0,018382 | |
| Коэф-т трения | 0,462909 | 0,241955 | 0,235878 | 0,673651 | 0,389462 | 0,302217 | 0,386802 | 0,271309 | 0,252791 | |

Обработка результатов испытаний установки показывает, что с увеличением нагрузки значение коэффициента трения уменьшается. В данном случае уменьшается систематическая составляющая погрешности установки. Следовательно, для определения коэффициента трения исследуемого материала можно устанавливать грузы массой 0,4 и 0,6 кг. При этом случайная составляющая погрешности измерения установки будет меньше при массе 0,4 кг на скорости относительного движения 0,23 м/с (СКО 0,0155).

4.4 Экспериментальная проверка взаимосвязи коэффициента трения и твердости разработанного композиционного материала

Результаты испытаний образцов материала на разработанной установке (рис. 4.8) для условий испытаний (при массе 0,4 кг на скорости относительного движения 0,23 м/с), обеспечивающих наименьшее значение случайной составляющей погрешности (статистический анализ установки п.4.3), экспериментальных значе-

ний коэффициента трения разработанного композиционного материала представлены в табл.4.4.

Таблица 4.4

**Экспериментальные значения коэффициента трения
разработанного композиционного материала**

| | | | | | | |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|--------|
| Относительная скорость, м/с | 0,228 (индикация 800) | | | | | |
| Твердость образца, НВ | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | |
| Нагрузка, кгс | 407,1 | 407,1 | 407,1 | 407,1 | 407,1 | |
| Сила трения, Н | $F_{T'}$ | 0,164 | 0,245 | 0,185 | 0,185 | 0,183 |
| | $F_{T''}$ | 0,147 | 0,255 | 0,1955 | 0,25 | 0,1955 |
| | $F_{T'}$ | 0,1405 | 0,225 | 0,1885 | 0,195 | 0,19 |
| | $F_{T''}$ | 0,154 | 0,178 | 0,198 | 0,186 | 0,198 |
| | $F_{T'}$ | 0,141 | 0,1935 | 0,235 | 0,1835 | 0,211 |
| | $F_{T''}$ | 0,154 | 0,198 | 0,218 | 0,188 | 0,19 |
| | $F_{T'}$ | 0,151 | 0,213 | 0,211 | 0,193 | 0,213 |
| | $F_{T''}$ | 0,143 | 0,209 | 0,209 | 0,198 | 0,189 |
| | $F_{T'}$ | 0,162 | 0,191 | 0,191 | 0,191 | 0,191 |
| | $F_{T''}$ | 0,155 | 0,225 | 0,1825 | 0,1805 | 0,183 |
| Средние значения | 0,15115 | 0,21325 | 0,20135 | 0,195 | 0,19435 | |
| СКО | 0,00826 | 0,024508 | 0,016672 | 0,020073 | 0,01041 | |
| $f_{T, \text{коэф-т трения}}$ | 0,371285 | 0,350164 | 0,330624 | 0,320197 | 0,31913 | |

Таблица 4.5

**Расчетные и экспериментальные значения коэффициента трения
разработанного композиционного материала**

| НВ | $f_{T, \text{расчетный коэф-т трения}}$ | $f_{T, \text{экспериментальный коэф-т трения}}$ |
|----|---|---|
| 27 | 0,375873 | - |
| 28 | 0,362497 | 0,371285 |
| 29 | 0,350043 | 0,350164 |
| 30 | 0,338418 | 0,330624 |
| 31 | 0,327542 | 0,320197 |
| 32 | 0,317344 | 0,31913 |
| 33 | 0,307764 | - |

По расчетам теоретической зависимости (2.30) и результатам экспериментальных данных (табл. 4.4) построена таблица 4.5 и графики теоретического и

экспериментальных значений коэффициента трения разработанного композиционного материала (рис.4.7).

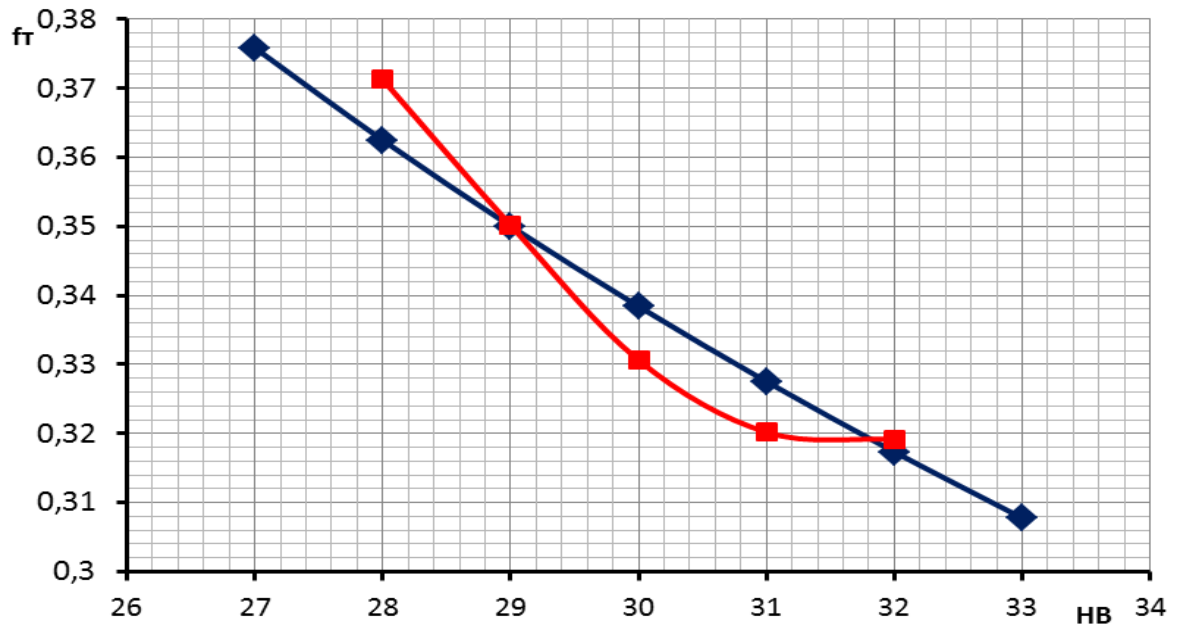


Рис. 4.7. Графики теоретической и практической взаимосвязи коэффициента трения и твердости

Как видно из рисунка графики показывают хорошую сходимость величин теоретических и практических значений коэффициентов трения и значений твердости.

4.5 Экономическая эффективность применения результатов выполненных исследований

Анализ экономической эффективности применения математической модели оптимизации является важной и неотъемлемой частью эффективного развития предприятия [74, 79, 81, 90, 119, 122].

