

На правах рукописи



ПАРХОМЕНКО Андрей Валерьевич

**РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА
ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ГРАНУЛЯТОВ НА ОСНОВЕ
ПОЛИФОРМАЛЬДЕГИДА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ
ПО МІМ-ТЕХНОЛОГИИ**

2.6.17. Материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «СамГТУ»).

Научный руководитель: **Амосов Александр Петрович**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Разумов Николай Геннадьевич**
доктор технических наук, доцент,
профессор Высшей школы механики и процессов
управления, Физико-механический институт, ФГАОУ ВО
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого», г. Санкт-Петербург

Муранов Александр Николаевич
кандидат технических наук, доцент, заведующий
лабораторией № 3 федерального государственного
автономного учреждения науки Института конструкторско-
технологической информатики РАН, г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

Защита диссертации состоится «02» октября 2026 г, в 13.30 часов, на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.039.02 при ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и ФГАОУ «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва», по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус, ауд. 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и на сайте <https://d99203902.samgtu.ru/spisok-dissertatsii>.

Отзывы на автореферат просьба выслать в двух экземплярах, заверенных печатью организации, по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Луц Альфия Расимовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы: В настоящее время в области металлургии и машиностроения активно развиваются технологии получения металлических порошков и изделий из них. Большой интерес вызывает технология производства изделий путём инъекционного формования металлополимерных смесей и последующего спекания металлических порошковых материалов, получившая название Metal Injection Molding или МІМ-технология. Это результат объединения метода литья полимерных материалов под давлением с технологиями порошковой металлургии. Данная технология успешно применяется для серийного производства малогабаритных деталей сложной формы взамен традиционной трудоемкой технологии изготовления деталей путем механической обработки металлических заготовок. Применение МІМ-технологии особенно оправдано для производства деталей из дорогостоящих металлов, таких как нержавеющие стали и титановые сплавы, где традиционные методы металлообработки до 80 % исходного материала переводят в отход, в то время как МІМ-технология демонстрирует коэффициент использования материала около 99 %. Таким образом, МІМ-технология позволяет значительно сберечь трудовые и материальные ресурсы в серийном производстве малогабаритных металлических деталей сложной формы. За рубежом ресурсосберегающая МІМ-технология широко применяется для нужд автомобильной, часовой, авиакосмической промышленности, бытовой электроники и информационных технологий, медицинской отрасли, большое распространение получила также на предприятиях оборонного комплекса.

Сырьем для МІМ-технологии является фидсток (feedstock) или гранулят – смесь мелкодисперсного металлического порошка с полимерным связующим и специальными добавками (смазками и поверхностно-активными веществами). Качество гранулята имеет решающее значение для стабильного получения заданных параметров конечных МІМ-изделий. В настоящее время широкое применение нашли грануляты марки Catamold® фирмы «BASF» (Германия) со связующим каталитического типа удаления на основе полиформальдегида (полиоксиметилена), который обладает высокой технологичностью, механической прочностью, теплопроводностью и термостабильностью. Такая связующая система обеспечивает хорошее проливание деталей и сохранность геометрической формы изделия на последующих стадиях удаления связующего и спекания. Полученные из данного гранулята детали имеют высокие показатели прочности и твердости, высокие усталостные свойства и минимальные значения усадки. Для данных гранулятов имеется отлаженная технология производства и соответствующее оборудование, что в конечном итоге является гарантией высокого качества деталей и эффективности их производства.

Освоению перспективной ресурсосберегающей технологии инъекционного формования и спекания изделий из порошковых композиций в России препятствовало отсутствие на время начала работы по теме настоящего диссертационного исследования гранулятов оптимального состава и себестоимости, получаемых из компонентов, выпускаемых отечественной промышленностью. Немногочисленные частные компании,

изготавливающие в России детали по данной технологии, работали на дорогостоящем импортном грануляте, в основном производства фирмы «BASF» (Германия). В связи с этим актуальной задачей была разработка составов и технологии изготовления ММ-гранулятов из отечественного сырья с заданными показателями качества и минимальными затратами. Актуальность работы существенно возросла в последние годы при необходимости решения вопросов импортозамещения, когда использование зарубежных гранулятов стало затруднительным и невыгодным.

Целью работы является обеспечение получения методом инжекционного формования и спекания стальных деталей с заданным комплексом физико-механических свойств на основе разработки отечественных металлополимерных гранулятов с полиформальдегидным связующим за счет установления закономерностей влияния состава гранулятов и технологических режимов изготовления на их структуру, текучесть расплава, спекание, усадку и свойства спеченных изделий.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решались следующие задачи:

1. Исследовать состав, структуру, плотность и реологические свойства импортного гранулята Catamold® 42CrMo4 как прототипа для разработки отечественных металлополимерных гранулятов.

2. Обосновать выбор отечественных металлических порошков, полиформальдегидного связующего и технологических добавок для получения гранулятов с заданными реологическими свойствами.

3. Установить влияние соотношения металлической и полимерной фаз, а также содержания полиформальдегида, полиэтиленов высокого и низкого давления, парафина и стеариновой кислоты на структуру и показатель текучести расплава металлополимерных гранулятов.

