

На правах рукописи



Самодурова Марина Николаевна

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ, ТЕХНОЛОГИИ И УСТРОЙСТВ
СТАТИЧЕСКОГО И ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
ПРЕССОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ГРАФИТОПЛАСТОВЫХ
КОМПОЗИЦИЙ С УЧЕТОМ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ**

05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Челябинск – 2019

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» г. Челябинск.

Официальные оппоненты: **Дорофеев Владимир Юрьевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск, профессор кафедры «Технология машиностроения»

Поляков Андрей Петрович, доктор технических наук, доцент, ФГБУН «Институт машиноведения» Уральского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник, г. Екатеринбург.

Рубаник Василий Васильевич, доктор технических наук, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, Государственное научное учреждение «Институт технической акустики», Беларусь, г. Витебск, заведующий лабораторией физики металлов.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Защита состоится 24.04.2019 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д212.111.03 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, МГТУ, малый актовЫй зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, МГТУ. Ссылка на сайт: www.mgtu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Юрий Васильевич Жиркин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Создание и развитие новых способов и устройств для формования изделий электротехники из графитопластовых порошковых композиций, особенно в условиях многономенклатурного мелкосерийного и серийного производства, определяется необходимостью снижения производственных затрат и повышения качества готовой продукции, сокращения расхода материалов и уменьшения энергоемкости технологических процессов.

Существующие технологии и оборудование, используемые при производстве изделий электротехники из порошковых композиций, отличаются высокой материалоемкостью и трудоемкостью операций. Получаемые прессовки имеют пониженные плотность и физико-механические свойства, что становится причиной снижения эксплуатационных характеристик готовых изделий, прежде всего щеток электромашин, вставок токосъемников наземного и рельсового трамвайного и железнодорожного электротранспорта.

Анализ современного состояния производства изделий электротехники из графитопластовых порошковых композиций показал, что вопросы изучения, исследования операций формования, разработки новых способов и устройств для статического и высокоэнергетического компактирования являются актуальными.

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в развитие научных основ производства изделий из различных материалов, в том числе из графитовых, графитосодержащих и графитизированных композиций с применением методов обработки давлением порошковых композиционных материалов, включая методы высокоэнергетического формования, внесли: М.Ю. Бальшин, Ю.Г. Дорофеев, Л.А. Барков, А.С. Фиалков, Р.Н. Орейва, Р.Х. Уитмон, Г.Г. Сердюк, Н.Ф. Кунин, Б.Д. Юрченко, А.С. Бережной, Г.М. Жданович, С. Торре, Т.И. Знатокова, В.И. Лихтман, К. Конопицкий, А.Д. Томленов, А.И. Рудской, А.К. Григорьев, Г.Л. Петросян, И.В. Темкин, П.С. Лившиц, Е.Ф. Чалых и другие российские и зарубежные ученые, а также ряд отечественных и зарубежных научных организаций.

На основе результатов исследований, выполненных отечественными и зарубежными учеными и научными организациями, разработаны методы, способы, технологии и оборудование для производства изделий из графитосодержащих материалов с использованием методов обработки давлением порошковых композиционных материалов, однако, существующие технологии и оборудование не в полной мере удовлетворяют требования потребителя. Получаемые прессовки имеют пониженные плотность и физико-механические свойства, что становится причиной снижения эксплуатационных характеристик готовых изделий, прежде всего щеток электромашин, вставок токосъемников наземного и рельсового трамвайного и железнодорожного электротранспорта. Поэтому улучшение качества графитосодержащих изделий для нужд электротехники с целью увеличения эксплуатационных характеристик готовых изделий и продления ресурса электрических машин в различных отраслях промышленности явля-

ется важной и актуальной задачей. Представляемая диссертационная работа направлена на решение поставленных в ней именно этих проблем и задач.

Представленные в работе результаты теоретических, экспериментальных исследований и промышленных испытаний, а также внедрение способов, технологий, оборудования и прессового инструмента в действующее производство способны повысить эффективность производственных процессов через снижение затрат на разработку новых технологий, сокращение уровня брака и потерь материала, улучшить качество получаемых графитосодержащих элементов электрооборудования за счет повышения плотности и физико-механических свойств материала. Указанные мероприятия направлены на более эффективную эксплуатацию электрических машин при использовании в них более надежных и долговечных электроконтактных материалов и изделий.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту «Разработка новых способов и технологий создания изделий электротехнического и конструкционного назначения из углеграфитовых композиционных материалов посредством высокоскоростного динамического формования» в рамках реализации Государственного задания №9.1329.2017/4.6 между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Объект исследования – способы и устройства для получения изделий электротехники из порошковых композиций на основе углерода.

Предмет исследования – процессы, технологическая оснастка и оборудование для получения щеток электромашин, вставок токосъемников наземного и рельсового трамвайного и железнодорожного электротранспорта.

Цель работы – развитие теории, процессов, устройств и инструмента статического и высокоэнергетического формования изделий электротехники из графитопластовых композиций на основе использования новых знаний об их реологии, деформировании и уплотнении.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ существующего состояния теории и практики изготовления изделий электротехники способом обработки порошковых материалов давлением, установить степень изученности процессов и разработать концепцию их совершенствования.

2. На основе обобщения известных подходов и описания статического и высокоэнергетического прессования графитопластовых композиций разработать зависимость, описывающие указанные процессы с учетом скоростных и температурных факторов.

3. На основе анализа известных реологических моделей получить модернизированные реологические уравнения и модели прессования изделий из графитопластовых композиций.

4. Создать защищенные патентами инновационные способы и устройства для производства блоков и щеток электромашин, контактных вставок и головок токосъемников троллейбусов, токосъемных элементов и устройств рельсового электротранспорта из графитопластовых композиций.

5. Разработать, исследовать и внедрить в промышленное производство научно обоснованные технологии, основанные на использовании созданных способов и устройств.

Методы исследования

Использован комплексный метод, включающий анализ состояния вопроса, теоретические исследования с привлечением теории пластичности, а именно, основополагающих законов механики сплошной среды и теории обработки материалов давлением, основ построения механических и реологических моделей прессования для порошковых композиций, средств символьной математики и графической визуализации решений пакетами программ Mathcad, Matlab и пакетом для расчета процессов обработки давлением Deform, исследований в лабораториях и производственных условиях.

Положения, выносимые на защиту:

- Новые математические уравнения статического и высокоэнергетического компактирования графитопластовых композиций.
- Усовершенствованные реологические уравнения и модели формирования изделий из композиционных порошковых материалов.
- Обоснования создания инновационных способов и устройств.
- Новые конструкции блоков для получения щеток электромашин.
- Новые составы порошковых графитопластовых композиций.
- Новые конструкции вставок токосъемников троллейбусов.
- Новые конструкции вставок и пантографов токосъема рельсового транспорта.
- Новый метод экспериментального исследования грануломорфологии графитопластовых композиций.
- Новый метод экспериментального исследования процессов высокоэнергетического компактирования порошковых композиций.
- Новый метод электронномикроскопических исследований химического состава и микроструктуры прессовок, уплотненных при скоростях 0,03 и 3 м/с.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректной постановкой задач, использованием основополагающих законов механики сплошной среды и теории обработки материалов давлением, современных методов экспериментальных исследований и методик обработки данных, полученных опытным путем. Апробация разработанных уравнений прессования, реологических уравнений и моделей показала возможность их практического использования. Результаты расчетов имеют удовлетворительную сходимость с экспериментально полученными данными.

Приведенные в диссертации выводы и рекомендации теоретически и экспериментально обоснованы.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана концепция совершенствования известных способов и устройств статического формования изделий электротехники из коксопечковых и графитопластовых порошковых композиций, включающая учет их реологических особенностей.

2. Разработаны новые теоретические принципы создания процессов прессования графитопластовых порошковых композиций при высокоэнергетическом нагружении, заключающиеся в учете адиабатичности процесса и температурно-скоростных факторов.

3. На основе анализа известных реологических уравнений и механических моделей прессования порошковых композиций металлов, керамики и кокса (коксопечковые композиции) установлено, что графитопластовые композиции по своим механическим, физическим и технологическим свойствам имеют принципиальные отличия. В исходном состоянии графитопластовые порошковые композиции обладают упругими и вязкими свойствами, что позиционирует их как упруговязкие реологические модели в процессах горячего прессования. Предложена оригинальная механическая модель и реологические уравнения ее описания, принципиально отличающиеся от известных учетом смачиваемости твердых компонентов, полимерным связующим, скоростью деформации и температурой.

4. На основе экспериментального и теоретического изучения стадий процесса прессования графитопластовых композиций получены новые научные знания о закономерностях их уплотнения, заключающиеся в выявлении трех стадий уплотнения частиц без учета первой стадии их перегруппировки. Разработаны математические модели, учитывающие предложенную реологию исследуемых материалов.

5. На основе анализа уравнений высокоэнергетического прессования порошковых композиций, в том числе коксопечковых, и результатов экспериментальных исследований процесса высокоэнергетического прессования графитопластовых композиций впервые получено уравнение прессования в виде политропы, связывающей плотность прессовки из графитопластовых материалов с удельной кинетической энергией прессования. В качестве модернизированного уравнения высокоэнергетического прессования графитопластовых композиций использована часть политропы, описывающая упругую стадию процесса уплотнения до плотности $1,75 \text{ г/см}^3$ и максимальной удельной энергии прессования, равной 10 кДж/кг .

6. Смоделирован трехстадийный процесс прессования графитопластовой композиции с использованием методов теории пластичности, включающий уравнения, описывающие сопротивление внедрения твердых компонентов в

мягкую компоненту, формирование контактных площадок и заполнения пространства между ними с последующим объемным сжатием композиции.

7. Установлены закономерности обработки давлением новых графитопластовых композиций для получения изделий заданной формы, размеров и плотности.

Значения результатов для теории состоит в том, что созданы теоретические предпосылки в разработке инновационных технологий прессования материалов на основе графита для изделий электротехнического назначения. Разработанные в диссертации расчетные методы, механическая и реологическая модели способствуют развитию моделирования процессов прессования композиций на основе графита и проектирования новых видов оборудования (машин и устройств) как для статической, так и для динамической обработки давлением указанных материалов.

