

На правах рукописи



Забродина Наталья Александровна

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

Специальность 05.16.06 – Порошковая металлургия и
композиционные материалы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2018

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Бастраков Валентин Михайлович

Официальные оппоненты: **Михайлов Борис Петрович**,
доктор технических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт металлургии и
материаловедения им. А.А. Байкова
Российской академии наук, лаборатория
физикохимии тугоплавких и редких металлов
и сплавов, ведущий научный сотрудник;

Ершов Дмитрий Васильевич, кандидат
технических наук, доцент, Федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Сибирский государственный университет
науки и технологий имени академика М.Ф.
Решетнева», кафедра химической технологии
твёрдых ракетных топлив, нефтепродуктов и
полимерных композиций, доцент.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Казанский национальный
исследовательский технический университет
им А.Н. Туполева - КАИ»

Защита состоится «20» сентября 2018 года в 10:00 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.099.19, созданного на базе Сибирского
федерального университета по адресу: 660041, г. Красноярск, проспект
Свободный, 82, стр. 6, ауд. 3-17.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского
федерального университета <http://www.sfu-kras.ru>

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного

совета



Карпов Игорь Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. 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. При изготовлении деталей из композитов большое значение имеет стабильность технологических процессов, обеспечивающих значения функциональных параметров продукции в заданных пределах. 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.

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, обеспечивающих 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; $f_t = 0,3 \dots 0,4$; $\sigma_e = 15 \dots 25$ МПа).

2. Изучено изменение реологических свойств полимерной смолы при ее хранении и нагреве. Установлено, что наиболее оптимальной вязкостью смолы для получения однородного композиционного материала является динамическая вязкость $\eta = 170 \dots 327$ 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.

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 и внедрены на ООО «Наномет» (Йошкар-Ола) (акт об апробации) и в учебный процесс.

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.), Международных молодёжных научных конференциях 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.), на 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 печатных работах, в том числе 4 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. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемых источников и приложений. Материал работы изложен на 130 страницах и содержит 39 рисунков, 51 таблицу, список литературы из 131 наименования и 3 приложения.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, определены цели и задачи исследований.

В первой главе выполнен обзор и анализ многообразия композиционных материалов, их состава и технологий изготовления. Исследованиям в области создания композиционных материалов, методам порошковой металлургии посвящены работы ученых: Антипова Ю.В., Бабаевского П.Г., Васильева В.В., Григорьева О.Н., Довыденкова В.А., Меркулова В.Д., Мозгунова В.Н., Мурашова Б.А., Шалунова Е.П., Шумаева С.В. и др. Исследованиям в области трибологии и фрикционных свойств материалов посвящены работы ученых: Чичинадзе А.В., Крагельского И.В, Мамхегова М.А. и Михина Н.М. и др.

Свойства композиционных материалов зависит от выбора исходных компонентов и их соотношения, взаимодействия между ними, метода и технологических условий изготовления изделия, дополнительной обработки изделия и ряда других факторов.

Во второй главе изложена методика проведения исследований, проанализирован различный состав и количественные характеристики исходных компонентов.

Состав масс. %:- терморезактивная смола (СФЖ- 3031) - 33-53;

- волокнистый наполнитель (хризотил) - 45-65;

- стеарат цинка $Zn(C_{18}H_{35}O_2)_2$ - 0,6-1,2; каолин; графит.

На рис.1 представлен технологический процесс получения изделий из разработанного композиционного материала. В композиционном материале матрица служит для передачи и перераспределения

механических усилий между отдельными частицами дисперсной фазы, создания монолитности материала. Определяющим при создании композитов является взаимодействие и взаимовлияние компонентов в элементарном объеме волокно–матрица.



Рис.1. Технологический процесс получения композиционного материала

В качестве матрицы для разрабатываемого материала использована фенолформальдегидная смола жидкая (СФЖ- 3031, ГОСТ 20907). Для анализа свойств исходной смолы проведено экспериментальное исследование влияния на ее вязкость температуры нагрева, времени и условий хранения. На рис.2 показана зависимость вязкости смолы от времени и условий хранения.