Полученная математическая модель оптимизации была применена в производственном процессе на ОАО «Наномет». По предоставленным данным, о произведенных и забракованных деталях, рассчитан процент бракованных изделий до оптимизации процесса производства в табл. 4.6 и процент бракованных изделий после оптимизации процесса производства табл. 4.7.

Таблица 4.6

Процент бракованных изделий до оптимизации процесса производства

| Период | Предъявлено, шт. | Брак, шт. | Брак, % |
|-----------------|-------------------------|------------------|----------------|
| июн.09 | 4748 | 675 | 14,21651 |
| июл.09 | 5419 | 1043 | 19,24709 |
| авг.09 | 2957 | 262 | 8,860331 |
| сен.09 | 3504 | 280 | 7,990868 |
| окт.09 | 4538 | 782 | 17,23226 |
| ноя.09 | 4273 | 624 | 14,60332 |
| дек.09 | 4720 | 759 | 16,08051 |
| январ.10 | 4196 | 626 | 14,91897 |
| фев.10 | 2005 | 168 | 8,379052 |
| мар.10 | 5007 | 299 | 5,97164 |
| апр.10 | 2873 | 425 | 10,92545 |
| май.10 | 2873 | 211 | 7,344239 |
| июн.10 | 4124 | 886 | 21,484 |
| июл.10 | 3317 | 201 | 6,059692 |
| авг.10 | 4423 | 594 | 13,4298 |
| Всего: | 58977 | 7835 | |
| Среднее: | 3932 | 522 | 12,44958 |

Процент бракованных изделий после оптимизации процесса производства

| Период | Предъявлено, шт. | Брак, шт. | Брак, % |
|-----------------|------------------|-----------|----------|
| сен.10 | 3319 | 39 | 1,175053 |
| окт.10 | 3641 | 320 | 8,788794 |
| ноя.10 | 5324 | 311 | 5,841473 |
| дек.10 | 7898 | 155 | 1,962522 |
| январ. 2011 | 6226 | 269 | 4,320591 |
| фев.11 | 6635 | 384 | 5,787491 |
| мар.11 | 9333 | 122 | 1,30719 |
| апр.11 | 7741 | 168 | 2,170262 |
| май.11 | 7367 | 260 | 3,529252 |
| июн.11 | 4544 | 53 | 1,166373 |
| июл.11 | 5065 | 67 | 1,322804 |
| сен.11 | 6688 | 203 | 3,035287 |
| окт.11 | 6860 | 151 | 2,201166 |
| Всего: | 80641 | 2502 | |
| Среднее: | 6203 | 192 | 3,277558 |

Следовательно, применение разработанной математической модели оптимизации процесса производства изделий позволило сократить процент бракованных деталей в среднем с 12,45% до 3,28%, т.е. на 9,17% или в 3,8 раза.

Анализ затрат на производство деталей из порошкового композиционного материала.

Полная себестоимость изделия включает затраты по следующим статьям:

- сырье и материалы;
- средства на оплату труда;
- отчисления на социальное страхование;
- цеховые расходы;
- общезаводские расходы;
- прочие производственные расходы;
- внепроизводственные расходы.

Расшифровка статьи «Сырье и материалы» на 1 единицу готовой продукции представлена в табл. 4.8.

Расчет затрат на основные материалы до реализации оптимального режима

| Наименование материала | Количество, г. | Цена, руб. за кг. | Сумма, руб. |
|--------------------------|----------------|-------------------|-------------|
| Хризотил | 8,56 | 3 | 0,026 |
| Графит | 2,1 | 50 | 0,105 |
| Каолин | 3,81 | 14 | 0,053 |
| Смола СФЖ-3031 | 5,71 | 70 | 0,4 |
| Стеарат цинка | 0,2 | 100 | 0,02 |
| Спирт | 0,54 | 50 | 0,0027 |
| Итого | | | 0,6067 |
| Стоимость отходов | | | 0,012 |
| Всего | | | 0,6199 |

В расчете затрат на сырье и материалы стоимость отходов принимается в размере 2 % от стоимости материалов.

Основная зарплата производственных рабочих определяется исходя из тарифных ставок и трудоемкости программы

$$\text{ОПЗ} = \text{ТС} * \text{Т}, \text{ руб.} \quad (4.4)$$

где Т – трудоемкость технологического процесса, руб./шт.;

ТС – тарифная ставка. $T_1 = 7,7$ руб./шт.

$\text{ТС} = 3,039$.

$\text{ОПЗ}_1 = 3,039 * 7,7 = 23,4$ руб.

Дополнительная заработная плата производственных рабочих рассчитывается из расчета 10 % от основной заработной платы производственных рабочих

$$\text{ДЗП} = 0,1 * \text{ОЗП}, \text{ руб.} \quad (4.5)$$

$\text{ДЗП}_1 = 0,1 * 23,4 = 2,34$ руб.

Отчисления на социальное страхование принимаются в размере 34% от основной заработной платы производственных рабочих

$$\text{ОСС} = 0,34 * \text{ОЗП}, \text{ руб.} \quad (4.6)$$

$\text{ОСС}_1 = 0,34 * 23,4 = 7,956$ руб.

Расходы на подготовку и освоение производства принимаются в размере 5-8 % от основной заработной платы производственных рабочих

$$\text{ПОП} = 0,07 * \text{ОЗП}, \text{ руб.} \quad (4.7)$$

$$\text{ПОП}_1 = 0,07 * \text{ОЗП}_1 = 0,07 * 23,4 = 1,638 \text{ руб.}$$

Цеховые расходы принимаются в размере 120-150 % от основной заработной платы производственных рабочих

$$\text{ЦР} = 1,25 * \text{ОЗП}, \text{ руб.} \quad (4.8)$$

$$\text{ЦР}_1 = 1,25 * \text{ОЗП}_1 = 1,25 * 23,4 = 29,25 \text{ руб.}$$

Общезаводские расходы принимаются в размере 60-90 % от основной заработной платы производственных рабочих

$$\text{ОЗР} = 0,65 * \text{ОЗП}, \text{ руб.} \quad (4.9)$$

$$\text{ОЗР}_1 = 0,65 * \text{ОЗП}_1 = 0,65 * 23,4 = 15,21 \text{ руб.}$$

Прочие производственные расходы принимаются в размере 10-20 % от основной заработной платы производственных рабочих.

$$\text{ППР} = 0,15 * \text{ОЗП}, \text{ руб.} \quad (4.10)$$

$$\text{ППР}_1 = 0,15 * \text{ОЗП}_1 = 0,15 * 23,4 = 3,51 \text{ руб.}$$

Производственная себестоимость определяется как сумма всех перечисленных затрат:

$$\text{ПрС} = \text{СМ} + \text{ОЗП} + \text{ДЗП} + \text{ОСС} + \text{ПОП} + \text{ЦР} + \text{ОЗР} + \text{ППР}, \text{ руб.} \quad (4.11)$$

$$\text{ПрС}_1 = 0,6199 + 23,4 + 2,34 + 7,956 + 1,638 + 29,25 + 15,21 + 3,51 = 83,92 \text{ руб.}$$