Практическая ценность работы заключается в разработке:

- в разработке нового эффективного энергосберегающего технологического процесса подготовки к прессованию порошка искусственного графита и порошка новолачной смолы, а также оригинальной конструкции смесителя, защищенной патентом РФ;

- в разработке новых способов формования блоков электрощеток из графитопластовых материалов при повышенном до 40 МПа удельном давлении, выдержанных под нагрузкой, позволяющих получать блоки повышенной плотности. Способы защищены патентами РФ;

- в разработке новых конструкций пресс-форм для прессования блоков электрощеток из графитопластовых материалов, защищенных патентами на полезные модели РФ;

- в разработке и освоении новой эффективной промышленной технологии получения блоков по новым способам и новых пресс-формах в условиях предприятия ООО «Графитопласт» (г. Челябинск);

- в разработке новой конструкции блоков и пресс-формы для получения заготовок электрощеток из графитопластовых материалов, защищенных патентами РФ;

- в разработке новых способов и конструкций одно- и многоместных пресс-форм для получения изделий из графитопластовых композиций, защищенных патентами РФ.

Реализация работы.

Конструкторско-технологические разработки внедрены в ООО «Графитопласт» (г. Челябинск), ООО ПКФ «АРМА» (г. Челябинск), ООО ПКФ «Аверс» (г. Челябинск), АО «ВРК-2» ВЧДР (г. Челябинск). В ООО ПКФ «Аверс» была продана лицензия. Внедрение результатов работы позволило получить экономический эффект более 76 млн. руб.

Апробация работы.

Работа обсуждалась на научно-технических семинарах кафедры ПИ-МОМД ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», объединенном семинаре кафедр Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. Основные результаты исследований и конструкторско-технологических разработок доложены на всероссийских и международных научно-технических конференциях: The Annual World Conference on Carbon, June 17 – 22, 2012г., Krakow, Poland; IV Международный конгресс «Цветные металлы», 5–7 сентября 2012г., г. Красноярск; VII Международный симпозиум «Фундаментальные и прикладные проблемы науки», 11–13 сентября 2012 г., с. Непряхино, Челябинская обл.; XIV Международная конференция «Новые технологии и достижения в металлургии и инженерии материалов и процессов», 6–7 июня, 2013 г., г. Ченстохова, Польша; VII Международная конференция «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении», 26–30 ноября, 2013г., УрФУ, г. Екатеринбург, Россия; Sino-Russian Symposium on Advanced Materials and Processing Technology, 4–5 июня, 2014 г., Qingdao, China; 9-ая Международная конференция «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология», 28–31 октября, 2014 г., г. Троицк, Московская область; XVI Международная научная конференция «Новые технологии и достижения в металлургии и инженерии материалов и процессов», 28–29 мая, 2015 г., г. Ченстохова, Польша; 10-ая Международная конференция «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология», 6–9 июня, 2016 г., г. Троицк, Московская область; XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии: «Аддитивные технологии», 27–30 сентября, 2016 г., г. Екатеринбург; 11-ая Международная конференция «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология», 29 мая–1 июня, 2018 г., г. Троицк, Московская область; ежегодные научно-технические конференции ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» (2000–2018 гг.).

Публикации. Результаты работы изложены в 82 печатных работах. Из них: 34 научных публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 11 научных публикаций в изданиях, регистрируемых в международных наукометрических базах (web of Science или Scopus), 1 монография, 1 статья в других изданиях, 35 патентов РФ.

Личный вклад автора

Постановка научной проблемы, методы решения, основные научные результаты полностью принадлежат автору. Разработана концепция совершенствования известных способов и устройств статического прессования изделий электротехнического назначения из материалов на основе графита с учетом их реологических особенностей. Разработаны новые теоретические принципы создания процессов прессования композиций на основе графита при высокоэнергетическом нагружении с учетом адиабатичности процесса и температурно-

скоростных факторов. Реализация оригинальных теоретических результатов и экспериментальных исследований на производственных предприятиях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, 5 приложений и изложена на 331 странице текста, содержит 115 рисунков, 42 таблицы и список использованных литературных источников из 310 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы совершенствования существующих и разработки новых способов и устройств получения изделий электротехники из порошковых композиций на основе углерода, повышения их качества и снижения себестоимости, сокращения расхода материалов и энергии, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлена структура диссертации и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе *«Современное состояние теории и процессов статического и высокоэнергетического формования изделий электротехники из углеграфитовых и графитопластовых материалов»* рассмотрено современное состояние теории и практики в области получения изделий из порошковых композиций на основе углерода.

Выполнен анализ известных способов и устройств для получения изделий электротехнического и конструкционного назначений из порошковых композиций на основе углерода.

Результаты анализа свидетельствуют, что при всем многообразии известных способов получения изделий из композиций на основе углерода приоритетным остается способ компактирования в пресс-формах.

Обоснована целесообразность разработки теории, инновационных процессов статического и высокоэнергетического формования изделий электротехники из графитопластовых композиций на основе их реологических особенностей, новых способов и устройств.

Определены цели и задачи исследований.

Во второй главе *«Развитие научных исследований процессов компактирования порошковых материалов»* показано, что одной из важных научных задач при компактировании порошковых углеродных композиций является установление зависимости параметра плотности прессовки от величины приложенного усилия или энергии деформации. Такие зависимости плотности прессовок от давления или энергии прессования в порошковой металлургии принято называть уравнениями прессования.

В настоящее время в теории прессования порошковых материалов получены и используются уравнения прессования логарифмического, экспоненциального, степенного и других типов. Эти уравнения в основном отражают закономерности прессования металлических, керамических, металлокерамических и неметаллических материалов. Причем некоторые авторы свои уравнения прес-

сования позиционируют как универсальные, независимо от технологических и физических свойств порошковой композиции и скоростных условий процесса компактирования. Однако экспериментальные исследования процесса прессования графитопластовых композиций показали, что попытки использовать для расчетов уравнения прессования М.Ю. Бальшина и других авторов к положительным результатам не приводят.

Несмотря на большой объем проводимых отечественными и зарубежными авторами исследований в области изготовления изделий из углеграфитовых материалов, основное внимание уделяется изучению физического и химического взаимодействия компонентов полидисперсной композиции. Однако информация об уравнениях прессования графитопластовых смесей в научнотехнической литературе отсутствует, поэтому в рамках настоящей работы были выполнены промышленные экспериментальные исследования по компактированию графитопластовых смесей на ООО «Графитопласт» (г. Челябинск).

В качестве наполнителя использован «Графит искусственный измельченный» по ТУ 1916-109-71-2000, изготовленный из отходов электродного производства ОАО «ЭНЕРГОПРОМ – ЧЭЗ», размолотых на шаровой мельнице. В качестве связующего использована порошковая фенолформальдегидная смола марки СПФ-011А по ТУ 6-05751768-35-94, содержащая от 6 до 9 мас. % уротропина (отвердителя). Исходная графитопластовая композиция для исследований включала наполнителя 86 мас. % и связующего с уротропином 14 мас. %. Процесс прессования смеси выполнялся в нагретой до 170–180 °С матрице прессформы. Скорость пуансона при прессовании находилась в пределах от 15 до 30 мм/с. Максимальное давление прессования достигало 50 МПа. По экспериментальным значениям усилий и плотности построено уравнение прессования.

Это уравнение может быть представлено математической формулой поллитропы $\rho = \rho_n + np^m$, где ρ , ρ_n – текущая и насыпная плотность; n , m – эмпирические коэффициенты, зависящие от гранулометрического состава частиц графита в смеси и содержания связующего; p – давление прессования.

Публикации по реологическим уравнениям и реологическим моделям при компактировании графитопластовых композиций в технической литературе отсутствуют. Допущение о том, что контактные усилия между частицами порошка в процессе компактирования остаются постоянными, принято быть не может. Не принимаются диссертантом и теории прессования порошковых материалов, основанные только на механическом силовом взаимодействии частиц порошка. Для графитопластовых материалов при горячем компактировании большее значение по сравнению с механическим взаимодействием частиц наполнителя имеют физическое и химическое взаимодействия частиц наполнителя и связки.

Известная реологическая модель Леттерзиха, описывающая упруговязкий процесс горячего компактирования коксопековой композиции, включающей в качестве наполнителя 65 % кокса и 5 % графита и в качестве связки 30% ка-

менноугольного пека, не может быть использована для описания горячего компактирования графитопластовых композиций. Во-первых, кокс и пек существенно отличаются по механическим, физическим и химическим свойствам от графита и новолачной смолы. Во-вторых, коксопексовая композиция содержит очень много (30 %) связки и поэтому проявляет вязкие свойства. Модель Леттерзиха не содержит реологических уравнений и не является термомеханической, поэтому механическое поведение прессуемого материала не зависит от температуры. Модернизированная реологическая модель представлена на рис. 1.

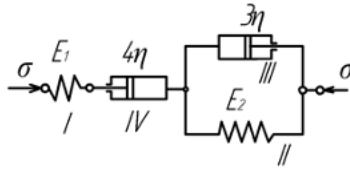


Рисунок 1 - Модернизированная реологическая модель

Последовательное соединение упругого I (рис. 1) и вязкого III элементов характеризует известное уравнение состояния среды Максвелла. Складывая скорости деформации простых упругой и вязкой сред при одном напряжении, будем иметь $\frac{d}{dt} = \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{3\eta}$. Для описания таких явлений, как последействие и релаксация в процессе горячего прессования графитопластовой композиции, будем иметь записи: $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \sigma_0 \frac{t}{3\eta}$, $\sigma(t) = \sigma_0 \exp\left[-\frac{tE}{3\eta}\right]$. Параллельное соединение упругого элемента II (рис. 1) и вязкого элемента III дает сумму напряжений в каждом элементе: $\sigma = E\varepsilon + 3\eta \frac{d\varepsilon}{dt}$. Данное уравнение описывает известную пластическую упруговязкую среду Фойхта, учитывающую свойство наследственности графитопластовой композиции.

Дальнейшие исследования по получению уравнения прессования в процессах холодного высокоэнергетического компактирования графитопластовых композиций, составы которых даны в табл. 1, выполнены с использованием высокоскоростного пресса конструкции фирмы Hydropulsor. Энергия компактирования изменялась от 212 до 2247 Дж, скорость бояка массой 350 кг – от 1,1 до 3,58 м/с.

Таблица 1

Составы графитопластовых композиций

Номер состава	Графит искусственный, %	Медь, %	Смола марки СФП-011А, %	Кокс марки КГН, %	Стеарат цинка, %
1	100	-	-	-	-
2	86	-	14	-	-
3	76	10	14	-	-
4	71	-	14	15	-
5	71	-	14	10	5

В результате проведенных исследований установлено, что уравнение прессования при высокоэнергетическом компактировании описывается также формулой политропы в виде: $\rho = \rho_0 + ne^m$, где n , m – коэффициенты; e – удельная энергия прессования. Однако более углубленное описание процесса высокоэнергетического прессования графитопластовой композиции в общем случае требует знания деформирующего усилия, которое определяется взаимодействием фрагментов этой композиции.