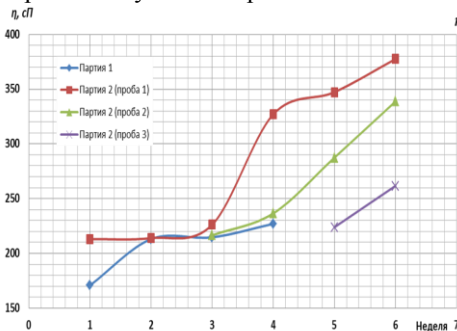


Рис. 2 Изменение вязкости смолы в зависимости от времени ее хранения

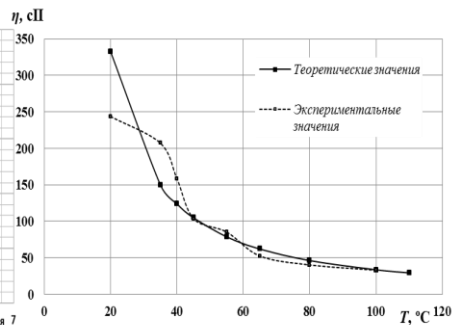


Рис. 3 Зависимость теоретических и экспериментальных значений динамической вязкости от температуры

Установлена также зависимость динамической вязкости смолы η от температуры нагрева t , аппроксимация которой имеет вид:

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

На рис. 3 показаны теоретические и экспериментальные кривые данной зависимости, из которых видно, что теоретические значения вязкости не совпадают с экспериментальными только до температуры нагрева 40 °С. При дальнейшем нагревании кривые хорошо согласуются.

Волокнистым наполнителем является хризотил марок: АН-К6, 7R, А-6-30. Волокна хризотила повышают прочность композиционного материала, предотвращают его выкрашивание при эксплуатации. В качестве пластификатора и антиадгезива используется соль стеариновой кислоты - стеарат цинка.

Исследованы образцы с различным процентным соотношением исходных компонентов в материале:

смесь №1: хризотил – 65%; матрица (СФЖ- 3031)-34%; стеарат цинка 1%;
 смесь №2: хризотил – 55%; матрица (СФЖ- 3031)-44%; стеарат цинка 1%;
 смесь №3: хризотил – 44%; матрица (СФЖ- 3031)-55%; стеарат цинка 1%.

Для исследования выбраны образцы, имеющие форму параллелепипеда с предельными размерами $10 \times 11 \times 55$ мм ($a \times b \times c$).

Проанализированы величины линейной и объемной усадки. Усадка армированных реактопластов в различных направлениях по отношению к направлению течения различна, т.е. наблюдается анизотропия усадки.

Были определены величины линейной и объемной усадок для указанных смесей. Минимальные значения усадки имели смеси с волокнистым наполнителем А-6-30. Величина значений усадки сторон образцов представлены в табл. 1.

Таблица 1 – 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

Результаты сравнения свойств разработанного материала и близких аналогов представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Характеристики разработанного материала с различными марками наполнителей и аналогов

Материал	Разработанный КМ с АН-К6	Разработанный КМ с 7R	Разработанный КМ с А-6-30	ПЭНД	СВМПЭ	Ф-4	ПА 6-МГ
Свойства							
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
Коеф. 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

Как видно из таблицы, по сравнению с аналогами, разработанный материал удовлетворяет заявленным требованиям. Однородность структур изготовленного композиционного материала исследована при 100 кратном увеличении.