Внепроизводственные расходы принимаются в размере 0,5-1,0 % от производственной себестоимости изделия:

$$\text{ВПр} = 0,01 * \text{ПрС}, \text{ руб.} \quad (4.12)$$

$$\text{ВПр}_1 = 0,01 * \text{ПрС}_1 = 0,01 * 83,91 = 0,8392 \text{ руб.}$$

Полная себестоимость определяется как сумма производственной себестоимости и внепроизводственных затрат:

$$\text{ПС} = \text{ПрС} + \text{ВПр}, \text{ руб.} \quad (4.13)$$

$$\text{ПС}_1 = \text{ПрС}_1 + \text{ВПр}_1 = 83,91 + 0,8391 = 84,76 \text{ руб.}$$

Сокращение количества бракованных изделий с 12,45% до 3,28%, увеличивает объем производства годный изделий на 10,27%, что сокращает расходы на единицу изделия:

$$ПС_2 = ПрС_2 + ВПР_2 = 75,94 + 0,7593 = 76,70 \text{ руб.}$$

Прибыль на изделие по проекту определяется как разность между оптовой ценой изделия и полной себестоимостью по проектируемому технологическому процессу:

$$Пр = Ц - ПС, \text{ руб.} \quad (4.14)$$

Прибыль до реализации оптимального технологического режима

$$Пр_1 = 105 - 84,76 = 20,24 \text{ руб.}$$

Прибыль после реализации

$$Пр_2 = 105 - 76,70 = 28,30 \text{ руб.}$$

Основные технико-экономические показатели по изготовлению детали сводятся в табл.4.9.

Таблица 4.9

Определение рентабельности производства одной детали

| № | Статьи расходов | Величина расходов в руб. | |
|---|-----------------------------|--------------------------|------------------|
| | | До реализации | После реализации |
| 1 | Полная себестоимость | 84,76 | 76,70 |
| 2 | Оптовая цена | 105 | 105 |
| 3 | Прибыль | 20,24 | 28,30 |
| 4 | Рентабельность производства | 23,88 % | 36,90 % |

После реализации проекта полная себестоимость изделия снизилась на 8,06 руб./изд. за счет сокращения бракованных изделий на 9,17% (с 12,45% до 3,28%).

Выводы по главе 4

1. Анализ методов и средств определения коэффициента трения показал, что все они могут использоваться только для лабораторных исследований и имеют ряд недостатков, ограничивающих их применение в производственных условиях.
2. Разработанная и изготовленная установка для определения коэффициента трения имеет малые габариты и массу, высокую точность измерения, удобна в эксплуатации, более универсальна, что позволяет осуществлять выходной контроль коэффициента трения.
3. Получен патент на полезную модель «Установка для исследования антифрикционных свойств материалов» № 100830.
4. Реализация разработанных мероприятий обеспечивает снижение полной себестоимости изделия за счет сокращения бракованных изделий на 9,17% (с 12,45% до 3,28%). При неизменной оптовой цене изделия в размере 105 руб., получена дополнительная прибыль 8,06 руб. с изделия, с увеличением рентабельности производства на 13,02%. Экономическая эффективность от применения разработанных мероприятий в процессе производства изделий составляет 600 тыс. руб. в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы

1. Разработан новый композиционный материал с полимерной матрицей на основе терморезактивной смолы и хризотилового волокнистого наполнителя с заданными фрикционными свойствами, а также технология изготовления из него деталей.

2. Определены основные факторы, влияющие на твердость композиционного материала (состав масс. %: терморезактивная смола (СФЖ- 3031) - 33-53; волокнистый наполнитель (хризотил) - 44-65; стеарат цинка $Zn(C_{18}H_{35}O_2)_2$ - 0,6-1,2; каолин; графит), температура и время выдержки в пресс-форме, время стабилизации свойств после получения изделия. Определен период хранения смолы и функция изменения вязкости смолы от изменения температуры, имеющая экспоненциальный характер.

3. Разработана технология получения и исследованы физико-механические и эксплуатационные свойства изделий из полученного композиционного материала. Наилучшие значения физико-механических свойств показала смесь №3 с маркой армирующего материала А-6-30: ударная вязкость 2876,2 кДж/м²; изгибающее напряжение 63,4 МПа; прочность при разрыве 27,9 Н/мм²; относительное удлинение при разрыве 7,4 % и наименьшая линейная усадка.

4. Определены границы регулирования режимов прессования для обеспечения стабильности свойств изделий из композиционного материала (температура пресса 115-130 °С, время выдержки в пресс-форме 3-5 мин.).

5. Установлена взаимосвязь твердости с коэффициентом трения (твердость 28-32 единиц НВ – коэф. трения $f_t = 0,3-0,4$), разработана и изготовлена установка для определения коэффициента трения образцов из композиционных материалов (Патент № 100830).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буланов И.М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: Учебник для вузов/ Буланов И.М., Воробей В.В. - М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 1998, 516 с., ил.

2. Либенсон Г.А. Процессы порошковой металлургии. В 2-х т. т.1. Производство металлических порошков: Учебник для вузов/ Либенсон Г.А., Лопатин А.Ю., Комарницкий Г.В. – М.: МИСИС, 2001. – 368 с.

3. Вишняков Л.Р. Композиционные материалы. Справочник / Л.Р. Вишняков, Т.В. Грудина, В.Х. Кадыров, Д.М. Карпинос, В.И. Олейник и др. Киев: Наукова Думка, 1985, 592 с.

4. Арзамасов Б.Н. Материаловедение. Учебник для высших технических учебных заведений/ Б.Н. Арзамасов, И.И. Сидорин, Г.Ф. Косолапов и др. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 384 с., ил.

5. Наполнители для полимерных композиционных материалов: справочное пособие/ Пер. с англ. под ред. П.Г. Бабаевского. - М.: Химия, 1981. - 736 с.

6. Батаев А.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение: учебник/ А.А. Батаев, В.А. Батаев. – Новосибирск: Изд. НГТУ, 2002. - 384 с.

7. Берлин А.А. Принципы создания композиционных полимерных материалов / А.А. Берлин, С.А. Вольфсон, В.Г. Ошмян, Н.С. Ениколопов. - М.: Химия, 1990. - 238 с.

8. Справочник по композиционным материалам: в 2-х кн. Кн. 1. (Handbook of composites) Справочное издание. Под редакцией Дж. Любина. Перевод с английского А.Б. Геллера, М.М. Гельмонта. Под редакцией Б.Э. Геллера. - М.: Машиностроение, 1988. – 448 с.: ил.