В настоящей работе рассматривается изменение удельных усилий, действующих на поверхностях контакта между твердой (частица графита) и мягкой (фрагмент пластичной связки) составляющими композиции в процессе прессования. Условно процесс прессования разделим на три стадии. На первой стадии происходит сближение твердых компонентов композиции путем внедрения твердых составляющих в мягкую компоненту и заполнения пространства между ними. На второй стадии твердые компоненты входят в контакт между собой, упруго деформируются с формированием контактных площадок. Одновременно с упругой деформацией твердых составляющих уплотнение структуры композиции реализуется за счет заполнения пространства, примыкающего к контактным площадкам.

На третьей стадии реализуется объемное сжатие композиции в соответствии с ее объемным модулем упругости.

Допускаем, что на контакте между фрагментами графитопластовой композиции распределение контактных давлений между фрагментами графитопластовой композиции соответствует эпюре, приведенной на рис. 2.

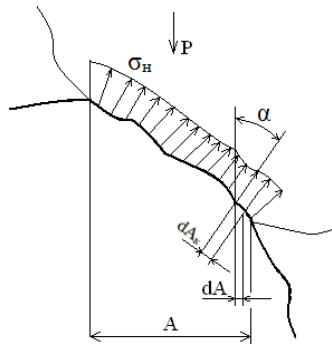


Рисунок 2 – Эпюра контактных давлений на поверхности твердой составляющей графитопластовой композиции

Определение величины внешнего усилия P_e , действующего по всей контактной поверхности единичного фрагмента композиции, сводится к интегрированию функции распределения контактного давления P_k по поверхности контактной площадью A , т.е.:

$$P_e = \iint_A P_\kappa dA. \quad (1)$$

Упрощения решений достигается путем аппроксимации реальной формы контактирующих поверхностей упрощенными геометрическими формами: шаровой, цилиндрической, гиперболической, гиперболоидом вращения, параболической, эллиптической и др.

Рассмотрим решение интеграла (1) применительно к аппроксимированной форме твердого фрагмента композиции в виде шара.

Принимая распределение нормальных давлений на поверхности шаровидного контакта при отсутствии трения в соответствии с формулой О.Д. Томленова и выражая угол α (рис. 3а) через радиус шаровой поверхности R и расстояние от точки, в которой рассматривается контактное давление до оси шаровой контактной поверхности ρ , измеряемое в плоскости, перпендикулярной к направлению приложения внешнего усилия (рис. 3), запишем интеграл (1) в виде:

$$P_e = \iint_A \sigma_S \left(1 + \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{\rho}{R}\right) \rho d\rho d\gamma, \quad (2)$$

где σ_S - предел текучести мягкой составляющей композиции;

γ - полярная координата (рис. 3б).

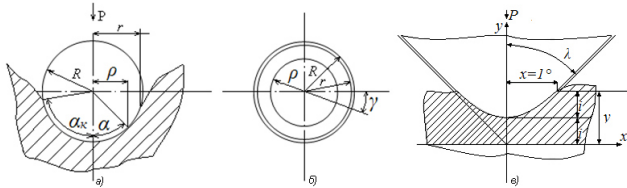


Рисунок 3 – Схема формирования контактной поверхности при внедрении твердой в мягкую составляющую композиции: а) шаровая поверхность; б) поперечное сечение контактной поверхности; в) гиперболическая поверхность

Вычисляя интеграл (2) в пределах от $\gamma=0$ до $\gamma=2\pi$ и по радиусу от $\rho=0$ до $\rho=r$ (рис. 3б), запишем окончательно:

$$P_e = \pi r^2 \sigma_S \left[1 + \frac{\pi}{2} - \left(1 - \frac{R^2}{2r^2}\right) \arcsin \frac{r}{R} - \frac{R}{2r} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)^{1/2} \right]. \quad (3)$$

Максимальное усилие, развиваемое шаровидной твердой компонентой при внедрении в мягкую компоненту на величину половины своего размера, т.е. на величину своего радиуса ($r=R$), составляет:

$$P_e = \pi R^2 \sigma_S \left(1 + \frac{\pi}{4}\right). \quad (4)$$

Относя усилие P_c к площади проекции контакта на плоскость, перпендикулярную направлению приложения внешней нагрузки, определяем удельное усилие прессования:

$$P_y = \sigma_S \left(1 + \frac{\pi}{4}\right) \approx 1,785\sigma_S. \quad (5)$$

В диссертации показана возможность моделирования формы площадки контакта твердой и мягкой составляющих композиции гиперboloидом вращения, профиль которого описывается зависимостью:

$$y^2 - x^2 ctg^2 \lambda = i^2, \quad (6)$$

где: x и y – координаты гиперболы по соответствующим осям (рис. 3в);
 λ – угол между асимптотой и осью гиперболы;
 i – постоянная гиперболы.

Поскольку при аппроксимировании фрагментов контактной поверхности шаровой или гиперболической формой имеет место аппроксимация телом вращения, то сопротивление внедрения твердой компоненты композиции в мягкую определяется зависимостью (3) подстановкой в нее величины $\frac{r}{R}$ в виде:

$$\frac{r}{R} = \frac{i^2 tg^2 \lambda (y^2 - i^2)^{1/2}}{[(1 + tg^2 \lambda) y^2 - i^2]^{3/2}}. \quad (7)$$

Аппроксимация фрагментов контактной поверхности гиперboloидом является более универсальной, т.к. при $i=0$ ее форма моделируется формой конуса с острой вершиной, а при $i \neq 0$ формой гиперboloида вращения с радиусом скругления при вершине $R = itg^2 \lambda$, однако вызывает определенные сложности при детерминировании параметров i и λ .

Описанный метод оценки давления при прессовании учитывает только сопротивление внедрения твердых компонентов в мягкие, но не учитывает сопротивления заполнению мягкой составляющей пространства между твердыми составляющими.

Используя условие несжимаемости компонентов среды, задачу по заполнению мягкой составляющей пространства между твердыми решаем методом суперпозиции двух плоских процессов, протекающих во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Для определения давления для затекания мягкой составляющей в сужающиеся зазоры между твердыми составляющими воспользуемся зависимостью И. Бочарова:

$$p = \frac{4\sigma_S}{\sqrt{3\pi}} \left[3\alpha \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{y_i}{\Delta}} \right) + \frac{bS}{h} + c \right], \quad (8)$$

где:

$$a = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{S}{l}\right) + \left[1 - \frac{1}{2} \sqrt{1 - \left(\frac{S}{l}\right)^2}\right] \left(\frac{S}{l}\right);$$

$$b = \frac{\pi}{2} + \arcsin\left(\frac{S}{l}\right) + \left[\frac{2}{3} \left(\frac{S}{l}\right) + \frac{1}{3} \left(\frac{S}{l}\right)\right] \sqrt{1 - \left(\frac{S}{l}\right)^2};$$

$$c = \pi - 2 \arcsin\left(\frac{S}{l}\right) - 2 \left(\frac{S}{l}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{S}{l}\right)^2};$$

S – максимальный размер единичного очага деформации (по оси x);
 l – расстояние между центрами смежных очагов деформаций по оси x ;
 h – протяженность очага деформации по оси y .

B процессе прессования возможно возникновение двух схем плотной упаковки: с расположением центров твердых составляющих в трех взаимно перпендикулярных плоскостях и со смещением их центров на величину радиуса их размера (рис. 4).

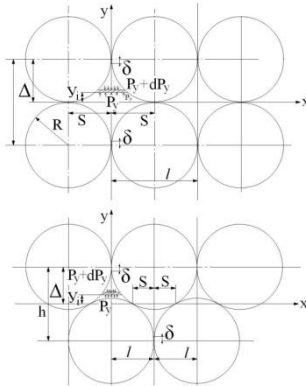


Рисунок 4 – Схемы плотной упаковки твердых составляющих композиции

Для первой схемы имеем: $S=R$; $l=2R$; $\Delta=R$; $h=2R$. Подстановкой этих значений в уравнение (7) получаем: $a=0,8066$; $v=2,094$ и $c=1,228$.

Вторая схема характеризуется следующими параметрами: S, l, Δ и h : $S=R/2$; $l=R$; $h=1,73R$; $\Delta=0,866R$. Таким параметрам соответствуют: $a=0,8066$; $v=2,094$; $c=1,228$.

Давление, необходимое для заполнения мягкой составляющей пространства между твердыми компонентами композиции, соответственно для первой и второй схем компоновки твердых составляющих равно:

$$p_1 = \frac{4\sigma_S}{\sqrt{3}\pi} \left[2,42 \ln\left(\frac{1}{1 - \frac{y_i}{\Delta}}\right) + 2,27 \right], \quad (9)$$

$$p_2 = \frac{4\sigma_S}{\sqrt{3}\pi} \left[2,42 \ln\left(\frac{1}{1 - \frac{y_i}{\Delta}}\right) + 1,83 \right]. \quad (10)$$

Поскольку в процессе прессования все твердые компоненты входят в контакт между собой, то под действием сжимающего усилия смоделированные сферической формой твердые компоненты, формируют площадки контакта в форме круга радиусом δ , который в соответствии с контактной задачей Герца для одинаковых размеров твердых частиц композиции определяется формулой:

$$\delta = 0,88 \sqrt[3]{\frac{P_{iR}}{E}}, \quad (11)$$

где R – радиус контактирующих сферических тел;

E – модуль упругости материала контактирующих тел;

P_i – нагрузка, сжимающая сферические тела.