4. Разработать экспериментальную лабораторную установку и определить с ее помощью рациональные составы и технологические параметры получения отечественных гранулятов на основе порошков карбонильного железа, сталей 09X16H4B и 12X18H10T, обеспечивающие заданный диапазон показателя текучести расплава и однородность структуры.

5. Исследовать структуру, плотность, твердость, прочностные и пластические характеристики стальных изделий, полученных из разработанных гранулятов, после формования, удаления связующего, спекания и термической обработки.

6. Установить влияние состава связующего, включая содержание полиэтилена высокого давления, на усадку, плотность, твердость и размерную точность спеченных стальных изделий.

7. Подтвердить промышленную применимость разработанных гранулятов и оценить технико-экономический эффект их использования в серийном производстве деталей по ММ-технологии.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Установлены закономерности влияния содержания отечественных полимерных компонентов (полиформальдегида, полиэтиленов высокого и низкого давления, парафина

и стеариновой кислоты) на показатель текучести расплава гранулятов на основе отечественных порошков карбонильного железа, нержавеющей сталей 09X16H4Б и 12X18H10T, что позволило регулировать показатель текучести отечественных гранулятов до заданного диапазона 200-500 г/10 мин.

2. Установлены рациональные соотношения металлической и полимерной фаз в отечественных гранулятах с полиформальдегидным связующим, обеспечивающие формирование однородной металлополимерной структуры и получение после спекания стальных изделий с комплексом свойств, соответствующим требованиям ГОСТ Р 59651-2021.

3. Показано влияние содержания полиэтилена высокого давления в составе связующего на усадку и размерную точность спеченных стальных изделий; установлено, что изменение содержания ПЭВД с 1,50 до 1,56 % позволяет повысить точность изделий с качества h10 до h9 при сохранении допустимых физико-механических свойств.

Практическая значимость работы:

1. Результаты диссертационной работы внедрены в АО «ФНПЦ «ПО «Старт» им. М.В. Проценко» (г. Заречный, Пензенская область) для серийного производства деталей по МИМ-технологии (акт внедрения от 30.03.2026 № 17-27/693). Эти результаты использованы при разработке технологических регламентов изготовления гранулятов из порошков сталей: 09X16H4Б, 12X18H10T, 20X13, 30X13, 03X17H14M2 (316L), 38XM и карбонильного железа. Грануляты обеспечивают изготовление стальных деталей, удовлетворяющих требованиям технической и конструкторской документации. Общий объем производства гранулятов на полиформальдегидном связующем составил в 2025 году около 400 кг.

2. Техничко-экономическое обоснование реализации собственного производства отечественных гранулятов в АО «ФНПЦ «ПО «Старт» им. М.В. Проценко» показало, что применение МИМ-технологии позволяет добиться снижения себестоимости готовой продукции в 2-7 раз по сравнению с традиционными методами механической обработки стальных заготовок, и годовой экономический эффект в 2025 году составил около 35 миллионов рублей.

3. Предложен метод, позволяющий регулированием содержания полиэтилена высокого давления в составе связующего, а также изменением его отношения к металлической фазе, получать спеченные детали по МИМ-технологии с величиной усадки, обеспечивающей размеры в пределах 0,03 мм от номинала, что соответствует допуску по качеству h9.

4. Внедрение результатов диссертационной работы в АО «ФНПЦ «ПО «Старт» им. М.В. Проценко» показало, что внесен важный вклад в решение проблемы импортозамещения поставок зарубежных гранулятов для ресурсосберегающей МИМ-технологии, так как теперь российские предприятия могут использовать полученные результаты по разработке составов и технологии изготовления МИМ-гранулятов из отечественного сырья с заданными показателями качества.

Методология и методы исследования. Исследования выполнены с использованием основных положений материаловедения, порошковой металлургии,

химии полимеров, технологии термической обработки, технологии литья пластмасс, а также с применением современных методов исследования свойств материалов и веществ, таких как рентгенофазовый, электронно-микроскопический, дифференциально-термический, термогравиметрический, фотометрический анализ, дифференциальная сканирующая калориметрия, а также оптико-эмиссионная и инфракрасная спектроскопия, при исследовании исходных и полученных материалов, и сопоставлением полученных данных с результатами научных исследований других источников.

Личный вклад автора. Личный вклад заключается в участии в постановке целей и задач, разработке методологии исследования. Автор выполнил патентный поиск, в рамках которого рассмотрено более 100 иностранных патентов и выявлен основной патент для гранулятов фирмы «BASF» марки Catamold® на основе полиформальдегидного связующего, участвовал в создании экспериментальной установки для изготовления отечественных гранулятов для ММ-технологии, провел эксперименты по установлению фундаментальных связей состава и структуры металлополимерных композиций с физико-механическими, реологическими и эксплуатационными свойствами гранулятов из отечественных компонентов, обработал и интерпретировал результаты, участвовал в формулировке всех основных положений, определяющих научную новизну и практическую значимость работы, в изготовлении опытных партий гранулятов из отечественных компонентов, подготовке научных публикаций и представлении результатов работы на конференциях. Основные экспериментальные результаты получены лично автором или при его непосредственном участии.