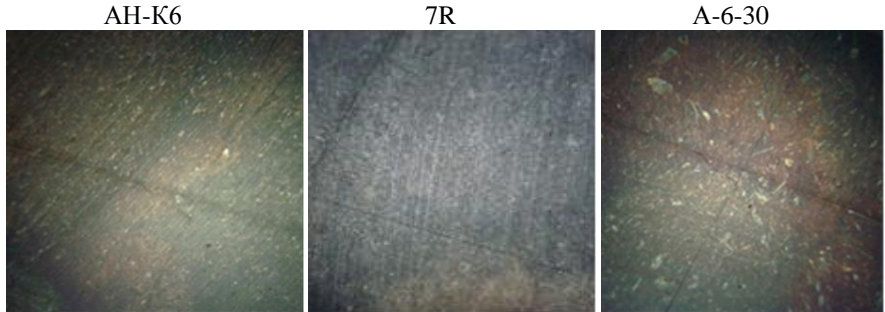


Рис.4 Шлифы полученного композиционного армированного материала

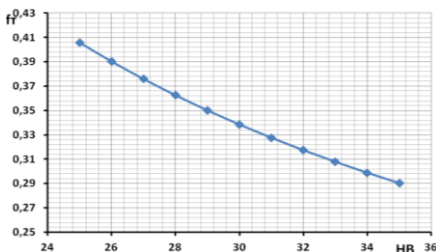
Как видно из представленных на рис. 4 шлифов, наполнитель равномерно распределен внутри полученного материала.

Основным требованием к разработанному материалу является коэффициент трения 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 другими характеристиками, более удобными для текущего контроля. Такой характеристикой является твердость.

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:

$$f_T = \frac{\tau_0}{HB} + k^o \left(\frac{p_c}{HB} \right)^m, \quad (2)$$

где τ_0 – константа материала, p_c – контурное давление, k^0 и m – константы, зависящие от параметров шероховатости поверхностей трения и степени насыщенности контакта.



По формуле (2) и значениям характеристик для исследуемого материала построена зависимость твердости от коэффициента трения, которая показана на рис.5.

Рис.5 График взаимосвязи твердости и коэффициента трения

По графику на рис.5 видно, что заданный коэффициент трения f_t в пределах от 0,31 до 0,39 может быть обеспечен при твердости от 26 НВ до 33 НВ.

В процессе изготовления деталей из разработанного материала необходимо контролировать твердость. Для композиционных материалов отсутствует нормативная база по контролю твердости, поэтому при выборе методики определения твердости проанализированы существующие межгосударственные и международные стандарты на методики контроля для пластиков и металлов. При этом возникла необходимость определения взаимосвязи размера индентора и прикладываемой нагрузки. Для этого использована зависимость нормальной нагрузки от сближения между поверхностями взаимодействия твердых тел при упругом ненасыщенном контакте установлена в виде

$$P = \frac{1,33A_c b^{\frac{2\nu+1}{2\nu}} + \nu(\nu-1)k_1 E \varepsilon^{\frac{2\nu+1}{2\nu}}}{2\pi\sqrt{R}(1-\mu^2)}, \quad (3)$$

Значения параметров формулы (3), принятые для разработанного материала:

$A_c=125,6$	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

Теоретическая зависимость показывает, что при использовании индентора $d = 5$ мм можно прикладывать нагрузку $P = 150$ Н, что хорошо согласуется с методом измерений по ГОСТ 4670. В этом стандарте предусмотрена испытательная нагрузка $P_m = 132$ Н и использование шарика $d = 5$ мм. По такой методике был проведен эксперимент, показавший низкий уровень стабильности получаемых результатов (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 с вероятностью $P = 0,95$ находятся в пределах: $27,75 \pm 2,27$ НВ.

Поэтому были проведены дополнительные исследования измерений твердости по методу, установленному в ГОСТ 9012, которые показали, что данный метод обеспечивает большую достоверность результатов измерения.

Третья глава посвящена моделированию зависимостей анализируемых показателей изделия от влияющих факторов и разработке

методики определения предельных значений твердости непосредственно после прессования изделий из нового композиционного материала.

Были определены технологические факторы, влияющие на твердость в наибольшей степени: X_1 - температура нагревания пресс-формы (t), X_2 - время выдержки изделия в форме (T_{ϕ}) и X_3 - время выдержки после прессования (T_b).

Требуемые значения твердости можно обеспечить своевременным регулированием режимов процесса прессования t , T_{ϕ} . Установлены их границы, в пределах которых можно получить заданные значения твердости. Разработан план многофакторного эксперимента типа 2^3 с вариацией трех факторов на двух уровнях. В таблице 3 приведены предельные значения этих факторов и уровни их варьирования.