При прессовании композиции максимально возможную сжимающую нагрузку выразим через твердость и размер контактной площадки:

$$P_i = HB \cdot \pi \delta^2, \quad (12)$$

где HB – твердость материала твердой компоненты;

Подстановкой значения P_i в уравнение (11) и преобразованием его относительно параметра δ получаем:

$$\delta = \frac{0,681\pi HBR}{E}. \quad (13)$$

С учетом контактной деформации твердых составляющих максимальное значение параметра y_i в формулах (9 и 10) составляет:

$$y_i = \left(1 - \frac{0,681\pi HB}{E}\right) R. \quad (14)$$

Давление по первой и второй схемам плотной упаковки твердых компонентов с учетом (14) равно:

$$p_1 = \frac{4\sigma_s}{\sqrt{3}\pi} \left[2,42 \ln \left(\frac{0,467E}{HB}\right) + 2,27\right], \quad (15)$$

$$p_2 = \frac{4\sigma_s}{\sqrt{3}\pi} \left[2,42 \ln \left(\frac{0,404E}{HB}\right) + 1,83\right]. \quad (16)$$

Поскольку в реальных условиях прессования графитопластовой композиции расположение твердых составляющих возможно по разным схемам, то расчет рекомендуется выполнять по усредненным значениям давлений:

$$p = 1,47\sigma_s \left[2,42 \ln \left(\frac{0,435E}{HB}\right) + 2,05\right]. \quad (17)$$

Энергия формовочной машины затрачивается на диссипацию энергии в очаге деформации композиции.

$$\mathcal{E} = \int_0^L p \cdot A \cdot dL, \quad (18)$$

где p - давление, необходимое для заполнения мягкой составляющей пространства между твердыми компонентами;

A – площадь прессования композиции в плоскости, перпендикулярной приложению внешней нагрузки.

L – путь, проходимый бойком от начала до конца прессования.

Если допустить прямо пропорциональную зависимость между усилием прессования и перемещением пуансона, то диссипация энергии определится среднеинтегральным значением:

$$\Theta = \frac{2\sigma_S}{\sqrt{3}\pi} \left[2,42 \ln \left(\frac{0,435E}{HB} \right) + 2,05 \right] (L_n - L_k) \cdot A, \quad (19)$$

где L_n - начальная высота засыпки смеси в матрице, м;

L_k - конечная высота спрессованной композиции, м.

Для изделий простой формы без переходов в плоскости оси прессования имеем выражение:

$$L_n - L_k = \frac{m}{S_{дет.}} \left(\frac{1}{\rho_n} - \frac{1}{\rho_k} \right), \quad (20)$$

где $S_{дет.}$ - площадь проекции изделия на плоскость, перпендикулярную оси приложения нагрузки при прессовании, м²;

ρ_n – плотность графитопластовой композиции в начальный момент прессования, кг/м³;

ρ_k – плотность графитопластовой композиции в конечный момент прессования, кг/м³;

m – масса изделия, кг.

Объединяя выражения (19) и (20), получим формулу для расчета уплотнения деталей простой формы.

$$\frac{1}{\rho_n} - \frac{1}{\rho_k} = \frac{\sqrt{3}\pi\Theta S_{дет.}}{2\sigma_S m \left[2,42 \ln \left(\frac{0,4E}{HB} \right) + 2,05 \right]}. \quad (21)$$

Расчетные значения величины возможного уплотнения графитопластовой композиции при заполнении всех пространств между твердыми компонентами при заполнении всех пространств между твердыми компонентами составляют 1,85 г/см³ и завершаются после первой и второй стадии при энергии 10,064 кДж/кг (рис. 5).

В дальнейшем, на третьей стадии, закономерность соответствует упругому объемному сжатию композиции и возрастанию ее плотности пропорционально отношению энергии формования к модулю объемной деформации – $E/3(1-2\mu)$, где E и μ – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона композиции.

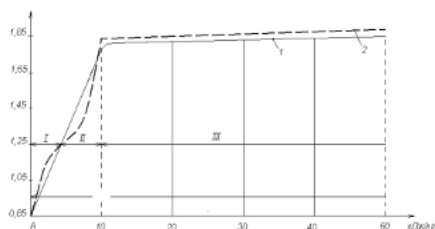


Рисунок 5 – Кривая высокоэнергетического уплотнения графитопластовой композиции: 1 – эксперимент, 2 – расчет; I, II и III – соответственно первая, вторая и третья стадии уплотнения композиции

Полученные результаты использованы на стадии проектирования технологического процесса прессования изделий из графитопластовой композиции.

В третьей главе «Инновационные способы, технологии и устройства для производства блоков и щеток электрических машин» описаны операции подготовки смеси и компактирования блоков и щеток.

Важнейшей операцией приготовления графитопластовой композиции для прессования является смешивание наполнителя со связующим.

В рамках диссертации разработаны новые запатентованные диссертантом способ и смеситель (Пат. №161533).

По заданию ООО «Графитопласт» диссертантом были выполнены специальные исследования по обоснованию возможности исключения из технологии приготовления композиций для прессования электрощеток процесса вальцевания смешанных смесей из графитопластовых композиций.

Кроме того, для получения электрощеток предложены новые способы прессования блоков и разработаны новые конструкции пресс-форм (Пат. №2267411, №2560619, №2560490).

Для примера на рис. 6 приведена одна из конструкций пресс-формы. Увеличение объема удаляемых газов из свободного пространства между рабочей поверхностью пуансона, поверхностью засыпки и из засыпки может быть достигнуто, если матрица пресс-формы по высоте выполнена составной и нижняя ее часть, равная 1/5 высоты матрицы, изготовлена из высокопрочной инструментальной стали, а верхняя ее часть изготовлена из порошковой нержавеющей стали и имеет пропорционально изменяющуюся по высоте пористость, равную 48–50% у верхнего торца матрицы и 30–32% у нижнего торца, при этом наружные поверхности верхней части матрицы наклонены к ее нижней торцевой поверхности под углом 82–84°.

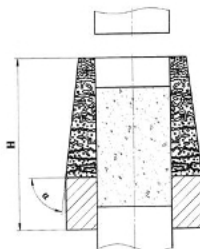


Рисунок 6 - Пресс-форма для прессования блоков электрощеток
(Пат №137489)

Из результатов выполненных диссертантом исследований установлено, что для получения прессованных щеток с однородной плотностью без дефектов и трещин необходимо строго соблюдать режим прессования, который определяется давлением прессования, температурой нагрева инструмента и изделия, временем выдержки изделия при конечном рабочем давлении. Кроме того, на режим прессования влияет ряд других факторов. С учетом этого разработаны пресс-формы с изменяющимися размерами полости (Пат.№№121763) и новый способ изготовления щеток (Пат.№130528).

Для повышения плотности, прочности и износостойкости щеток разработан способ, включающий операцию десорбции смеси перед операцией формования щетки. Удаление паров и газов из порошковых графитопластовых композиций выполняется в пресс-форме специальной конструкции (Пат.№130528). Отказ от блочной технологии производства электрощеток многократно снизил трудоемкость процесса и длительность операций получения щеток.

На уровне изобретений предложены также новый способ прессования электрощеток и новая многоместная пресс-форма для его осуществления (Пат.№115261, №2510309).

Использование предложенных технических решений дает возможность проработать рабочую поверхность щетки, увеличив ее плотность, износостойкость и прочность, снизить удельное электросопротивление.

В четвертой главе *«Способы и технологии изготовления контактных вставок и головок токосъемников троллейбусов»* представлены новые составы порошковых композиций, новые конструкции вставок и новые способы их получения.

Приведена классификация контактных вставок по конструкции, по материалам вставок, составам смесей вставок, изготавливаемых из порошковых композиций.

Разработан новый состав графитопластовой композиции для вставок токосъемников троллейбусов (Пат.№2656375). Выполнен большой объем исследований и разработан новый состав смеси. Оптимальное содержание в смеси при

горячем прессовании: графита – 86 % и связки – 14 %, содержащей не менее 6 % уротропина.

На этом составе смеси выполнены исследования и разработана опытная технология горячего изотермического прессования вставок, включающая операцию выдержки прессовки в матрице пресс-формы после прессования.

Показатели свойств вставок токосъемников, полученных по этой технологии приведены в табл. 2.

Таблица 2

Показатели свойств готовых вставок токосъемников

Показатель	Диапазон значений
Плотность изделий, г/см ³	1,55–1,60
Прочность на сжатие, МПа	30–35
Прочность на изгиб, МПа	15–20
Твердость по Шору	25–30
Удельное электрическое сопротивление, мкОм·м	50–60

Разработанная технология была использована при организации сначала опытно-промышленной, а затем промышленной технологии производства графитопластовых вставок токосъема электроподвижного состава на предприятии ООО «Графитопласт».

Выполнен анализ самых известных контактных вставок токосъемников троллейбусов и разработаны новые их конструкции, изготавливаемые способом горячего прессования графитопластовых смесей, включающих искусственный графит, новолачную фенолформальдегидную смолу и уротропин. В отличие от известных конструкций вставок, изготавливаемых из смесей, содержащих кокс и технический углерод, вызывающих хрупкость вставок и сколы торцов, а также увеличивающих силы трения и износ вставок и провода, графитопластовые смеси не приводят к хрупкости и быстрому износу вставок и провода.

Исследования показали, что формование желоба и бортиков при прессовании вставок выполняется в различных деформационных и силовых условиях. Это приводит к возникновению в них в процессе формования неоднородного напряженно-деформированного состояния с остаточными растягивающими напряжениями, что выражается на готовых изделиях в пониженной плотности и прочности бортиков вставок токосъемников троллейбусов.

Для повышения плотности, прочности и износостойкости бортиков вставок и разработана новая конструкция вставки (Пат №120052).

Испытания износостойкости новых вставок, выполненные на стенде Гортранса города Челябинска, показали, что стойкость бортиков вставок по сравнению с обычной вставкой увеличивается в 1,5–1,8 раза при том же составе порошковой композиции.

Диссертантом на уровне изобретений были разработаны новые способы прессования, устройства и пресс-формы при изготовлении вставок (Пат.№2494835).

Существенным недостатком традиционного способа получения вставок является низкая производительность. Для устранения этого недостатка немецкая фирма Schunk Kohlenstofftechnik получает длинномерные полуфабрикаты для контактных вставок троллейбусов из углеродных смесей горячим выдавливанием. После выдавливания полученный полуфабрикат делят на отдельные заготовки. Этот способ в связи с непрерывностью его осуществления повышает производительность способа.

Так как в этом способе производят выдавливание несимметричного профиля, то очень сложно совместить ось приложения усилия прессования с геометрической осью центра тяжести формируемого профиля заготовки контактной вставки, а малейшее отклонение этих осей вызывает изгиб заготовки по длине, неоднородность по сечению поля напряжений, что снижает качество получаемых заготовок.

Кроме этого, выдавливание через мундштук только одной заготовки вставки снижает производительность способа.