Достоверность полученных результатов подтверждается: значительным объемом экспериментальных данных (изготовлено и исследовано более 30 партий гранулятов различных по составу и соотношению металлического порошка и связующих компонентов); проведением испытаний механических свойств неспеченных и спеченных заготовок на трех образцах из 3 партий гранулятов, проведением исследований зависимостей физических свойств спеченных образцов от содержания и состава связующих компонентов на 7 партиях гранулятов, что обеспечивает статистическую значимость выборки; использованием современного сертифицированного, аналитического и испытательного оборудования, что гарантирует высокую точность и объективность получаемых данных; использованием аттестованных методов и методик при проведении экспериментов; отсутствием противоречий полученных данных с фундаментальными теоретическими положениями и результатами исследований, опубликованными ведущими отечественными и зарубежными учеными в данной области; публикацией основных данных в высокорейтинговых научных журналах, докладами и обсуждениями результатов на конференциях; внедрением результатов работы на производстве.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Закономерности влияния компонентного состава отечественных металлополимерных гранулятов на основе полиформальдегидного связующего на показатель текучести расплава, заключающиеся в его повышении при введении парафина

и стеариновой кислоты и регулировании при введении полиэтиленов высокого и низкого давления до диапазона 200-500 г/10 мин.

2. Рациональные составы отечественных гранулятов на основе порошков карбонильного железа, сталей 09X16H4Б и 12X18H10T с полиформальдегидным связующим, обеспечивающие однородное распределение металлической и полимерной фаз, заданные реологические характеристики и получение спеченных стальных изделий с физико-механическими свойствами, соответствующими требованиям ГОСТ Р 59651-2021.

3. Технологические параметры получения гомогенной металлополимерной композиции гранулята, включающие последовательное смешение компонентов при нагреве от 140 °С до 210 °С со скоростью 1 °С/мин и формование смеси при давлении 15-20 МПа, обеспечивающие равномерное распределение связующего и металлического порошка.

4. Установленная зависимость усадки, плотности, твердости и размерной точности спеченных стальных изделий от содержания связующего и полиэтилена высокого давления в грануляте, позволяющая обеспечить размерную точность изделий до качества h9.

5. Результаты промышленной апробации разработанных отечественных гранулятов, подтверждающие возможность их применения для серийного изготовления стальных деталей массой от 0,5 до 80 г и снижение себестоимости готовой продукции в 2-7 раз по сравнению с традиционной механической обработкой.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: всероссийские научно-технические конференции с международным участием «Высокие технологии в машиностроении» (11-17 ноября 2010 г., г. Самара), (25-28 октября 2011 г., г. Самара), (10-12 апреля 2024 г., г. Самара), (08-10 апреля 2026 г., г. Самара); III Международная научно-инновационная молодежная конференция «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент» (31 октября-02 ноября 2011 г., г. Тамбов); 4-я научно-техническая конференция «Взаимодействие науки и литейно-металлургического производства» (28-30 марта 2012 г., г. Самара); XXXII Молодежная научно-практическая конференция «Интеллектуальный потенциал XXI века: ступени познания» (15 апреля 2016 г., г. Новосибирск); XXIII Международная научно-практическая конференция «Новое слово в науке и практике: гипотезы и апробация результатов исследований» (22 апреля 2016 г., г. Новосибирск); Всероссийская научно-техническая интернет-конференция с международным участием «Перспективные материалы и технологии в авиа-двигателестроении» (04-06 октября 2023 г., г. Самара); VIII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении» (07-12 октября 2024 г., г. Пермь).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе 6 работ в рецензируемых изданиях и журналах, входящих в международные базы цитирования.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложений. Диссертация изложена на 169 страницах, содержит 71 рисунок, 41 таблицу, список литературы из 174 наименований и 1 приложение на 1 листе.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту. Приводятся сведения об апробации работы и публикациях, структуре и объеме диссертации.

В первой главе приведен обзор научной литературы по теме диссертационной работы, посвященный описанию особенностей технологического процесса ММ-технологии, а также описанию и свойствам применяемых исходных материалов. Сформулированы общие требования, предъявляемые к исходным компонентам для изготовления деталей по ММ-технологии. Установлено, что наиболее часто в ММ-процессе применяются порошки нержавеющей стали и металлические порошки карбонильного железа правильной, сферической формы с размером частиц не более 20 мкм. Выявлен наиболее перспективный вид связующего – полиформальдегид (полиацеталь, полиоксиметилен), обеспечивающий высокое качество и прочностные характеристики конечных изделий. Рассмотрены рецептуры существующих гранулятов и технологический процесс их изготовления, а также производственная схема изготовления деталей по ММ-технологии. Проведенный патентный поиск показал, что основным прототипом и объектом исследования следует рассматривать европейский патент EP № 0465940 1992 года фирмы «BASF» (Германия).

Во второй главе обоснован выбор отечественных компонентов для изготовления гранулята и перечислены методы проведения исследований. В работе для изготовления отечественного гранулята использовались порошок карбонильного железа (КЖ) марки НМ с частицами правильной сферической формы со средним размером 6,17 мкм и легирующие добавки: феррохром высокоуглеродистый марки FeCr70C70 и ферромolibден марки FeMo60. Для изготовления гранулята из нержавеющей стали использовались сферические порошки марок 09X16H4Б и 12X18H10Т, полученные методом газовой атомизации со средним размером частиц 15 мкм. В качестве основы полимерной части был выбран полиформальдегид (ПФЛ) марки Технасет А-110. В качестве дополнительного компонента связующего в работе был использован полиэтилен высокого давления (ПЭВД), а также полиэтилен низкого давления (ПЭНД). Для придания текучести смеси ПФЛ и металлических порошков использовались парафин марки П-2 по ГОСТ 23683-2021 и пчелиный воск по ГОСТ 21179-2000. Для обеспечения однородности распределения компонентов в смеси и улучшения адгезии металлической и полимерной частей применялась стеариновая кислота марки Т-32 по ГОСТ 6484-96.