Таблица 3 - Уровни варьирования факторов

Уровень факторов	Кодовое обозначение	t , °C	T_{ϕ} , мин.	T_b , дней (час)
		X_1	X_2	X_3
Нижний	-1	120	4	3 (72)
Верхний	+1	132	6	30 (720)
Основной	0	126	5	17 (408)
Интервал варьиров.	ΔX_i	6	1	14 (336)

В соответствии с планом эксперимента было изготовлено 108 образцов деталей. Твердость измерялась в 3-х точках с каждой стороны детали. Полученные средние значения результатов измерений из 6 деталей для влияющих факторов приведены в табл. 4.

Таблица 4 - Экспериментальные значения характеристик

№	X_1 (t , °C)	X_2 (T_{ϕ} , мин)	X_3 (T_b , дней (час))	y_1 HB	y_2 d , мм
1	120	4	3 (72)	28,7	45,11
2	132	4	3 (72)	32,2	45,07
3	120	6	3 (72)	28,7	44,99
4	132	6	3 (72)	35,1	45,05
5	120	4	30 (720)	32,2	44,87
6	132	4	30 (720)	35,3	44,93
7	120	6	30 (720)	32,8	44,89
8	132	6	30 (720)	37,3	44,93

На основе предварительных исследований и анализа изменения параметров деталей (твердости **HB** и величины внешнего диаметра d) от изменения влияющих факторов в качестве математической модели была принята зависимость вида:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{23}x_2x_3 + a_{13}x_1x_3 \quad (4)$$

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

x_1, x_2, x_3 - кодированные переменные.

Анализ возможного взаимного влияния факторов показал, что корреляция существует только между первым и вторым факторами.

По результатам плана многофакторного эксперимента типа 2^3 с вариацией трех факторов на двух уровнях после обработки данных, получены искомые зависимости параметров изделия:

$$HB = 38,645 - 0,0895t - 10,834T_{\phi} + 0,12T_B + 0,0915t \cdot T_{\phi} \quad (5)$$

Графики зависимостей параметров изделия от влияющих факторов в планируемых точках по экспериментальным данным и аппроксимированным функциям показаны на рис. 6.

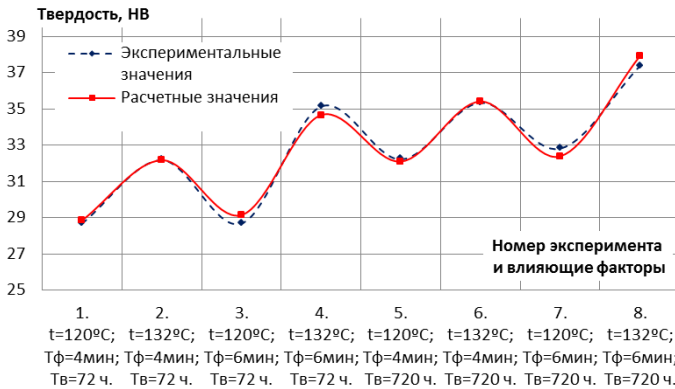


Рис. 6 Графики экспериментальных и расчетных значений для твердости HB

Кривые расчетных и экспериментальных зависимостей твердости и линейных размеров изделия при соответствующих сочетаниях значений влияющих факторов показывают хорошую сходимость.

Полученные экспериментальные данные проверены на воспроизводимость результатов измерений по критерию Кохрена с доверительной вероятностью $P = 0,95$.

Для проверки гипотезы об адекватности опытных данных теоретическим при соответствующем объеме выборки использовали F -критерий Фишера. С вероятностью $P=0,95$ полученную математическую зависимость для значений твердости HB является адекватной.

На основании полученной модели определены границы регулирования влияющих факторов, обеспечивающие требования к твердости в пределах 28-32 HB. Для этого по уравнению (5) были рассчитаны значения твердости при граничных значениях влияющих факторов.