Задачей нового способа является повышение качества получаемых контактных вставок путем устранения изгиба по длине и повышения плотности и прочности их рабочих профильных поверхностей. Поставленная задача решается тем, что в новом способе получения контактных вставок троллейбусов выдавливание полуфабриката ведут в виде двух обращенных друг к другу своими подошвами заготовок вставок с противоположащими рабочими профильными поверхностями, и при выдавливании порошковую композицию разделяют рассекателем вдоль оси выдавливания на две заготовки вставок, а после выхода из мундштука профильные поверхности заготовок калибруют с обжатием 5–10% в четырехвалковом калибре, образованном двумя гладкими и двумя приводными калиброванными противоположащими валками (рис. 7).

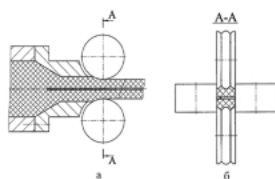


Рисунок 7 - Способ получения полуфабрикатов для скользящих контактов троллейбусов: а – общий вид линии по получению контактных вставок; б – сечение А–А (Пат. №2508177)

Калибровка профильных поверхностей симметричного профиля в четырехвалковом калибре позволяет повысить плотность, твердость и прочность

профильной поверхности на глубину от 3 до 5 мм, а также проработать всю структуру заготовки вставки, что улучшает качество за счет снижения неоднородности поля напряжений по ее сечению. Одновременное выдавливание двух заготовок повышает производительность способа (рис. 19).

Для повышения плотности получаемых заготовок разработана новая пресс-форма для прессования порошков (Пат.№121762). Она снабжена механизмом регулирования угла поворота боковин со скошенными концами в виде контактирующих с ними эксцентриков и упругими элементами возврата указанных боковин в исходное положение (рис. 8).

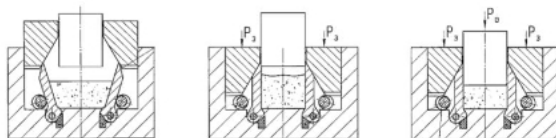


Рисунок 8 - Пресс-форма для прессования порошков: а – после окончания засыпки; б – после окончания подпрессовки; в – после окончания прессования

Предложенные способы и устройства позволили существенно повысить эксплуатационные характеристики контактных вставок и головок токосъемников троллейбусов.

В пятой главе *«Токосъемные элементы рельсового электротранспорта, их конструкции, способы и устройства для получения»* дана классификация, конструкции токосъемных элементов, описаны новые способы и устройства для их получения (Пат.№2229395, №133058).

В частности, разработана новая графитопластовая контактная вставка со сниженной материалоемкостью и повышенной износостойкостью. Промышленное производство усовершенствованной конструкции углеродных вставок освоено на ООО «Графитопласт» (г. Челябинск). Внешний вид отдельных частей вставки показан на рис.9.



Рисунок 9 - Внешний вид центральной и боковой частей углеродной вставки

Новый способ прессования электротехнических изделий (Пат.-№2567083) позволяет решить важную задачу по повышению плотности, прочности и износостойкости вставок токосъемников рельсового электротранспорта.

Эта задача решается тем, что в способе прессования электротехнических изделий из порошковых композиций на основе углерода, включающем горячее прессование порошковой композиции с удельным давлением 50–100 МПа при скорости прессующего пуансона 15–30 мм/с, согласно предлагаемому решению проводят предварительное горячее прессование порошковой композиции при

скорости пуансона 10–12 мм/с с удельным давлением 20–30 МПа и с последующей выдержкой при этом давлении в течение 0,5–1,5 мин. Это (после основного прессования) повысит плотность получаемых изделий, их прочность и износостойкость.

Разработана новая пресс-форма для прессования контактных вставок токосъемников электроподвижного рельсового транспорта (Пат№140319).

В шестой главе *«Исследования и разработка процессов высокоэнергетического компактирования графитопластовых порошковых композиций»* представлены материалы по исследованиям грануло-морфологического состава графитопластовых композиций их высокоэнергетического компактирования, разработке новых процессов и электронномикроскопическом исследовании прессовок, уплотненных при скоростях 0,03 и 3 м/с. Исследования выполнены на грануломорфометре ALPAGA 500 NANO и электронном микроскопе TESCAN VEGA.

Устройство ALPAGA 500 NANO снабжено оригинальным программным обеспечением Callisto, которое позволяет определять диаметр ячейки сита, округлость, удлинение и другие параметры для частиц с размерами от 0,5 до 2500 мкм.

К особенностям микроскопа TESCAN VEGA относятся: потребность в малом объеме порошка для исследований, высокая скорость выполнения исследований (более 10000 частиц в минуту), повторяемость операций, возможность в ходе исследований корректировать результаты в программе Callisto.

При исследовании порошки сравнивались по следующим параметрам: зависимость диаметра отверстия сита от объема, удлинения, округлости.

Показатель округлости определяет, насколько форма реальной частицы порошка отличается от идеально круглой формы (рис. 10а).

Внутреннее удлинение $El = \frac{D_A - D_B}{D_A}$ – это нормированное отношение диаметров эллипса Лагранжа (рис. 10б).



Рисунок 10 - Исследование морфологии: а – на основе округлости; б – на основе внутреннего удлинения

Фотография, сделанная на электронном микроскопе (рис. 11), позволяет визуально оценить характерные размеры и форму частиц, а также однородность смеси.

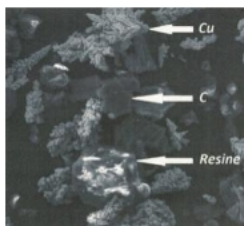


Рисунок 11 - Электронная фотография смеси при увеличении в 1000 раз

В диссертации приведены диаграммы рассеяния диаметров частиц в объеме порошка и диаграммы рассеяния размеров удлинения частиц в объеме порошка для различных композиций.

Новые исследования процессов высокоэнергетического компактирования графитопластовых композиций. Исследования процессов высокоэнергетического компактирования графитопластовых композиций выполнялись на высокоскоростном газогидравлическом прессе марки НУР35-18 конструкции шведской фирмы Hydropulsor, на башенном копре конструкции американской фирмы Instron марки CEAST 9350. Параметры этого оборудования приведены в табл. 3.

В ходе проведения экспериментов исследовалось влияние величины энергии, скорости бойков, количества ударов, а также массы падающих частей на плотность цилиндрических прессовок, их структуру и физико-механические свойства. В серии опытов получали образцы диаметром $d_{\text{п}} = 50\text{мм}$, высотой $h_{\text{п}} = 8\text{--}13\text{мм}$, массой $M_{\text{п}} = 41\text{ г}$. Энергия удара $E_{\text{б}}$ изменялась в диапазоне 212–2247 Дж, что соответствовало изменению скоростей бойков $v_{\text{б}}$ в диапазоне 1,10–3,58 м/с, при массе падающих частей $M_{\text{б}} = 350\text{ кг}$. В табл. 4 приведена программа исследований.

Таблица 3

Параметры компактирующего оборудования

Марка оборудования	Макс. энергия удара, Дж	Масса падающих частей, кг	Диапазон скоростей удара, м/с	Работа в режиме пульсаций	Предел измерения силы удара, тс
НУР 35-18	18000	350	1–11	Да	-
Instron CEAST 9350	1800	5–70	0,77–24	Нет	40

Таблица 4

Программа исследований

Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Расстояние, мм	2,1	2,5	2,9	3,8	5	6,5	8	9,6	11,8	13,4	15
Энергия, Дж	212	394	632	816	1008	1230	1450	1657	1892	2074	2247
Скорость, м/с	1,1	1,5	1,9	2,16	2,40	2,65	2,88	3,08	3,29	3,44	3,58

В результате исследований компактирования на прессе Hydropulsor из порошка графита цилиндрических образцов при энергии формования 212–1892 Дж и скорости пуансона 1,10–3,29 м/с получили следующее:

- при формировании образцов из композиций «графит + смола» со значениями энергии и скоростей, указанными в табл. 4, дефектов обнаружено не было;

- при повышении энергии формования и скорости пуансона наблюдается устойчивая закономерность повышения плотности прессовок от 1,60 до 1,76 г/см³;

- формирование образцов из композиции «графит + связка + порошок меди» со значениями энергий и скоростей, приведенных в табл. 5, проблем не вызвало.

Качество полученных заготовок высокое.

По полученным значениям скоростей пуансонов и плотностей прессовок (табл. 5) построена графическая зависимость плотностей прессовок от значений скоростей и удельной энергии компактирования (рис. 12).

Таблица 5

Характеристики процесса компактирования образцов из композиции «графит+смола» и «графит+смола + порошок меди»

Номер образца	Число образцов	Энергия, Дж	Удельная энергия, Дж/г	Скорость, м/с	Диаметр образца, мм	Высота, мм	Плотность, г/см ³
Графит + смола							
5		394	9,57	1,50	50,35	12,93	1,60
6		632	15,32	1,90	50,34	12,75	1,62
7		816	19,83	2,16	50,30	12,68	1,63
8		1008	24,44	2,40	50,26	12,38	1,68
9		1230	29,84	2,65	50,24	12,26	1,69
10		1450	35,21	2,88	50,18	12,15	1,72
11		1657	40,22	3,08	50,16	12,08	1,73
12		1892	45,88	3,29	50,15	11,99	1,74
13		2074	50,34	3,44	50,15	11,97	1,75
14		2247	54,46	3,58	50,14	11,84	1,76
Графит + смола + порошок меди							
15		1450	35,25	2,88	50,13	7,97	2,62
16		1892	45,94	3,29	50,10	7,90	2,64
17		2074	50,34	3,44	50,08	7,87	2,66
18		2247	54,59	3,58	50,07	7,83	2,67

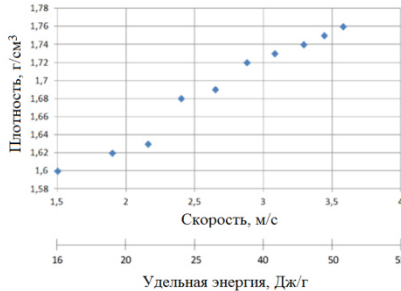


Рисунок 12 - Зависимость плотности образцов состава № 2 от скорости пуансона

Частичная замена в графитопластовой композиции графита коксом привела к снижению деформируемости композиции.

Основными преимуществами процесса высокоэнергетического компактирования графитопластовых композиций являются: отсутствие операций нагрева композиций перед компактированием и выдержки прессовок под нагрузкой.

В ЮУрГУ находится в эксплуатации испытательное высокоскоростное устройство фирмы Instron марки CEAST 9350.

Исследования выполнялись в пресс-форме, позволяющей получать образцы диаметром 10 мм из порошковой композиции. Результаты исследований приведены в диссертации.