Для отработки режимов и приготовления опытных партий отечественного гранулята была собрана установка, состоящая из двух частей: лабораторного смесителя вязкотекучих материалов с объемом смесительной камеры 20 см³ и лабораторного

ручного пресса для экструзии цилиндрического шнура вязкотекучего материала. Смеситель имел обогреваемую латунную оболочку с расположенными внутри ее самоочищающимися лопастями, с рубашкой для циркуляции теплоносителя с температурой до 210 °С от ультратермостата. После смешивания вязкотекучий материал помещался в обогреваемую теплоносителем полую цилиндрическую матрицу с пуансоном в верхней части и фильерой в нижней части, через которую на прессе выдавливался в виде цилиндрического шнура с последующей разрезкой его на гранулы.

Исследование микроструктуры, морфологии частиц исходных материалов, разработанных гранулятов производилось на растровом электронном микроскопе Jeol JSM-6390A с микрорентгеноспектральным анализатором. Гранулометрический состав металлических порошков исследовался на лазерном анализаторе ANALYSETTE 22 Compact. Анализ элементного химического состава металлического порошка определялся на оптико-эмиссионном спектрометре FOUNDRY-MASTER LAB. Определение содержания термопластичного связующего и температур фазовых превращений полимерной фазы гранулятов проводилось с использованием дифференциально-термического анализа (ДТА) и термогравиметрического анализа (ТГА) на установке «Термоскан-2». Исследование полимерной части гранулята Catamold® 42CrMo4 проводилось на дифференциальном сканирующем микрокалориметре ДСК-500 и с помощью ИК-Фурье спектрофотометра. Реологические свойства гранулята определились на приборе по определению показателя текучести расплава MODULAR MELT FLOW 7026 и пластометре TWELVindex. Исследования физико-механических свойств гранулята и спеченных изделий проводились на твердомерах WPM LEIPZIG и VRSD 251, испытательной машине-Instron 5988, копре маятниковом МК-30А.

В третьей главе изложены результаты исследования состава и структуры, а также химические, физические и реологические свойства импортного гранулята Catamold® 42CrMo4 фирмы «BASF» (Германия), выбранного за прототип, предназначенного для изготовления деталей по МИМ-технологии из низколегированной термообрабатываемой стали 42CrMo4 состава (0,35-0,45 %) С, (0,90-1,20 %) Cr, (0,15-0,30 %) Мо, аналогом которой по химическому составу является российская сталь 38ХМ по ГОСТ 4543-2016 состава (0,35-0,42 %) С, (0,90-1,30 %) Cr, (0,20-0,30 %) Мо. Установлено, что металлическая часть импортного гранулята состоит из тонкого сферического порошка железа (97-98 %) с примесями хрома (0,2-0,4 %) и молибдена (0,2-0,3 %) со средним диаметром частиц 5 мкм. Содержание полимерной фазы гранулята не превышает 9-10 % по массе. При исследовании полимерной фазы гранулята выявлены характерные термические эффекты, а также линии с волновыми числами, соответствующие полиформальдегиду и полиэтилену. Средняя плотность гранулята составляет 4,57 г/см³, средняя насыпная плотность гранулята – 1,33 г/см³, среднее значение показателя текучести расплава (ПТР) – 561 г/10 мин.

В четвертой главе представлены результаты разработки состава и оптимального режима получения отечественного гранулята на основе порошков карбонильного железа с использованием полиформальдегидного связующего с технологическими добавками. Выявлены закономерности влияния состава гранулята на его реологические свойства.

Установлено оптимальное соотношение между металлической и полимерной частями, исследованы микроструктура, физические свойства и реология гранулятов, а также физико-механические свойства стальных заготовок, изготовленных из разработанного гранулята.

Установлен оптимальный режим формования для получения гомогенной металлополимерной композиции гранулята на основе полиформальдегида (ПФЛ). Последовательное смешивание исходных компонентов в смесителе в следующем порядке: перемешивание металлического порошка со скоростью нагрева 1 °С/мин от 140 °С до 160 °С в течение 20 мин, добавление ПФЛ и перемешивание со скоростью нагрева 1 °С/мин до 195 °С в течение 35 мин, добавление технологических добавок и перемешивание в течение 10 мин с нагревом до 205 °С, окончательное перемешивание смеси при температуре 210 °С в течение 20 мин. Скорость выхода смеси из фильеры, при которой происходит равномерное формирование цилиндрического шнура, – 10 см/мин. При оптимальном содержании металлической составляющей (88,5-89,5 %) удельное давление прессования находится в диапазоне 15-20 МПа. Внешний вид полученного гранулята представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Разработанный гранулят на основе порошка КЖ и ПФЛ