9. Гиршов В.Л., Котов С.А., Цеменко В.Н. Современные технологии в порошковой металлургии: учеб. пособие/ В.Л. Гиршов, С.А. Котов, В.Н. Цеменко.- СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2010. - 385 с.

10. Крашенинникова Н.Г. Основы технологии порошковой металлургии: учебное пособие / Н.Г Крашенинникова, С.Я. Алибеков, Г.П. Фетисов. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2016. – 288 с.
11. Арзамасов Б.Н. Материаловедение: Учебник для вузов/ Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин и др.– 5-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 648 с.: ил.
12. 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.
13. Круглов В.В. Технологии изготовления полимерных изделий: учеб. пособие / В.В. Круглов; Нижегород.гос.техн.ун-т им. Р.Е. Алексеева; - Нижний Новгород, 2015. - 174 с.
14. Машков, Ю. К. Трибофизика металлов и полимеров: монография / Ю. К. Машков. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – 240 с.: ил.
15. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трибология. Принципы и приложения. Гомель: ИММС НАНБ, 2002. 310 с.
16. Основы трибологии / Под ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2001. 664 с.
17. Чичинадзе А.В. Расчет и исследование внешнего трения при торможении. М.: Наука, 1967. 232 с.
18. Шустер Л.Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. Уфа: Гилем, 1999. 199 с.
19. Справочник по триботехнике / Под ред. М. Хебды и А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение; Варшава: ВКЛ. Т. 1, 1989. 400 с; Т. 2, 1990. 420 с; Т. 3, 1992. 730 с.
20. Tribologia. Tribotechnika / Redakcja pmkowa, M. Szczrek, M, Wisniewski. Radom: Polskie Towarzystwo Tribologiczne, 2000. 728 s.
21. Трение, износ и смазка: Справочник / Под ред. И.В. Крагельского и

В.В. Алисина. М.: Машиностроение. Т. 1, 1978. 400 с.; Т. 2, 1979. 358 с.

22. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др.; Под общ. Ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.; ил.

23. Машков Ю.К. Полимерные композиционные материалы в триботехнике / Ю.К. Машков, З.Н. Овчар, М.Ю. Байбарицкая, О.А. Мамаев. - М.: ООО «Недра»-Бизнесцентр», 2004. - 262 с.

24. Лысенков П.М. Технологическое формирование поверхности трения как фактор повышения эффективности трибосопряжений //Вопросы материаловедения, 2009, №1, с.33-37.

25. Богданович П.Н., Прушак В.Я. Трение и износ в машинах. Минск: Высшая школа, 1999, 374 с.

26. Боуден Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка. М.: Машиностроение, 1960. 151 с.

27. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.

28. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.

29. Буше Н.А. Трение, износ и усталость в машинах. М.: Транспорт, 1987. 123 с.

30. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука, 2001. 480 с.

31. Краснов А.П., Мить В.А., Афроничева О.В., Саид-Галиев Э.Е., Николаев А.Ю., Васильков А.Ю., Подшибихон А.Л., Наумкин А.Ю., Волков И.О. «Трение нанокompозитов серебрoсoдержaщего сверхвысокомолекулярного полиэтилена» //Вопросы материаловедения, 2009, №1, с.161-170.

32. Соснов Е.А., Анисимов А.В., Бахарева В.Е., Трифонов С.А., Малыгин А.А., Блышко И.В., Кирик Е.В., Савелов А.С. Исследование поверхности трения антифрикционных композитов методами растровой электронной и атомно-силовой микроскопии//Вопросы материаловедения, 2009, №1, с.154-160.

33. Бортников В. Г., Основы технологии переработки пластических масс, Л. Химия, 1983, 304 с.

34. Проектирование и производство продукции [Текст]: [учебное пособие для студентов вузов по направлению "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств"] / А. М. Воронцова [и др.]. - Старый Оскол: ТНТ, 2015. - 263 с.: табл.

35. Власов С.В. Основы технологии переработки пластмасс: учебник для вузов / С.В. Власов, Л.Б. Кандырин, В.Н. Кулезнев и др. - Чебоксары: ГУП ИПК Чувашия, 2004. - 596 с.

36. Кулезнев В.Н. Химия и физика полимеров / В.Н. Кулезнев, В.А. Шершнева. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: КолосС, 2007. - 367 с.

37. Пинчук Л.С. Материаловедение и конструкционные материалы: учебное пособие для машиностроит. спец. вузов / Л.С. Пинчук, В.А. Струк, Н.К. Мышкин, А.И. Свириденко; под ред. В.А. Белого. - Минск: Вышэйш. шк., 1989. - 460 с.

38. Промышленные полимерные композиционные материалы / Пер. с англ. под ред. П.Г. Бабаевского. - М.: Химия, 1986. - 472 с.

39. Полимерные смеси: В 2 т./ Под ред. Д. Пола и С. Ньюмена. - М.: Мир, 1981. Т. 1 - 550 с.; т. 2 - 453 с.

40. Бунаков В.А. Армированные пластики / В.А. Бунаков, Г.С. Головкин, Г.П. Машинская и др.; под ред. Г.С. Головкина, В.С. Семенова. - М.: изд-во МАИ, 1997. - 404 с.

41. Дорофеев А.А., Колошкин С.Д., Чердынцев В.В., Ергин К.С., Данилов В.Д., Мочкина И.В., Юрьева Н.В., Герасин А.В., Антипов Е.М. Влияние наноразмерных наполнителей на свойства композита на основе порошкообразного полипропилена // Материаловедение, 2009, №3, с.40-45.

42. Крупин ЮА., Авдеенко А.М. Влияние статистических характеристик распределения армирующих частиц на разрушение композиционного материала Al-SiC // Механика композиционных материалов, 2002, №1, с. 97-102.

43.Гаришин О.К., Лебедев С.Н. Исследование структурных напряжений в дисперсно наполненных эластомерных нанокompозитах // Механика композиционных материалов, 2006, №3, с. 289-299.

44.Довыденков В.А. Обработка композиционных материалов на основе гранул и металлических порошков: монография В.А. Довыденков, Л.С. Кохан. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2009. – 144 с.

45.Тоневицкий Ю.В. Полимерные композиционные материалы: учеб.-метод. пособие / сост. Ю. В. Тоневицкий, В. Ю. Тоневицкий. — Улан-Удэ: Издательство Бурятского госуниверситета, 2016. — 134 с.

46.Зоткин В.Е. Методология выбора и упрочняющих технологий в машиностроении: учеб. пособие. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М, 2008. – 320 с. – (Высшее образование).