Исследования на копке Instron значительно дополнили результаты исследований, полученных на прессе Hydropulsor. Исследования включали первую серию опытов на процессах компактирования при постоянной (5,1 кг) массе бойка и удельной энергии в диапазоне от 2,18 до 34,45 Дж/г прессовок диаметром 10 мм при отношениях массы прессовок к массе бойка в диапазоне от 0,2784 до 0,3333 г/кг. Максимальная плотность прессовок получена при воздействии на них максимальной удельной энергии, равной 34,45 Дж/г.

Новый процесс высокоэнергетического компактирования графитопластовых композиций. Статическое прессование изделий электротехники, несмотря на его многочисленные улучшения, имеет ряд существенных недостатков: повышенная энергоёмкость, пониженная производительность технологического процесса. Кроме того, статическим прессованием можно получить изделия только пониженной плотности с недостаточно высокими механическими и физическими свойствами.

Задачей разработки новых процессов высокоэнергетического компактирования графитопластовых композиций является устранение указанных недостатков. Для ее решения в способе прессования электротехнического изделия из порошковой графитопластовой композиции прессовку формуют в холодном состоянии бойком при отношении массы бойка к массе прессовки, равном 50–100, и скорости падения бойка 1–6 м/с.

Плотность получаемых изделий повышается по сравнению со статическим прессованием за счет увеличения в десятки раз удельного усилия и кинетической энергии, прикладываемых к прессовке, а также скорости падения пуансона.

Электронномикроскопические исследования химического состава и микроструктуры прессовок, уплотненных при скоростях 0,03 и 3 м/с. Электронномикроскопические исследования проведены на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM-7001F. Рентгенофлуоресцентный анализ осуществляли с помощью энергодисперсионного спектрометра Oxford INCA X-max 80, установленного на этом микроскопе. Перед исследованием образцы раскалывались, исследовался свежий скол.

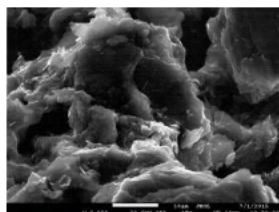
Целью исследования было определение особенностей микроструктуры прессовок из композиционных материалов на основе графита, отличающихся скоростью компактирования. Образец А был получен при скорости пуансона 3 м/с, а образец В – при скорости пуансона 0,03 м/с.

Полученная спектрограмма показывает, что химический состав исследуемых образцов находится в пределах нормы для изделий из графита марки ЭГ (табл. 6).

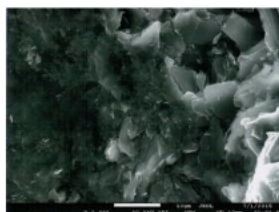
На рисунке 13 представлены фрактограммы изучаемых образцов. На полученных снимках видно, что микроструктура материала композиции существенно различна.

Таблица 6
Химические элементы композиций состава 2 для динамического и статического формования

Химический элемент, % масс.	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe
А	93,68	6,22	0,01	0,01	0,01	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02
В	90,69	8,36	0,10	0,02	0,01	0,06	0,03	0,37	0,21	0,06	0,08



а)



б)

Рисунок 13 - Фрактограммы исследуемых прессовок: а – уплотнена при скорости 3 м/с, температуре 24 °С, энергии удара 2247 Дж, плотность 1,76 г/см³; б – уплотнена при скорости 30 мм/с, температуре 180 °С, плотность 1,54 г/см³

После обработки давлением в структуре появились признаки наличия графеновых образований, причем при высокоэнергетическом нагружении их значительно больше (более 70 % всей площади), чем при статическом (около 30%). Это различие, возможно, обусловлено также тем, что статическое формование проводилось при температуре 180 °С, а динамическое при 24 °С.

Исследование плотности прессовок показало, что прессовки после высокоэнергетического прессования имеют плотность на 19% выше плотности статически прессованных образцов. Из анализа фрактограмм можно сделать вывод, что большая часть полученных локаций графена – многослойна, т.е. состоит из нескольких «листов». Возможно, многослойный графен может применяться для упрочнения композиционных материалов, повышения износостойкости и снижения коэффициента трения, что очень важно для скользящих контактов в электротехнике.

Результаты работы внедрены ООО «Графитопласт» (г. Челябинск), ООО ПКФ «АРМА» (г. Челябинск), ООО ПКФ «Аверс» (г. Челябинск), АО «ВРК-2» ВЧДР (г. Челябинск). В ООО ПКФ «Аверс» была продана лицензия

Внедрение результатов работы позволило получить экономический эффект в размере более 76 млн. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в диссертационной работе результаты теоретических, экспериментальных и технологических исследований развивают теорию и практику получения электротехнических и конструкционных изделий из порошковых композиций на основе углерода, что с учетом разработанных и запатентованных новых процессов, технологической оснастки и оборудования позволяет решить важную народнохозяйственную задачу в углеродной и машиностроительной отраслях промышленности.

1. Разработана концепция совершенствования известных способов и устройств статического формования изделий электротехники из коксопечковых и графитопластовых порошковых композиций с учетом их реологических особенностей.

2. Разработаны научные основы процессов компактирования графитопластовых порошковых композиций, включающих искусственный графит, новолачную фенолоформальдегидную смолу, отвердитель (уротропин) и добавки, при статическом и высокоэнергетическом нагружениях.

3. Систематизированы материалы известных исследований по особенностям кристаллографических структур и свойств графита и композиций на основе углерода. Отмечен вклад российских ученых, в первую очередь таких, как А.С. Фиалков, в исследования структур и свойств композиций: кокс-связующее, сажа-связующее, природный графит-связующее и искусственный графит-связующее. Приведены сведения об открытиях новых углеродных наноматериалов типа нанотрубок и фуллеренов и их практическом использовании. Обращено внимание на особые механические и физические свойства композиционных ма-

териалов на основе углерода, предназначенных для получения изделий конструкционного, в том числе электротехнического, назначения.

4. Установлена необходимость выдержки насыпки в нагретой матрице перед началом прессования. Такая выдержка позволяет удалить газы и пары из засыпки и повысить плотность полученных прессовок. Изучение явлений полимеризации смолы и смачивания частиц графита ее расплавом показало, что при статическом прессовании графитопластовых композиций со скоростями 15–30 мм/с полностью завершить эти явления в процессе прессования невозможно. Для завершения этих явлений после прессования необходима выдержка прессовок под давлением 30–40 МПа в течение 3–5 минут.

5. Анализ известных уравнений высокоэнергетического прессования порошковых композиций, в том числе коксопечковых, а также экспериментальных исследований процесса высокоэнергетического прессования графитопластовых композиций на шведском прессе Hydroplulsoг позволил получить уравнение прессования в виде политропы, связывающей плотность прессовки с удельной кинетической энергией прессования. В качестве модернизированного уравнения высокоэнергетического прессования графитопластовых композиций использована часть политропы, описывающая упругую стадию процесса уплотнения до плотности $1,75 \text{ г/см}^3$ и удельной энергии прессования, равной 10 кДж/кг .

6. В результате изучения известных реологических уравнений и механических моделей прессования порошковых композиций на основе металлов, керамики и кокса (коксопечковые композиции) установлено, что графитопластовые композиции по своим механическим, физическим и технологическим свойствам имеют принципиальные отличия. В исходном состоянии графитопластовые порошковые композиции обладают упругими и вязкими свойствами, поэтому их следует отнести к упруговязким реологическим моделям в процессе горячего прессования. Предложена оригинальная механическая модель и реологические уравнения ее описания, принципиально отличающиеся от классической реологии Максвелла, Фойхта и Леттерзиха.

7. Предложен новый состав порошковой графитопластовой композиции, использующий в качестве наполнителя отходы производства графитизированных электродов для выплавки электростали и разработанная диссертантом новая инновационная технология получения из него электрощеток и вставок токосъемников наземного и рельсового электротранспорта.

8. Описаны новые конструкции контактных вставок токосъемников троллейбусов, разработанные диссертантом на уровне изобретений (патенты №39541, №120052, №132044).

9. Изложены особенности разработанных инновационных способов, устройств и пресс-форм для получения вставок, разработанных диссертантом на уровне изобретений: способы (патенты №2494835, №2508177, №2529605), устройства (патенты №152323, №144989) и пресс-формы (патенты №121762, №152819).

10. Разработаны новые конструкции головок токосъемников на уровне изобретений (патенты №130262, №142050, №164474, №164475). Рассмотрены особенности их работы.

11. Смоделирован процесс прессования графитопластовой композиции с использованием методов теории пластичности. Для решения объемной задачи применен метод суперпозиции процессов в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Процесс прессования графитопластовой композиции условно разделен на три стадии. На первой стадии происходит сближение твердых компонентов композиции путем внедрения твердых составляющих в мягкую компоненту и заполнения пространства между ними. На второй стадии твердые компоненты входят в контакт между собой, упруго деформируются с формированием контактных площадок. Одновременно с упругой деформацией твердых составляющих уплотнение структуры композиции реализуется за счет заполнения пространства, примыкающего к контактным площадкам. На третьей стадии реализуется объемное сжатие композиции в соответствии с ее объемным модулем упругости.

12. Результаты исследований позволили разработать новые конструкции углеродных и металлоуглеродных вставок пантографов на уровне изобретений (патенты РФ №2229395, №133058).

13. Для повышения плотности, прочности и износостойкости графитопластовых вставок пантографов диссертантом разработаны на уровне изобретений новый способ (патент РФ №2567083) и новая оригинальная конструкция пресс-формы (патент РФ №140319).

14. Описаны самые новейшие устройства для гранулометрических исследований порошковых композиций. Так, устройство бельгийского производства Alрага 500 NANO с программным обеспечением Callisto и электронный микроскоп Tescan VEGA позволяют выполнить гранулометрическое и морфологическое исследования порошка и его частиц.

15. Представлена методика и результаты грануломорфологических исследований графитопластовых композиций. Методика включает исследование частиц графита на основе их «округлости» и «внутреннего удлинения», а результаты исследований представлены в таблице накопительного распределения размеров частиц графита, их округлости и удлинения, распределительных кривых каждого размера частиц в объеме порошка для всех пяти составов композиции, диаграмм рассеяния размеров округлости частиц и их удлинения.

16. Представлены материалы разработки диссертантом на уровне изобретений (патент РФ № 2560625) принципиального нового процесса высокоэнергетического компактирования графитопластовых композиций.

17. Описана методика и представлены результаты электронномикроскопических исследований химического состава и микроструктуры прессовок, уплотненных при скоростях бойка пресс-формы, равных 0,03 и 3 м/с.