Для проведения исследований изготовлены тридцать восемь опытных партий гранулята с различным количественным содержанием металлической и полимерной частей, а также количеством технологических добавок. В качестве основного критерия пригодности полученного гранулята использовался показатель текучести расплава (ПТР), который согласно спецификации импортного гранулята-прототипа должен составлять 200-500 г/10 мин. Гранулят, состоящий из двух компонентов: карбонильного железа и полиформальдегида, начинает течь при содержании полиформальдегида 11,5 %. При его увеличении до 15,5 % текучесть составляет всего 24 г/10 мин. Для обеспечения заданного уровня ПТР от 200 до 500 г/10 мин для импортного гранулята, необходимо введение в рецептуру технологических добавок. Установлено, что материал с содержанием парафина 1,0 % и стеариновой кислоты 0,4 % начинает течь при содержании полиформальдегида более 10,0 %. При увеличении содержания ПФЛ с 10,0 % до 10,4 % ПТР гранулята растет с 167 г/10 мин до 951 г/10 мин соответственно. Составы с единственной технологической добавкой – парафином начинают течь при его содержании 1,0 % и более, а составы, содержащие стеариновую кислоту – более 0,4 %. С увеличением содержания технологических добавок (парафина от 1 до 2 %, а стеариновой

кислоты от 0,4 до 1,0 %) показатель текучести расплава смеси увеличивается почти в 2 раза. Введение ПЭВД или ПЭНД значительно повышает пластичность смеси. При содержании ПЭВД 0,5 % смесь становится более текучей по сравнению с составами без добавления ПЭВД или ПЭНД. Как видно из рисунка 2 между величиной ПТР гранулята и количественным содержанием в смеси ПЭВД или ПЭНД наблюдается обратная линейная зависимость. Введение в гранулят ПЭВД или ПЭНД существенно снижает показатель текучести расплава и приближает его к показателю импортного гранулята.

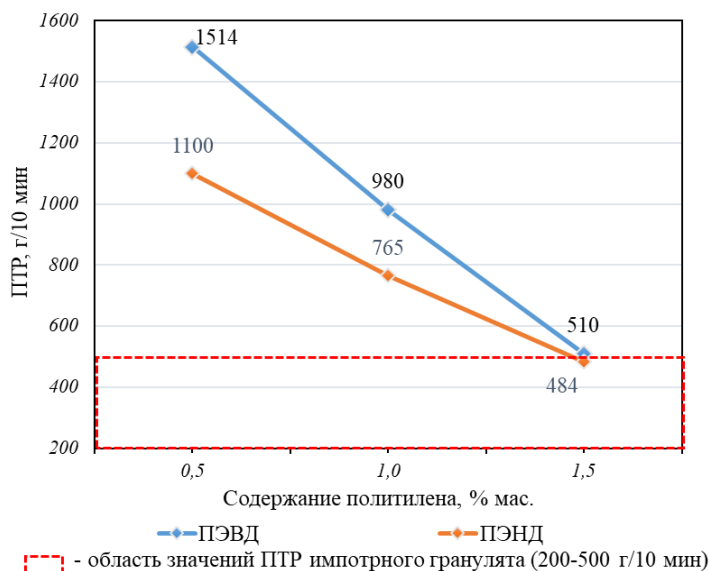


Рисунок 2 – Влияние добавок ПЭВД и ПЭНД на ПТР гранулята

Таким образом было установлено, что введение в смесь технологических добавок, таких как парафин и стеариновая кислота, а также ПЭВД или ПЭНД позволяет обеспечить необходимый уровень показателя текучести расплава ММ-гранулята.

Для приготовления гранулята, близкого по химическому составу к зарубежному прототипу, было использовано карбонильное железо с добавлением порошков феррохрома FeCr70C70 и ферромolibдена FeMo60. Было изготовлено 3 партии гранулята (рецептуры № 36-38), составы и ПТР которых представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Рецептуры и результаты ПТР опытных партий гранулятов № 36-38

Номер	Содержание компонентов, % вес.	ПТР, г/10 мин
№ 36	КЖ – 85,8 %, FeCr70C70 – 1,8 %, FeMo60 – 0,5 %, ПФЛ – 9,2 %, ПЭВД – 1,0 %, СК – 0,6 %, ПФ – 1,0 %	260
№ 37	КЖ – 86,5 %, FeCr70C70 – 1,4%, FeMo60 – 0,3 %, ПФЛ – 9,2 %, ПЭВД – 1,0%, СК – 0,6 %, ПФ – 1,0 %	230
№ 38	КЖ – 86,8 %, FeCr70C70 – 1,2 %, FeMo60 – 0,2 %, ПФЛ – 9,2 %, ПЭВД – 1,0 %, СК – 0,6 %, ПФ – 1,0 %	297

Из полученных результатов видно, что данные составы гранулятов по показателю текучести расплава близки к значению ПТР промышленного образца импортного гранулята. Наилучшие результаты получены при одновременном введении в состав гранулята парафина и ПЭВД (рецептура № 38). Микроструктура разработанного гранулята достаточно однородна, что подтверждает его высокое качество (рисунок 3).