47.Триботехническое материаловедение и триботехнология /Денисова Н.Е., Шорин В.А., Гонтарь И.Н., Волчихина Н.И., Шорина Н.С. Триботехническое материаловедение и триботехнология: учеб. пособие/Под общей редакцией Н.Е.Денисовой. –Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006.
<http://window.edu.ru/resource/011/54011/files/stup365.pdf>

48.COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK.// Volume 3. Polymer matrix composites materials usage, design, and analysis, MIL-HDBK-17-3F Volume 3 of 5 17 JUNE 2002.

49.Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учебник для вузов/И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский; Под ред. Д.Г. Громаковского; Самар. гос. техн. ун-т. Самара, 2000. 268 с.
<http://ntcnad.samgtu.ru/sites/ntcnad.samgtu.ru/files/trib2000.pdf>.

50.Randall M. German. Designing for Metal Injection Moulding: a Guide for Designers and End-users//Powder Injection Moulding International. 2008, Vol. 2 No.4, pp.17-25.

51.Christoph Schumacher. New Options for Construction Design with the MIM-

Process//Ceramic Forum International, October 2006, pp. 32-35.

52. Ingo Cremer. Metal Injection Moulding in Mature//Ceramic Forum International, October 2006, pp. 22-23.

53. Полимерных материалов переработка,
<http://www.xumuk.ru/encyklopedia/2/3524.html>.

54. Мальцева, Л. А. Жидкофазные технологии получения композиционных материалов. Матрицы. Упрочнители : [учеб. пособие] / Л. А. Мальцева, В. А. Шарапова ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. — 120 с.
http://elar.urfu.ru/bitstream/10995/28809/1/978-5-7996-1033-3_2014.pdf

55. Murty B.S. Mechanical alloying – novel synthesis route for amorphous phases//Bull.Mater.Sci. 1993 Vol. 16 N 1. p. 1-17.

56. Oleszak D., Martyja H. Nanocrystalline Fe-based alloys obtained by mechanical alloying//Nanostruct. Mater. 1995. Vol.6, №1/4. p. 425-428.

57. PSuryanarayana C. Mechanical alloying and milling//Prog. Mater. Sci. 2000. Vol. 46. N. 1/2. p. 1-184.

58. Kulkarni K.M. „Metal Powders and Feedstocks for Metal Injection Moulding”// The International Journal of Powder Metallurgy - Vol. 36 p. 3, 2000.

59. Martin I.P.I, Haword B. Injection and Moulding of Hardmetal Components//MPR Metal Powder Rept. – 1989-43, №12-с.816, 818-820, 822-824.

60. Peace L.F. Metal Injection Mouldings: the Incubation is over//Int. J. Powder Met. – 1988-24, 32. – p. 123-127.

61. Lewis Lifford. Metallurgists Define their Technology//Mater Eng. – 1987- p.32-35.

62. Sierra C.M., Lee D. Modeling of Shrinkage during Sintering of Injection Moulded Powder Metal Compacts//Mech. Eng. Dep. Rensselaer Polytech. Inst. – Powder Metallurgy Int. – 1988. – 20, №28 – p. 30-34.

63. Georg Schlieper. Back to basics: Sintering and furnace technology for metal injection moulding// Powder Injection Moulding International. 2009, Vol. 3 No.4,

pp.21-27.

64.Georg Schlieper. Germany's MIM Master: The development of continuous sintering furnaces at Cremer//Powder Injection Moulding International. 2009, Vol. 3 No.1, pp.29-37.

65.Roland Geiger. Condensate – Free Thermal Debinding//Ceramic Forum International, October 2007, p. 20-21.

66.Animesh Bose, Isamu Otsuka, Takafumi Yoshida, Hisataka Toyoshima. Faster sintering and lower costs with ultra-fine MIM-powders // Metalpowder Report, 2007, No.7, pp.18-25.

67.Libb R.S., Paterson B.R., Meflin M.A. Production and Evaluation of PM Injection Mouldings//Annu. Powder Met. Conf. Proc. Boston, Mass, May 18-21, 1986 – Prinston, 39, 1986 – pp. 95-104.

68.Kimura Akira, Kato Yashijuki. Metals Production of Stainless Steel Powders of Pacific//MPR Metal Powder Rept. – 1988-43, №3 – pp. 153-154.

69.Martin Kearns. Sandvik Osprey: a leader in the production of gas atomized powders for metal injection moulding//Powder Injection Moulding International. 2009, Vol. 3 No.1, pp.35-40.

70.H.Ö. Gulosy, S. Özbek and T. Baukara. Microstructural and mechanical properties of injection moulded gas and water atomized 17-4 ph stainless steel powder // Powder Metallurgy, 2007, V.50, No.2, pp.120-126.

71.ГОСТ 11262-80 Пластмассы метод испытания на растяжение <https://plastinfo.ru/content/file/5a7583e94635.pdf>.

72.ГОСТ 4648-71 ГОСТ 4648-71 Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб (с Изменениями N 1, 2, 3) <http://base1.gostedu.ru/32/32909/>.

73.ГОСТ 4670-91 Пластмассы. Определение твердости. Метод вдавливания шарика <http://www.gostbaza.ru/?gost=10241>.

74.Бастрыкин Д.В., Евсейчев А.И., Нижегородов Е.В., Румянцев Е.К., Сизикин А.Ю., Торбина О.И. Управление качеством на промышленном предприятии / Под науч. ред. д-ра экон. наук, проф. Б.И. Герасимова. М.: «Издатель-

ство Машиностроение-1», 2006. 204 с.

75.Галеев В.И., Екатеринин М.В. Национальные стандарты на системы менеджмента для организаций, выпускающих нанопродукцию: успешная апробация// Журнал «Научно-технический журнал «Сертификация» ВНИИС М.: №3 2011. – С. 12-14.

76.Квалиметрия и управление качеством: Методические указания к практическим работам/ Сост. И.П. Данилов, Ю.М. Хвастунов, В.Н. Холопов; Чуваш. Ун-т. Чебоксары, 1997. 28 с.

77.Кисилева Т.Н., Степанов В.Н. Качество в контексте теории систем.//Стандарты и качество. - №3. - 2001.

78.Гличев А.В, Основы управления качеством продукции. – 2-е изд. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2001. – 424 с.

79.Джорджа С. Ваймерскирх А. Всеобщее управление качеством: стратегии и технологии, применяемые сегодня в самых успешных компаниях. (TQM). – СПб., «Виктория плюс», 2002 г. – 256 с.

80.Туркин В.Г., Герасимов Б.И., Жариков В.Д. Качество машиностроительной продукции / Под науч. ред. Б.И. Герасимова. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. 104 с.

81.Управление качеством и реинжиниринг организации/ З.С. Абутидзе, Л.Н. Александровская, В.Н. Бас и др.: Учеб. Пособие. – М. Логос, 2003. - 328 с.