18. Результаты работы внедрены ООО «Графитопласт» (г. Челябинск), ООО ПКФ «АРМА» (г. Челябинск), ООО ПКФ «Аверс» (г. Челябинск), АО «ВРК-2» ВЧДР (г. Челябинск). Общий экономический эффект составил более 76 млн. руб. В ООО ПКФ «Аверс» была продана лицензия.

Основные положения диссертации отражены в 82 публикациях:

Статьи, опубликованные, в ведущих рецензируемых научных журналах изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Самодурова, М.Н.** Статическое и высокоэнергетическое формирование углеродных порошковых композиций / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков, В.А. Иванов, Б.А. Яров // *Металлург.* – 2011. – № 11. – С. 87–91.
2. Барков, Л.А. Математическое моделирование прессования втулки из порошковых материалов / Л.А. Барков, П.А. Ческидов, **М.Н. Самодурова** // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Машиностроение.* – 2004. – № 5. – С. 149–156.
3. Барков, Л.А. Оборудование и технология обработки давлением труднодеформируемых уплотняемых материалов / Л.А. Барков, **М.Н. Самодурова** // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Машиностроение.* – 2006. – № 11 (66). – С. 155–161.
4. **Самодурова, М.Н.** Новые изделия, пресс-формы и технологии формования порошковых материалов на основе углерода / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков, В.А. Иванов, В.Г. Шеркунов // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Metallургия.* – 2012. – № 39 (298). – С. 94–99.
5. **Самодурова, М.Н.** Эффективная технология получения токосяемников троллейбусов из углеродных композиций / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков, В.А. Иванов // *Справочник. Инженерный журнал с приложением.* – 2012. – № 5 (182). – С. 20–25.
6. **Самодурова, М.Н.** Исследование и разработка упрощенной технологии производства графитопластовых щеток / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков, В.А. Иванов // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Metallургия.* – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 77–84.
7. **Самодурова, М.Н.** Вариационные методы исследования уплотнения порошков при компактировании / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков, В.А. Иванов // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Metallургия.* – 2013. – Т. 13. – №2. – С. 71–76.
8. **Самодурова, М.Н.** Основные уравнения континуальной теории уплотнения порошков с особыми свойствами / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков, В.А. Иванов // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Metallургия.* – 2013. – Т. 13. – №2. – С. 65–70.
9. **Самодурова, М.Н.** Теоретические и экспериментальные зависимости плотности от усилий компактирования порошковых заготовок / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков, С.А. Мымрин, В.А. Иванов, Н.С. Джигун // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Metallургия.* – 2013. – Т.13. – № 1. – С. 150–153.
10. **Самодурова, М.Н.** Пресс-формы для прессования металлических и металлокерамических порошков / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков, В.А. Иванов

// Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2013. – № 10 (199). – С. 40–46.

11. **Самодурова, М.Н.** Высокоэнергетическая обработка монолитных и порошковых материалов давлением / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков, В.А. Иванов, Б.А. Яров // *Металлург*. – 2013. – № 4. – С. 88–93.

12. **Самодурова, М.Н.** Новое в конструкциях углеродных вставок пантографов электротранспорта и пресс-формах для их компактирования / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков, Б.А. Яров, В.П. Созыкин, Ю.С. Латфулина // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Metallurgy*. – 2014. – Т. 14. – № 1. – С. 66–72.

13. **Самодурова, М.Н.** Физико-химические явления при приготовлении и уплотнении графитопластовых смесей / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков, Н.С. Джигун, Ю.С. Латфулина // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Metallurgy*. – 2014. – Т. 14. – № 3. – С. 62–70.

14. Барков, Л.А. Моделирование процесса прокатки пористых заготовок / Л.А. Барков, С.А. Мырнин, **М.Н. Самодурова**, В.А. Иванов // *Металлы*. – 2014. – № 3. – С. 34–39.

15. **Самодурова, М.Н.** Новые способы и устройства, дегазирующие углеродные порошковые композиции перед компактированием / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков, Н.С. Джигун, Ю.С. Латфулина // *Вестник МГТУ им. Носова*. – 2014. – № 4. – С. 63–68.

16. **Самодурова, М.Н.** Исследование и совершенствование технологий прессования изделий из углеродных композиций / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков, В.А. Иванов // *Справочник. Инженерный журнал с приложением*. – 2014. – № 3 (204). – С. 3–10.

17. Барков, Л.А. Скоростная штамповка порошковых заготовок / Л.А. Барков, Е.В. Экк, **М.Н. Самодурова**, В.А. Иванов // *Металлург*. – 2014. – № 10. – С. 88–93.

18. **Самодурова, М.Н.** Формование углеродных порошковых композиций на высокоскоростном прессе HydroPulsor / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков, Н.С. Джигун и др. // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. – 2015. – № 1. – С. 27–32.

19. Barkov, L.A. Molds with a free extraction of powder pressbooks from cavities of matrix / L.A. Barkov, **M.N. Samodurova**, R.A. Zakirov, Yu.S. Latfulina. // *КШП. ОМД*. – 2015. – № 9. – С. 15–20.

20. **Самодурова, М.Н.** Контактные головки токосъемников троллейбусов с углеродными вставками / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков, Ю.С. Латфулина Ю.С. // *Справочник. Инженерный журнал с приложением*. – 2015. – № 6 (219). – С. 18–24.

21. **Самодурова, М.Н.** Новое в формировании щеток и вставок пантографов из углеродных материалов / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков, Н.С. Джигун, Ю.С. Латфулина // *Металлург*. – 2015. – № 1. – С. 82–85.

22. **Самодурова, М.Н.** Применение углеродных материалов для изготовления вставок токосъемников троллейбусов / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков, Н.С. Джигун, Ю.С. Латфулина // *Металлург.* – 2015. – № 4. – С. 67–70.
23. Barkov, L.A. New method of crystal material heterogeneity examination / L.A. Barkov, **M.N. Samodurova**, E.V. Ekk, Yu.S. Latfulina // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Metallurgy.* – 2016. – Т. 16. – № 4. – С. 23–28.
24. **Самодурова, М.Н.** Реология графитопластовых композиционных материалов / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков, Ю.С. Латфулина, В.П. Созыкин // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Metallurgy.* – 2016. – Т. 16. – № 1. – С. 142–148.
25. Barkov, L.A. Computer modeling of hot isostatic pressing process of porous blank / L.A. Barkov, P.A. Cheshidov, **M.N. Samodurova**, Yu.S. Latfulina // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Metallurgy.* – 2016. – Т. 16. – № 3. – С. 122–126.
26. **Самодурова, М.Н.** Прогрессивные технологии и способы упрочнения рабочего инструмента для прессования труднодеформируемых композиционных порошковых материалов / **М.Н. Самодурова**, И.С. Серебряков // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Metallurgy.* – 2016. – Т. 16. – № 2. – С. 106–112.
27. Барков, Л.А. Моделирование взаимодействия порошковой гетерогенной среды с инструментом при формовании / Л.А. Барков, **М.Н. Самодурова**, А.А. Осинцев // *Металлы* – 2016. – № 3. – С. 82–86.
28. **Самодурова, М.Н.** Исследование грануло-морфологического состава графитопластовых композиций и их высокоскоростного компактирования / **М.Н. Самодурова**, Р.А. Закиров, Л.А. Барков, Ю.С. Латфулина // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением.* – 2016. – № 6. – С. 15–24.
29. **Самодурова, М.Н.** HIGH-VELOCITY COMPACTION OF CARBON COMPOSITIONS / **M.N. Samodurova**, L.A. Barkov, Yu.S. Latfulina // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy.* – 2017. – Т. 17. – № 3. – С. 115–121.
30. **Самодурова, М.Н.** Устройства для формования длинномерных заготовок из порошковых материалов / Л.А. Барков, **М.Н. Самодурова**, Р.А. Закиров, Ю.С. Латфулина // *Металлург.* – 2017. – Том 11. – С. 101–103.
31. Барков, Л.А. CONSOLIDATION MODEL OF POWDER MAGNETIC MATERIALS / Л.А. Барков, **М.Н. Самодурова**, Ю.С. Латфулина // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy.* – 2018. – Т. 18. – № 1. – С. 48–51.
32. **Самодурова, М.Н.** Инновации в конструкциях, способах и пресс-формах получения графитопластовых вставок токосъемников троллейбусов / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков, Ю.С. Латфулина // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением.* – 2018. – Том № 6. – С. 34–43.
33. Barkov, L.A. Simulation of Rolling of Porous Bars / L.A. Barkov, **M.N. Samodurova**, V.A. Ivanov, S.A. Mymrin, // *Russian Metallurgy (Metally).* – 2014. – Т. 2014. – No. 5. – P. 377–381.

34. **Самодурова, М.Н.** Математическое моделирование высокоскоростных процессов обработки давлением композиционных материалов на основе графита / М.Н. Самодурова, Н.Н. Огарков, С.И. Платов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgiya. – 2018. – Т. 18. – № 4. – С. 121-127.

Публикации в изданиях, регистрируемых в международных наукометрических базах (Web of Science и Scopus)

35. **Samodurova, M.N.** Static and high-energy shaping of carbon-based powder composites / **M.N. Samodurova**, L.A. Barkov, V.A. Ivanov // Metallurgist. – March, 2012. – Vol. 55. – Nos. 11–12. – P. 848–853.

36. **Samodurova, M.N.** High-energy forming of monolithic and powder materials by pressure / **M.N. Samodurova**, L.A. Barkov, V.A. Ivanov, B.A. Yarov // Metallurgist. – July, 2013. – Vol. 57. – Nos. 3–4. – P. 333–341.

37. Barkov, L.A. High-Speed Stamping of Powder Workpieces for Objects of High Density and Strength / L.A. Barkov, E.V. Ekk, **M.N. Samodurova**, V.A. Ivanov // Metallurgist. – 2015. – Vol. 58. – P. 930–936.

38. **Samodurova, M.N.** New developments in the formation of pantograph brushes and collectors from carbon-based materials / **M.N. Samodurova**, L.A. Barkov, N.S. Dzhigun, Yu.S. Latfulina // Metallurgist. – 2015. – Vol. 59. – Nos. 1–2. – P. 76–80.

39. **Samodurova, M.N.** Use of carbon materials to make inserts for the sliding contacts of the buses / **M.N. Samodurova**, L.A. Barkov, N.S. Dzhigun, Yu.S. Latfulina // Metallurgist. – 2015. – Vol. 59. – Nos. 3–4. – P. 348–352.