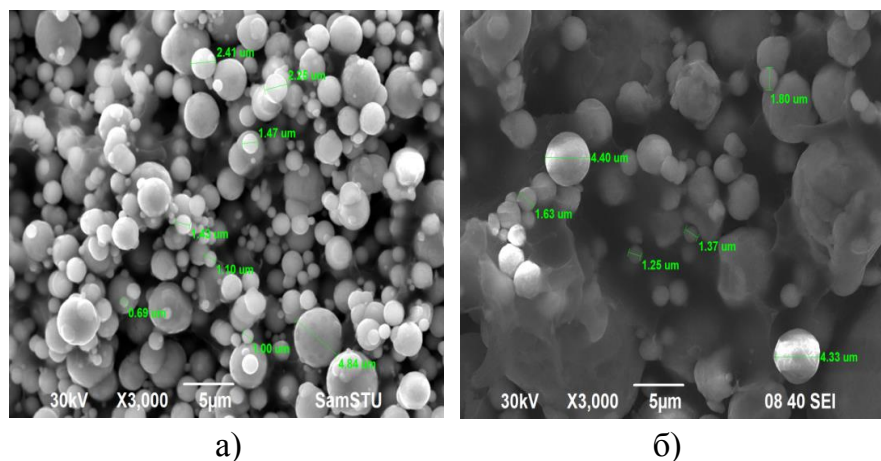


Рисунок 3 – Микроструктура отечественного (а) и импортного (б) гранулятов

Для разработанного гранулята характерно равномерное распределение связующего, участков скопления связующего не наблюдается. Распределение частиц металлического порошка равномерное, без участков скопления. Форма частиц карбонильного железа сферическая, размером от 0,8 до 5 мкм, отдельные крупные частицы порошка отсутствуют. Определенная при ДТА термограмма разложения разработанного гранулята оказалась аналогичной кривой ДТА импортного прототипа.

Таким образом, удалось отработать рецептуру и технологию производства ММ-гранулята из отечественных компонентов, который имеет состав, структуру и реологические свойства, аналогичные импортному прототипу.

Из разработанного гранулята рецептур № 36-38 были спечены стандартные образцы для испытания на сжатие, ударную вязкость и растяжение. Исследование механических свойств было выполнено на спеченных образцах после термической обработки – закалки в масле (850-870 °С) и высокого отпуска на воздухе (500-650 °С) на структуру сорбита. В таблице 2 представлены сравнительные значения механических свойств термически обработанных стальных образцов, полученных из разработанного отечественного гранулята и зарубежного гранулята, и их соответствие требованиям к хромомолибденовой стали 38ХМ по ГОСТ Р 59651-2021 и ГОСТ 4543-71.

Таблица 2 – Механические свойства термически обработанных стальных образцов, изготовленных из разработанных отечественных и импортного гранулятов

№ п/п	Механическое свойство	Импортный гранулят	Разработанный гранулят (среднее значение)	ГОСТ 4543-71 (прокат стали марки 38ХМ)	ГОСТ Р 59651-2021 (ММ-сталь марки 38ХМ)
1.	Предел прочности, МПа	1450	1550	не менее 980	не менее 1250
2.	Предел текучести, МПа	1250	1314	не менее 885	не менее 1150
3.	Ударная вязкость, МДж/м ²	9,0	9,8	не менее 6,9	–
4.	Относительное удлинение при разрыве, %	2	8,41	не менее 11	не менее 2

По механическим свойствам стальные заготовки, изготовленные из разработанного отечественного гранулята полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым к гранулятам для МИМ-технологии в соответствии с ГОСТ Р 59651-2021 и превосходят характеристики импортного прототипа. Образцы обладают высокой прочностью, при этом показатель относительного удлинения при разрыве несколько ниже, чем требуется для изделий, полученных методом проката. Это объясняется характерной особенностью спекания стальных изделий из высокодисперсных металлических порошков по МИМ-технологии. Высокая удельная поверхность частиц, а также наличие характерных для МИМ-технологии усадки и микропористости при спекании микронных порошков создают более высокие внутренние напряжения, которые приводят к снижению пластичности. Образовавшаяся при спекании мелкозернистая структура повышает прочность изделия, но одновременно препятствует движению дислокаций, что снижает способность материала к пластической деформации.

Результаты исследования зависимости физических характеристик спеченных по МИМ-технологии стальных заготовок от содержания связующего вещества в грануляте показали, что с увеличением количества связующего в смеси коэффициент усадки увеличивается, а плотность и твердость снижаются.

В пятой главе представлены результаты разработки рецептур гранулятов для МИМ-технологии из металлических порошков нержавеющей стали мартенситного (09X16H4Б) и аустенитного (12X18H10Т) классов.

Оптимальная рецептура гранулята состоит из порошка 09X16H4Б – 86,5 %, ПФЛ – 11,0 %, ПЭВД – 1,0 % и СК – 1,5 %. ПТР гранулята составил 254 г/10 мин, плотность – 4,6 г/см³. Сравнительное исследование микроструктуры «зеленых», то есть отформованных, но еще без удаления связующего и без спекания заготовок, образцов из отечественного и импортного гранулятов показало, что структура заготовки из импортного гранулята (рисунок 4, б) характеризуется меньшей однородностью и наличием скоплений металлической фазы размером до 15 мкм, в то же время как в заготовке из разработанного отечественного гранулята (рисунок 4, а) наблюдается равномерное распределение частиц.