Таблица 5 - Расчетные значения твердости

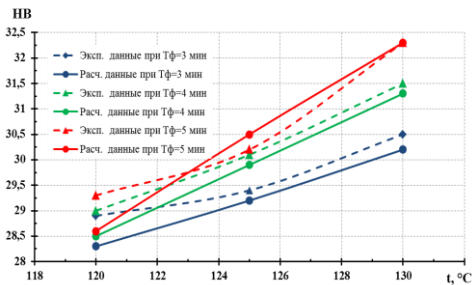
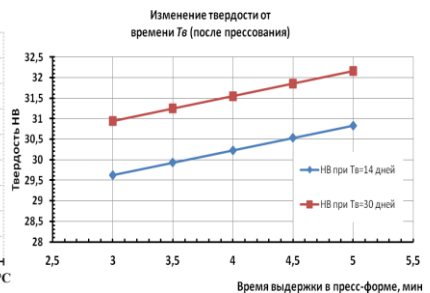
Значения твердости <i>HB</i>					
$t, ^\circ\text{C}$ \backslash T_{ϕ} мин	3	3,5	4	4,5	5
115	27,4	27,3	27,1	26,9	26,8
120	28,3	28,4	28,5	28,6	28,6
125	29,3	29,6	29,9	30,2	30,5
130	30,2	30,7	31,3	31,8	32,3
135	31,1	31,9	32,6	33,4	34,2

Из значений, полученных в таблице 5, видно, что заданная твердость при любом времени выдержки в пресс-форме от 3 до 5 мин обеспечивается при температуре ее нагрева в пределах 120-125 $^\circ\text{C}$. При

температуре нагрева пресс-формы до 130 $^\circ\text{C}$ время выдержки может быть только в пределах от 3 до 4,5 мин. Температура нагрева пресс-формы 115 $^\circ\text{C}$ не обеспечивает заданных значений твердости при любом времени выдержки. Таким образом, установлены границы регулирования влияющих факторов: температуры нагрева пресс-формы от 120 до 130 $^\circ\text{C}$; времени выдержки в пресс-форме от 3 до 5 мин (при температуре пресс-формы 130 $^\circ\text{C}$ до 4,5 мин).

Проведена экспериментальная проверка граничных и средних значений диапазонов регулирования влияющих факторов, установленных по теоретической зависимости. Значения твердости, полученные экспериментально, соответствуют предельным значениям, определенным расчетным путем.

Графики теоретической и экспериментальной зависимостей твердости при варьировании температуры прессования (t) и времени выдержки в пресс-форме (T_{ϕ}) показаны на рис.7.

Рис. 7. Графики зависимостей расчетных и экспериментальных значений для твердости *HB*Рис. 8. Графики расчетных значений для твердости *HB* (от времени выдержки после прессования)

В четвертой главе разработана методика оперативного контроля твердости для управления процессом изготовления и установка для экспресс-контроля коэффициента трения (Патент РФ № 100830).

Особенностью данного композиционного материала является то, что твердость с течением времени после прессования изделия увеличивается. По экспериментальным данным для разных условий прессования через 30 дней твердость увеличивается на 2,2...4,1 НВ. По теоретической зависимости (5) для принятой совокупности факторов изменение (увеличение) твердости составило 1,32 НВ и 3,24 НВ соответственно для периодов 14 и 30 дней. Аппроксимация экспериментальной зависимости твердости, полученной при температуре нагрева 120 °С и времени выдержки в пресс-форме 5 мин, от времени выдержки после прессования, имеет вид

$$HV = 26,3 + 1,86 \cdot \ln T_v, \quad (6)$$

Значения твердости, рассчитанные для указанных периодов времени выдержки после прессования по зависимости (6) и полученные экспериментально при температуре нагрева пресс-формы $t = 120$ °С и времени выдержки в пресс-форме $T_{\phi} = 5$ мин, приведены в табл. 6.

Таблица 6 - Значения твердости, полученные экспериментально и расчетом

Время выдержки после прессования		Значение твердости НВ, полученное	
		экспериментально	расчетом по формуле (6)
T_v , дни	3	28,275	28,343
	7	30,00	29,919
	30	32,58	32,626

Сравнение результатов, полученных расчетным путем и экспериментально, показывает, что математическую модель (6) можно использовать для введения поправки на предельные значения данного параметра при его контроле после прессования.