82.Харрингтон Дж.Х. Управление качеством в американских корпорациях: Сокр. Пер. с англ.// Авт. Вступ. Статьи и научн. Ред. Л.А. Конарева. - М.: Экономика, 1990. - 272с.

83.John S. Tomblin, Yeow Ng//Production Control Effect on Composite Material Quality and Stability/ The Joint Advanced Materials and Structures Center of Excellence.2008

84.Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий – М.: Наука, 1976, с. 279.

85.Статистические методы в инженерных исследованиях. / Под ред. Г.К.

Круга. М.: Высш. шк., 1983. – 216 с.

86.Налимов В.В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В.В. Налимов, Н.А. Чернова. – М.: Наука, 1965. 340 с.

87.Налимов В.В. Статистические методы описания химических и металлургических процессов / В.В. Налимов. – М.: Металлургиздат, 1962. – 61 с.

88.Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике: Учеб. для вузов / Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. -2-е изд., стереотип. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. -496 с.

89.Статистические методы повышения качества: пер.с англ. Под ред. Х.Кумэ. - М.: Финансы и статистика, 1991. - 168с.

90.Статистическое управление процессами. SPC. Пер. с англ. - Н.Новгород: АЛ НИЦ КД, СМЦ «Приоритет», 1997.

91.Цубаки Х. Применение статистических методов во всеобщем менеджменте качества (TQM). Японский метод. // Надежность и контроль качества (сер. «Статистические методы»). - 1996. - №4.

92.Мигачев Б.С., Брюханов В.А., Лаптев Э.И. Аттестация методик выполнения измерений - необходимое условие надежного контроля качества продукции. // Стандарты и качество, 1997, - №8. С.8 - 11

93.ГОСТ 20907-2016 Смолы фенолформальдегидные жидкие. Технические условия. – М.: Стандартиформ, 2017 – 19 с.

94.ГОСТ 8.207-76. ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения. . – М.: Стандартиформ, 2006 –8 с.

95.ГОСТ 8420-74 Материалы лакокрасочные. Методы определения условной вязкости – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004 – 6 с.

96.ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. – М.: Стандартиформ, 2015 – 48 с.

97.ГОСТ 9012-59 Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю. – Москва: стандартиформ, 2007. – 40 с.

98.ГОСТ 11262-80 (СТ СЭВ 1199-78) Пластмассы Метод испытания на растяжение, . – М.: Издательство стандартов, 1986 – 19 с.

99.Довыденков, В.А. Влияние вида сырья на динамическую вязкость композиций из порошков металлов, их оксидов и связующего / В.А. Довыденков, О.С. Зверева, С.Я. Алибеков, Р.С. Сальманов // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. - №6. – С. 87-90.

100.Довыденков, В.А. Размерная точность заготовок, полученных формованием и спеканием композиций из металлических порошков, их оксидов и связующего / В.А. Довыденков, О.С. Зверева, Г.П. Фетисов // Технология металлов. – 2012. - №12. - С. 38-43.

101.Юшкова Н.А. Исследование свойств матрицы для полимерных композиционных материалов / Н.А. Юшкова, В.М. Бастраков, А.Г. Забродин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук Том 12, №4(3). - Самара ,2010. С. 702-705.

102.Бастраков В. М. Композиционные материалы на основе фенолформальдегидной смолы СФЖ-3031/В.М. Бастраков, Ю.В. Лоскутов, Н.А. Юшкова // Журнал "Механика композиционных материалов и конструкций" (Composite Mechanics and Design), Издание ИПриМ РАН, Москва - Том 16, №4, 2010. С. 612-622.

103.Бастраков В. М. Планирование эксперимента по исследованию параметров качества изделий из полимерных композиционных антифрикционных материалов /В.М. Бастраков, Ю.В. Лоскутов, Н.А. Юшкова, И.Г. Санникова, А.Г. Забродин // Журнал "Механика композиционных материалов и конструкций" (Composite Mechanics and Design), Издание ИПриМ РАН, Москва.-Т.20, № 4, 2011. С. 421-432.

104.Забродина Н.А. Обеспечение качества изделий из порошковых композиционных материалов //Журнал «Стандарты и качество», №11, 2014. С. 65

105.Полимерный композиционный антифрикционный материал: Патент на изобретение № 2451702 Рос. Федерация: МПК С08L61/10 / Алибеков С.Я., Ба-

страков В.М., Лоскутов Ю.В., Юшкова Н.А., Тонкова А.А., Рыбакова Н.В. заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Марийский государственный технический университет (RU), 2010145306/05, получен приоритет 08.11.2010, зарегистрирован 27.03.2012 – 8 с., 2 табл., 8 пр.

106. Установка для исследования антифрикционных свойств материалов: Патент на полезную модель № 100830 Рос. Федерация: МПК G01N 19/02/Довыденков В.А, Бастратов В.М., Егшин И.А., Юшкова Н.А. заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Марийский государственный технический университет (RU), 2010120327, получен приоритет 20.05.2010, зарегистрирован 27.12.2010 – 8 с.

107. Отчет по государственному контракту № П993 "Разработка технологии и способа получения полимерных композиционных материалов с заданными физико-механическими свойствами" (шифр "НК-134П") от 20 августа 2009 по направлению "Создание и обработка полимеров и эластомеров" в рамках мероприятия 1.2.2 "Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук.", мероприятия 1.2 "Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук и кандидатов наук", направления 1 "Стимулирование закрепления молодежи в сфере науки, образования и высоких технологий" федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы

108. Юшкова Н.А. Влияние перемешивания порошков на твердость деталей из антифрикционных композиционных материалов / Н.А. Юшкова, В.М. Бастратов // Инновационные разработки вузовской науки – российской экономике: сб. статей. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2008. С. 136-139.

109. Юшкова Н.А. Анализ методов контроля вязкости смолы СФЖ-3031 / Н.А. Юшкова, В.М. Бастратов, С.Я. Алибеков, А.А. Тонкова // Глобализация,

глобалистика, потенциалы и перспективы России в глобальном мире. Часть 2. Материалы междисциплинарной научной конференции с международным участием. Йошкар-Ола, МарГТУ, 2009 - С. 265-267.

110.Юшкова Н.А. Создание полимерного композиционного материала с заданными физико-механическими свойствами/ Н.А. Юшкова, А.А. Тонкова// Наука в условиях современности: сб. статей профессорско-преподавательского состава, докторантов, аспирантов и студентов МарГТУ по итогам научно-технической конференции в 2010г. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2010 – С. 133-136.