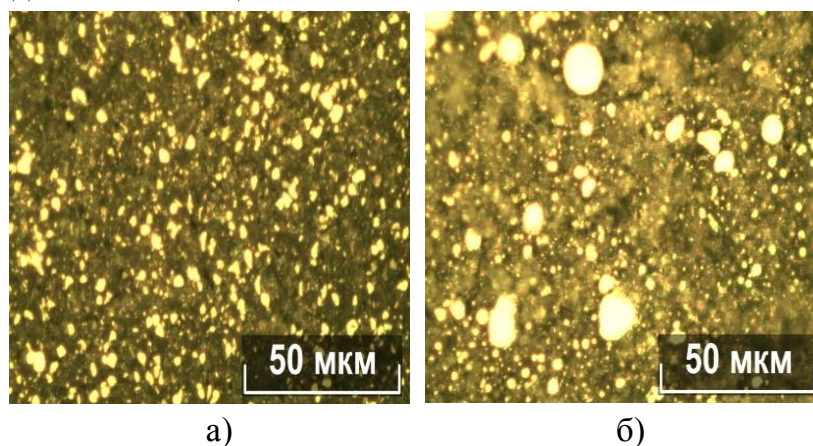


Рисунок 4 – Микроструктура отформованной «зеленой» заготовки из отечественного (а) и импортного (б) гранулятов

В результате проведенного металлографического анализа образцов, спеченных из разработанного отечественного гранулята, установлено, что их микроструктура неоднородна. Структура края образца (рисунок 5, б) представляет собой мартенсит, а центрального поверхностного участка (рисунок 5, а) – зернистую феррито-карбидную структуру. Наблюдаются отдельные участки с мартенситной структурой, белые участки свидетельствует о содержании остаточного аустенита. Также в структуре наблюдается микропористость, что свойственно для образцов, полученных по МИМ-технологии. Однако, физико-механические свойства этих спеченных образцов соответствуют требованиям ГОСТ Р 59651-2021 на применяемый материал и превосходят характеристики импортного прототипа. Спеченные образцы обладают высокими показателями прочности и твердости, что свидетельствует о повышенной хрупкости образцов (таблица 3).

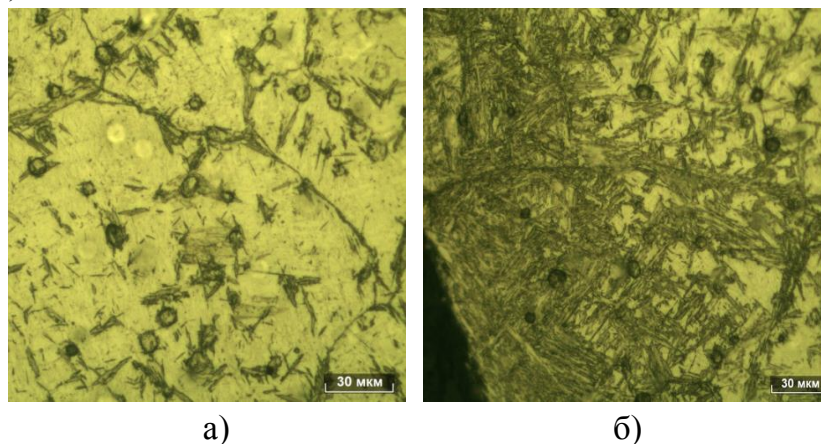


Рисунок 5 – Микроструктура образца, спеченного из отечественного гранулята:
а – центрального участка образца увеличение x500, б – края образца, увеличение x500

Таблица 3 – Физико-механические свойства спеченных образцов из порошка нержавеющей стали 09X16H4Б

Материал	Свойство				
	Временное сопротивление при разрыве σ_B , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Плотность ρ , г/см ³	Твердость по шкале HV10
Гранулят 09X16H4Б	1588	1039	8	7,87	440
Импортный гранулят	794-951	647-745	≥ 6	$\geq 7,65$	264-301
ГОСТ Р 59651-2021	не менее 1079	не менее 912	не менее 8	не менее 7,50	не менее 330

Результаты исследования показали, что применение термической обработки позволяет добиться повышения пластичности, уменьшить твердость и хрупкость материала за счет снятия внутренних напряжений в образцах (таблица 4).

Таблица 4 – Физико-механические свойства спеченных образцов из порошка нержавеющей стали 09X16H4Б после термической обработки

Материал	Свойство				
	Временное сопротивление при разрыве, σ_B , МПа	Условный предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Твердость по шкале HV10	Плотность ρ , г/см ³
Гранулят 09X16H4Б	1270	1070	9	355	7,69
ГОСТ Р 59651-2021	не менее 1100	не менее 930	не менее 8	не менее 330	не менее 7,50

Проведенный анализ микроструктуры образцов показал, что структура представляет собой среднеигльчатый мартенсит отпуска, в которой также наблюдается остаточная микропористость.

Аналогичным образом подбиралась рецептура гранулята из порошка нержавеющей стали марки 12X18H10T и связующей системы на основе ПФЛ, обеспечивающая оптимальные реологические свойства смеси. В итоге для изготовления гранулята была выбрана рецептура с соотношением исходных компонентов, % мас.: порошок 12X18H10T – 90,0, ПФЛ – 8,0, ПЭВД – 1,0, СК – 1,0. ПТР полученного гранулята составил – 268 г/10 мин, плотность – 5,1 г/см³; неоднородность – (Δ) 0,27 %.