40. Barkov, L.A. Simulation of the interaction of a powder heterogeneous medium with a tool during molding / L.A. Barkov, M.N. Samodurova, A.A. Osintsev // Russian metallurgy. – 2016. – Vol. 2016. – Nos. 5. – P. 467–471.

41. **Samodurova, M.N.** Die Technology and Construction for Compacting Gas-Saturated Tungsten and Carbon Powders / L.A. Barkov, **M.N. Samodurova**, R.A. Zakirov, Yu.S. Latfulina // Metallurgist. – 2017. – Vol. 60. – Nos. 11-12. – P. 1277-1284.

42. **Samodurova, M.N.** Device for One- and Two-Sided Molding of Refractory Metal Powders Into Electric-Arc Melting Electrode Workpieces / **M.N. Samodurova** // Metallurgist. – 2018. – Vol. 9-10 (61). – P. 917-921.

43. **Samodurova, M.N.** Devices for the Formation of Long-Length Products from Powder Materials / **M.N. Samodurova** // Metallurgist. – 2018. – Vol. 61 (11-12). – P. 1029-1032.

44. **Samodurova, M.N.** Computer Simulation of Porous Material Plastic Deformation / L.A. Barkov, **M.N. Samodurova**, E.A. Trofimov // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 533-539.

45. **Samodurova, M.N.** Anomalous resistivity of heavily nitrogen doped graphitic carbon / **M.N. Samodurova** // Diamond and Related Materials. – 2018. – Vol. 83. – P. 75-79.

Монография

46. Алсараева, К.В. Инновационные металлические материалы: монография / К.В. Алсараева, Л.А. Барков, ..., **М.Н. Самодурова** и др. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2016. – 371 с.

Публикации в других изданиях

47. **Самодурова, М.Н.** Исследования процессов высокоскоростного формования порошков на основе графита / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков, Ю.С. Латфулина // Обработка сплошных и слоистых материалов. – 2016. – № 2. – С. 68–74.

Патенты Российской Федерации

48. Пат. 2074553 РФ. Пресс-форма для прессования тонких пластин из порошкового материала / В.И. Трусовский, Л.А. Барков, А.В. Сорокин, **М.Н. Самодурова**. Заявл. 06.10.1994; опубл. 10.03.2002.

49. Пат. 121763 РФ, Пресс-форма для прессования порошков / **М.Н. Самодурова**, В.А. Иванов, Л.А. Барков. Заявл. 20.06.2012; опубл. 10.11.2012. Бюл. № 31.

50. Пат. 121762 РФ. Пресс-форма для прессования порошков / **М.Н. Самодурова**, В.А. Иванов, Л.А. Барков. Заявл. 20.06.2012; опубл. 10.11.2012. Бюл. № 31.

51. Пат. 120052 РФ. Контактная вставка токоприемников троллейбусов / **М.Н. Самодурова**, В.А. Иванов, Л.А. Барков. Заявл. 19.04.2012; опубл. 10.09.2012. Бюл. № 25.

52. Пат. 120591 РФ. Пресс-форма для прессования порошков / **М.Н. Самодурова**, В.А. Иванов, Л.А. Барков, Б.А. Яров. Заявл. 02.05.2012; опубл. 27.09.2012. Бюл. № 27.

53. Пат. 2494835 РФ. Способ прессования углеродных контактных вставок троллейбусов / **М.Н. Самодурова**, В.А. Иванов, Л.А. Барков. Заявл. 09.07.2011; опубл. 10.10.2013. Бюл. № 28.

54. Пат. 133444 РФ. Пресс-форма для прессования порошков / **М.Н. Самодурова**, В.А. Иванов, Л.А. Барков, Ю.А. Канатникова. Заявл. 21.05.2013; опубл. 20.10.2013. Бюл. № 29.

55. Пат. 133058 РФ. Контактная вставка токосъемника электротранспортного средства / **М.Н. Самодурова**, В.А. Иванов, Л.А. Барков, Ю.А. Канатникова. Заявл. 21.05.2013; опубл. 10.10.2013. Бюл. № 28.

56. Пат. 132044 РФ. Контактная вставка токоприемников троллейбусов / **М.Н. Самодурова**, В.А. Иванов, Л.А. Барков, Ю.А. Канатникова. Заявл. 21.05.2013; опубл. 10.10.2013. Бюл. № 28.

57. Пат. 141551 РФ. Пресс-форма для прессования контактных вставок токосъемников троллейбуса / Л.А. Барков, В.А. Иванов, **М.Н. Самодурова**, Ю.С. Латфулина, С.В. Фирстова. Заявл. 22.01.2014; опубл. 10.06.2014. Бюл. № 16.

58. Пат. 2567083 РФ. Способ прессования электротехнических изделий из порошковых композиций на основе углерода / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков. Заявл. 10.06.2014; опубл. 27.10.2015. Бюл. № 30.

59. Пат. 142050 РФ. Контактная головка токосъемника троллейбуса / Л.А. Барков, В.А. Иванов, **М.Н. Самодурова**, Ю.С. Латфулина. Заявл. 05.12.2013; опубл. 20.06.2014. Бюл. №17.

60. Пат. 140319 РФ. Пресс-форма для прессования контактных вставок токосъемников электроподвижного рельсового транспорта / **М.Н. Самодурова**, В.А. Иванов, Л.А. Барков. Заявл. 10.06.2013; опубл. 10.05.2014. Бюл. № 13.

61. Пат. 2529605 РФ. Способ изготовления скользящих контактов / **М.Н. Самодурова**, В.А. Иванов, Л.А. Барков, Ю.А. Канатникова. Заявл. 27.05.2013; опубл. 27.09.2014. Бюл. № 27.

62. Пат. 146846 РФ. Блок заготовок щеток для электрических машин / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков. Заявл. 07.07.2014; опубл. 20.10.2014. Бюл. № 29.

63. Пат. 2533893 РФ. Способ изготовления скользящих контактов из порошковых композиций на основе углерода / **М.Н. Самодурова**, В.А. Иванов, Л.А. Барков. Заявл. 31.07.2013; опубл. 27.11.2014. Бюл. № 33.

64. Пат. 2510309 РФ. Способ прессования заготовок щеток электромашин из порошковых материалов на основе углерода и многоместная пресс-форма / **М.Н. Самодурова**, В.А. Иванов, Л.А. Барков, Б.А. Яров. Заявл. 09.08.2012; опубл. 27.03.2014. Бюл. № 9.

65. Пат. 2508177 РФ. Способ получения контактных вставок троллейбусов / **М.Н. Самодурова**, В.А. Иванов, Л.А. Барков. Заявл. 25.02.2013; опубл. 27.02.2014. Бюл. № 6.

66. Пат. 137489 РФ. Пресс-форма для прессования порошковых композиций на основе углерода / **М.Н. Самодурова**, В.А. Иванов, Л.А. Барков. Заявл. 13.08.2013; опубл. 20.02.2014. Бюл. № 5.

67. Пат. 161533 РФ. Смеситель для смешивания углеродных порошков со связующим / **М.Н. Самодурова**, В.А. Иванов, Ю.С. Латфулина. Заявл. 09.10.2015; опубл. 27.04.2016. Бюл. № 12.

68. Пат. 161844 РФ. Контактная вставка токосъемников троллейбусов / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков, О.М. Пестунова, Н.С. Джигун. Заявл. 06.08.2015; опубл. 10.05.2016. Бюл. № 13.

69. Пат. 154585 РФ. Пресс-форма для прессования порошков / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков, Ю.С. Латфулина. Заявл. 23.04.2015; опубл. 27.08.2015. Бюл. № 24.

70. Пат. 152819 РФ. Пресс-форма для прессования порошков / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков, А.А. Осинцев. Заявл. 07.10.2014; опубл. 20.06.2015. Бюл. № 17.

71. Пат. 153269 РФ. Устройство для получения изделий из порошков / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков, Н.С. Джигун. Заявл. 31.12.2014; опубл. 10.07.2015. Бюл. № 19.
72. Пат. 152323 РФ. Устройство для получения изделий из порошков / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков, Н.С. Джигун, Ю.С. Латфулина. Заявл. 10.12.2014; опубл. 20.05.2015. Бюл. № 14.
73. Пат. 2560490 РФ. Способ изготовления электроугольных изделий / Л.А. Барков, **М.Н. Самодурова**, В.А. Иванов. Заявл. 27.12.2013; опубл. 10.07.2015. Бюл. № 19.
74. Пат. 2560619 РФ. Способ изготовления электроугольных изделий / Л.А. Барков, **М.Н. Самодурова**, В.А. Иванов. Заявл. 05.12.2013; опубл. 10.06.2015. Бюл. № 16.
75. Пат. 2560625 РФ. Способ прессования электротехнического изделия из порошковой графитопластовой композиции / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков, О.М. Пестунова. Заявл. 12.03.2014; опубл. 20.08.2015. Бюл. № 23.
76. Пат. 165546 РФ. Пресс-форма для заделки токоведущего провода в электрическую щетку / С.С. Стругов, **М.Н. Самодурова**. Заявл. 13.05.2016; опубл. 20.10.2016. Бюл. № 29.
77. Пат. 164474 РФ. Контактная головка токосъемника троллейбуса / Ю.С. Латфулина, **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков, Н.С. Джигун. Заявл. 03.12.2015; опубл. 10.09.2016. Бюл. № 25.
78. Пат. 164475 РФ. Контактная головка токосъемника троллейбуса / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков, Н.С. Джигун, Ю.С. Латфулина. Заявл. 21.12.2015; опубл. 10.09.2016. Бюл. № 25.
79. Пат. 2602569 РФ. Способ изготовления электроугольных изделий / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков. Заявл. 23.04.2015; опубл. 20.11.2016. Бюл. № 32.
80. Пат. 2656375 РФ. Композиция для изготовления электротехнических изделий / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков. Заявл. 05.09.2017; опубл. 05.06.2018. Бюл. № 16.
81. Пат. 2017119611 РФ. Способ получения электротехнических изделий из порошковых композиций на основе углерода / **М.Н. Самодурова**, Л.А. Барков. Заявл. 05.06.2017; опубл. 25.04.2018. Бюл. № 12.
82. Пат. 180782 РФ. Установка для высокоскоростного ударного прессования / С.С. Стругов, **М.Н. Самодурова**. Заявл. 02.11.2017; опубл. 22.06.2018. Бюл. № 18.