111.Юшкова Н.А. Композиционные материалы и их основные свойства/ Н.А. Юшкова, А.А. Тонкова// Россия в глобальном мире: вызовы и перспективы развития. Четырнадцатые Вавиловские чтения: материалы постоянно действующей Всероссийской междисциплинарной научной конференции с международным участием: - Йошкар-Ола, МарГТУ, 2011, часть 2. – С. 316-317.

112.Юшкова Н.А. Анализ технологий получения изделий из композиционного материала/ Н.А. Юшкова, А.А. Тонкова// Международная молодежная научная конференция по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу – творчество молодых», 20-21 апреля 2012 г. Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, ПГТУ, 2012, часть 1 – С. 249-250.

113.Юшкова Н.А. Совершенствование технологии получения изделий из полимерного композиционного материала/ Н.А. Юшкова, А.А. Тонкова// Человек, общество, природа в эпоху глобальных трансформаций. Шестнадцатые Вавиловские чтения: материалы постоянно действующей Всероссийской междисциплинарной научной конференции с международным участием: - Йошкар-Ола, ПГТУ, 2013, часть 2. – С. 393-395.

114.Забродина Н.А. Качество изделий из порошковых материалов. Планирование многофакторного эксперимента/ Н.А. Забродина, А.Г. Забродин// Международная молодежная научная конференция по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу – творчество молодых», 17-18

апреля 2015 г. Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, ПГТУ, 2015, часть 1 – С. 178-180.

115.Забродина Н.А. Обеспечение качества изделий из порошковых композиционных материалов с применением планирования многофакторного эксперимента / Н.А. Забродина, В.М. Бастраков, А.Г. Забродин// 7-я Международной научно-технической конференции «Проблемы обеспечения и повышения качества и конкурентоспособности изделий машиностроения и авиадвигателестроения», 21-23 сентября Брянск, 2015, – С. 49-50.

116.Галеев В.И., Екатеринин М.В. Национальные стандарты на системы менеджмента для организаций, выпускающих нанопродукцию: успешная апробация// Журнал «Научно-технический журнал «Сертификация» ВНИИС М.: №3 2011. – С. 12-14.

117.Мигачев Б.С., Брюханов В.А., Лаптев Э.И. Аттестация методик выполнения измерений - необходимое условие надежного контроля качества продукции. // Стандарты и качество, 1997, - №8. С.8 - 11.

118.Пархоменко, Е.Л. Качество инновационного продукта / Е.Л. Пархоменко, Б.И. Герасимов, Л.В. Пархоменко; под науч. ред. д-ра экон. наук, проф. Б.И. Герасимова. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. 116 с.

119.Методы управления затратами и качеством продукции: учеб. пособие / В.Э. Керимов, Ф.А. Петрище, П.В. Селиванов, Э.Э. Керимов. – М.: Изд.-торг. центр «Маркетинг», 2002

120.Злобина Н. В. Экономика качества Учеб. пособие. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. 77 с.

121.Куме Хитоси. Статистические методы повышения качества.М.: Финансы и статистика. - 1990. - 310с.

122.Ильинкова Т.А., Ильинков А.В. Статистические методы управления качеством: Лабораторный практикум/ под. ред. проф. Э.Р. Галимова. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. 2001. 24 с.

123.The Economic Aspects. - J.H.Rogerson. Quality Assurance in Process Plant

Manufacture, 1988, p. 134-136.

124.W.A.Golomski. Applications of Quality Cost Concepts. - A Quality Revolution in Manufacturing, 1988, p. 103.

125.The cost of poor quality. - European quality, 1997, vol. 4, No 2, p. 40- 42.

126.Juran J.M. The Quality Trilogy. - Quality Progress, 1986, August, p. 19-24.

127.Quality Costs. - Juran's Quality Control Handbook, 1988, p.4.1-4.30.

128.Pignatiello Jr.J.J. and Ramberg J.S. "Discussion of off-line quality control, parameter design and the Taguchi Method", Journal of Quality Technology October 1985, h/198-2006.

129.ГОСТ 16338-85 Полиэтилен низкого давления. Технические условия – М.: Стандартиформ, 2005 – 33 с.

130.Кестельман, В.Н. Физические методы модификации полимерных материалов. - М.: Химия, 1980, 224 с.

131.Андреева, И.Н. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен высокой плотности / И.Н. Андреева, Веселовская Е.В., Наливайко Е.Н. // Л., «Химия». 1982. - 80 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Протокол исследования гранулометрического состава

| № п/п | Проба 1 | Проба 2 | Проба 3 | Проба 4 | Проба 5 |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1) | 53 | 72 | 64 | 80 | 40 |
| 2) | 53 | 45 | 80 | 52 | 47 |
| 3) | 60 | 30 | 22 | 41 | 47 |
| 4) | 71 | 44 | 50 | 36 | 15 |
| 5) | 40 | 94 | 44 | 64 | 59 |
| 6) | 17 | 76 | 68 | 38 | 61 |
| 7) | 53 | 23 | 21 | 53 | 14 |
| 8) | 17 | 16 | 52 | 28 | 16 |
| 9) | 39 | 26 | 40 | 98 | 24 |
| 10) | 62 | 13 | 60 | 46 | 45 |
| 11) | 96 | 32 | 81 | 33 | 41 |
| 12) | 41 | 20 | 44 | 57 | 24 |
| 13) | 63 | 17 | 47 | 85 | 44 |
| 14) | 20 | 18 | 64 | 38 | 59 |
| 15) | 81 | 35 | 64 | 87 | 16 |
| 16) | 28 | 79 | 92 | 31 | 11 |
| 17) | 67 | 24 | 89 | 34 | 44 |
| 18) | 58 | 105 | 43 | 43 | 59 |
| 19) | 28 | 45 | 30 | 67 | 63 |
| 20) | 64 | 53 | 30 | 25 | 64 |
| 21) | 39 | 72 | 67 | 37 | 54 |
| 22) | 58 | 50 | 97 | 64 | 69 |
| 23) | 101 | 63 | 51 | 33 | 96 |
| 24) | 37 | 55 | 39 | 65 | 61 |
| 25) | 47 | 23 | 69 | 19 | 44 |
| 26) | 75 | 29 | 50 | 52 | 63 |
| 27) | 59 | 58 | 29 | 76 | 83 |
| 28) | 33 | 78 | 78 | 62 | 65 |
| 29) | 26 | 69 | 43 | 50 | 66 |
| 30) | 54 | 51 | 31 | 35 | 38 |
| 31) | 63 | 54 | 48 | 58 | 49 |
| 32) | 65 | 89 | 75 | 106 | 65 |
| 33) | 80 | 88 | 25 | 42 | 34 |
| 34) | 39 | 53 | 43 | 47 | 32 |
| 35) | 66 | 34 | 96 | 33 | 29 |
| 36) | 40 | 70 | 47 | 27 | 48 |
| 37) | 49 | 61 | 51 | 75 | 65 |
| 38) | 56 | 49 | 60 | 53 | 51 |
| 39) | 50 | 60 | 43 | 71 | 68 |
| 40) | 42 | 58 | 70 | 46 | 41 |
| 41) | 32 | 60 | 60 | 51 | 91 |
| 42) | 71 | 62 | 63 | 41 | 61 |

| | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| 43) | 80 | 44 | 27 | 80 | 25 |
| 44) | 17 | 51 | 45 | 68 | 62 |
| 45) | 25 | 60 | 67 | 61 | 58 |
| 46) | 55 | 43 | 33 | 32 | 54 |
| 47) | 51 | 86 | 15 | 48 | 20 |
| 48) | 25 | 37 | 52 | 56 | 25 |
| 49) | 59 | 31 | 74 | 47 | 61 |
| 50) | 43 | 92 | 79 | 40 | 47 |
| 51) | 28 | 49 | 43 | 25 | 84 |
| 52) | 34 | 82 | 63 | 51 | 34 |
| 53) | 64 | 78 | 65 | 31 | 47 |
| 54) | 67 | 57 | 68 | 35 | 21 |
| 55) | 28 | 46 | 44 | 48 | 37 |
| 56) | 17 | 41 | 60 | 87 | 49 |
| 57) | 32 | 74 | 61 | 80 | 65 |
| 58) | 37 | 25 | 70 | 44 | 75 |
| 59) | 78 | 97 | 50 | 49 | 58 |
| 60) | 45 | 51 | 70 | 72 | 27 |
| 61) | 32 | 89 | 81 | 61 | 53 |
| 62) | 46 | 25 | 100 | 90 | 35 |
| 63) | 53 | 34 | 51 | 49 | 24 |
| 64) | 106 | 50 | 40 | 36 | 53 |
| 65) | 49 | 32 | 37 | 82 | 65 |
| 66) | 24 | 61 | 78 | 37 | 28 |
| 67) | 53 | 55 | 19 | 27 | 54 |
| 68) | 46 | 67 | 93 | 54 | 20 |
| 69) | 49 | 43 | 69 | 60 | 33 |
| 70) | 38 | 27 | 48 | 64 | 51 |
| 71) | 39 | 35 | 85 | 35 | 58 |
| 72) | 62 | 21 | 105 | 90 | 72 |
| 73) | 87 | 50 | 84 | 73 | 37 |
| 74) | 30 | 31 | 46 | 33 | 45 |
| 75) | 17 | 31 | 29 | 32 | 60 |
| 76) | 30 | 37 | 34 | 51 | 45 |
| 77) | 20 | 26 | 31 | 67 | 17 |
| 78) | 34 | 43 | 77 | 59 | 83 |
| 79) | 26 | 55 | 64 | 40 | 48 |
| 80) | 51 | 50 | 57 | 54 | 40 |
| 81) | 53 | 112 | 82 | 105 | 52 |
| 82) | 35 | 59 | 56 | 34 | 34 |
| 83) | 22 | 20 | 49 | 16 | 62 |
| 84) | 36 | 30 | 66 | 78 | 58 |
| 85) | 53 | 72 | 57 | 30 | 17 |
| 86) | 44 | 39 | 42 | 46 | 77 |
| 87) | 48 | 29 | 48 | 31 | 83 |
| 88) | 12 | 81 | 80 | 26 | 68 |
| 89) | 43 | 58 | 83 | 106 | 29 |
| 90) | 58 | 33 | 118 | 78 | 52 |
| 91) | 83 | 40 | 42 | 84 | 36 |

| | | | | | |
|------------------|----------|---------|----------|----------|----------|
| 92) | 43 | 54 | 60 | 33 | 60 |
| 93) | 61 | 38 | 75 | 50 | 76 |
| 94) | 56 | 37 | 36 | 52 | 69 |
| 95) | 35 | 54 | 40 | 60 | 59 |
| 96) | 37 | 69 | 82 | 26 | 71 |
| 97) | 34 | 27 | 74 | 61 | 80 |
| 98) | 79 | 59 | 74 | 57 | 60 |
| 99) | 32 | 82 | 49 | 95 | 20 |
| 100) | 30 | 43 | 26 | 35 | 38 |
| \bar{x} , MKM | 47,64 | 50,95 | 57,73 | 53,3 | 49,37 |
| S_x , MKM | 19,72284 | 21,9615 | 21,05605 | 21,05303 | 19,31665 |
| X_{\max} , MKM | 106 | 112 | 118 | 106 | 96 |
| X_{\min} , MKM | 12 | 13 | 15 | 16 | 11 |

Акт об апробации результатов диссертационной работы на ООО «Наномет»

Наномет

* Дисперсные порошки. Композиционные материалы *



АКТ

об апробации результатов выполнения договора подряда по НИР № 02.74/09 «Разработка технологии и способа получения полимерных композиционных материалов с заданными свойствами» старшего преподавателя Забродиной Н.А.
г. Йошкар-Ола 16 июня 2017 г.

Настоящий акт составлен в том, что на ООО «Наномет» в производственных условиях при выполнении договора подряда по НИР № 02.74/09 «Разработка технологии и способа получения полимерных композиционных материалов с заданными свойствами» отработана технология изготовления деталей из полимерного композиционного материала на основе фенолформальдегидной смолы СФЖ-3031 и волокнистого наполнителя (патент РФ № 2451702). Получены математические модели зависимости параметров изделий от влияющих факторов, выбраны границы регулирования влияющих факторов, обеспечивающих заданные свойства изделий; годовой экономический эффект от внедрения результатов исследования составил 600 тыс. рублей, за счет уменьшения уровня брака с 12,45% до 3,28%.

Начальник участка композиционных материалов Саникова Л.Г. Саникова

Акт о внедрении в учебный процесс результатов диссертационной работы



УТВЕРЖДАЮ:
Ректор ФГБОУ ВО ПГТУ,
Шебашев В.Е.
«06» октября 2017 г.

Акт

Использования научных данных диссертационной работы Забродиной Н.А. в учебном процессе.

Результаты научной работы по исследованию и разработке композиционного материала на основе полимерной матрицы и волокнистого наполнителя, используются при чтении лекций и проведения лабораторных, практических занятий по курсу «Технология композиционных материалов».

Разработанная методика и установка по исследованию коэффициента трения материалов (Патент РФ № 100830), математические модели зависимостей анализируемых показателей изделия от влияющих факторов, используются при выполнении расчетно-графических работ, курсовых проектов и дипломных работ для бакалавриата и магистров по направлению подготовки «Материаловедение и технология материалов».

Заведующий каф.
машиностроения и
материаловедения
Алибеков С.Я.

Алибеков С.Я.