Таким образом, учитывая увеличение твердости с течением времени по зависимостям (5) и (6), полученными на основе экспериментальных исследований, при контроле деталей после прессования предельные значения параметра необходимо уменьшить

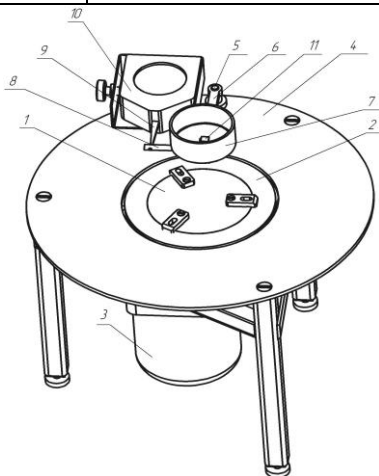


Рис. 9. Схема общего вида установки

на 3 единицы НВ, то есть после прессования значение твердости должно быть в пределах 25...29 НВ.

Для проверки соответствия значений твердости, требуемым значениям коэффициента трения была разработана установка по определению коэффициента трения, общий вид которой изображен на рис. 9. Установка содержит диск 1 с жестко закрепленным на нем контртелом 2, причем диск 1 установлен на валу электродвигателя 3. На рабочей поверхности стола 4 закреплена ось 5, на которую установлен кронштейн 6 с держателем 7. Кронштейн может поворачиваться вокруг оси 5. Держатель 7 посредством тяги 8 соединен с измерительным наконечником 9 граммометра 10.

По результатам испытаний образцов материала на разработанной установке (рис. 9) и расчетам теоретической зависимости (1) построены графики теоретического и экспериментальных значений коэффициента трения порошкового композиционного материала (рис. 10). Как видно из рисунка графики показывают хорошую сходимость.

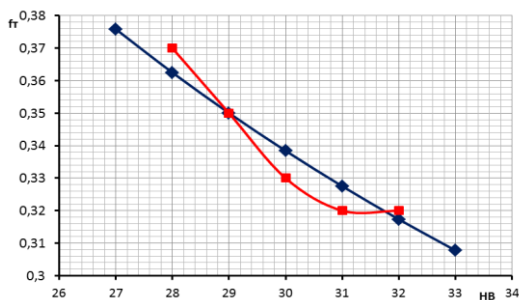


Рис. 10. Графики теоретической и практической взаимосвязи коэффициента трения и твердости

Основные результаты и выводы

1. Разработан новый композиционный материал с полимерной матрицей на основе термореактивной 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. %: термореактивная 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 %. Для данного наполнителя величина линейной усадки получилась наименьшей.

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).

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **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.

2. 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 ИПрМ РАН, Москва - Том 16, №4, 2010. С. 612-622.

3. 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 ИПрМ РАН, Москва. - Т.20, № 4, 2011. С. 421-432.

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

По теме диссертации опубликованы патенты:

5. Полимерный композиционный антифрикционный материал: Патент на изобретение № 2451702 Рос. Федерация: МПК C08L61/10 / Алибеков С.Я., Бастраков 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.

6. Установка для исследования антифрикционных свойств материалов: Патент на полезную модель № 100830 Рос. Федерация: МПК G01N 19/02/Довыденков В.А, Бастраков В.М., Егошин 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.

Статьи и материалы конференций:

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

8. **Юшкова Н.А.** Анализ методов контроля вязкости смолы СФЖ-3031 / **Н.А. Юшкова**, В.М. Бастраков, 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.

9. **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.

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

11. **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.

12. **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.

13. **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.

14. **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.

15. **Забродина Н.А.** Контроль изделий из порошковых материалов с использованием планирования многофакторного эксперимента / **Н.А. Забродина, В.М. Бастраков, А.Г. Забродин, С.Я. Алибеков** // Двадцатые Вавиловские чтения: материалы международной междисциплинарной научной конференции. Россия в многовекторном мире: национальная безопасность, вызовы и ответы, Йошкар-Ола, ПГТУ, 2017, – С. 143- 145.

16. **Забродина Н.А.** Технологическое обеспечение качества изделий из порошковых композиционных материалов / **Н.А. Забродина, В.М. Бастраков, С.Я. Алибеков** // Материалы всероссийского совещания заведующих технологическими кафедрами, Киров, ВятГУ, 2017. – С. 52-56.