В результате металлографического анализа центрального участка спеченного образца из стали 12X18H10T установлено, что микроструктура спеченного образца представляет собой зернистую феррито-карбидную структуру. Также в структуре наблюдается микропористость, что свойственно для образцов, полученных по МИМ-технологии при использовании связующей системы на основе ПФЛ. Физико-механические свойства спеченных образцов соответствуют требованиям ГОСТ Р 59651-2021 на применяемый материал (таблица 5). В связи с этим термообработка и исследования свойств после термообработки не проводились.

Таблица 5 – Физико-механические свойства спеченных образцов из порошка нержавеющей стали 12X18H10T

Образец	Свойство				
	Временное сопротивление при разрыве σ_B , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Плотность ρ , г/см ³	Твердость по шкале HV10
Гранулят 12X18H10T	5660	1970	53,8	7,56	165
ГОСТ Р 59651-2021	не менее 4500	не менее 1670	не менее 40	не менее 7,50	не менее 120

В шестой главе приведены результаты практической реализации разработанного отечественного гранулята на основе полиформальдегида в АО «ФНПЦ «ПО «СТАРТ» им. М.В. Проценко» (г. Заречный Пензенской области)

Приведенные технико-экономические расчеты возможных результатов реализации МИМ-технологий в условиях машиностроительного производства АО «ФНПЦ «ПО

«СТАРТ» им. М.В. Проценко» показали их высокую технико-экономическую эффективность. Показано, что применение МИМ-технологии в серийном производстве позволяет добиться снижения себестоимости готовой продукции в 2-7 раз по сравнению с традиционными методами механической обработки, так как переход на изготовление малогабаритных стальных деталей массой от нескольких граммов до долей грамма по МИМ-технологии обеспечивает удельное снижение затрат от 17 до 212 рублей на один грамм готового продукта. При среднем снижении затрат на 100 руб/г общее снижение затрат в 2025 году при годовом выпуске около 350 кг малогабаритных стальных деталей (с учетом удаления связующего из 400 кг гранулята) составило около 35 миллионов рублей.

Результаты научной работы использованы АО «ФНПЦ «ПО «СТАРТ» им. М.В. Проценко» при разработке технологических регламентов изготовления гранулятов из порошков сталей 09X16H4Б, 12X18H10T, 20X13, 30X13, 03X17H14M2, 38XM и карбонильного железа для обеспечения серийного выпуска деталей по МИМ-технологии весом от 0,5 до 80 гр.

В рамках совместных исследований влияния состава связующего в грануляте на повышение точности изделий при промышленном изготовлении по МИМ-технологии было подтверждено, что при регулировании состава связующего, а также изменения его соотношения к металлической фазе, величиной усадки изделий можно эффективно управлять, обеспечивая необходимую размерную точность конечных изделий. Так при увеличении содержания в грануляте на основе карбонильного железа и полиформальдегидного связующего содержания ПЭВД на 0,06 % удалось добиться величины усадки, обеспечивающей размеры деталей после спекания в пределах 0,03 мм от номинала, что соответствует допуску по качеству h9 (при первоначальном качестве h10), при сохранении допустимых физических и механических свойств деталей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментально установлены состав, структура и свойства импортного гранулята Catamold® 42CrMo4, выбранного в качестве прототипа. Показано, что его металлическая часть состоит из тонкодисперсного сферического порошка железа с примесями хрома и молибдена, полимерная фаза представлена полиформальдегидом и полиэтиленом, среднее значение показателя текучести расплава (ПТР) составляет 561 г/10 мин.

2. Обоснован выбор отечественных компонентов для получения металлополимерных гранулятов с полиформальдегидным связующим: порошка карбонильного железа, порошков сталей 09X16H4Б и 12X18H10T, полиформальдегида, полиэтиленов высокого и низкого давления, парафина и стеариновой кислоты.

3. Установлено, что реологические свойства отечественных металлополимерных гранулятов определяются соотношением металлической и полимерной фаз, а также содержанием технологических добавок. Введение стеариновой кислоты в количестве 0,4-1,0 % или парафина в количестве 1,0-2,0 % увеличивает показатель текучести расплава почти в 2 раза, а добавление полиэтиленов высокого или низкого давления в количестве 0,5-1,5 % позволяет регулировать ПТР до заданного диапазона 200-500 г/10 мин.

4. Определены технологические параметры получения гомогенной металлополимерной композиции: последовательное смешение компонентов при нагреве от 140 °С до 210 °С со скоростью 1 °С/мин в течение 85 мин и формование смеси при давлении 15-20 МПа. Указанные параметры обеспечивают равномерное распределение металлического порошка и связующего в грануляте.

5. Разработаны составы отечественных гранулятов на основе карбонильного железа, сталей 09X16H4B и 12X18H10T с полиформальдегидным связующим. Для гранулятов на основе карбонильного железа получен ПТР – 230-297 г/10 мин, для гранулята на основе стали 09X16H4B – 254 г/10 мин, для гранулята на основе стали 12X18H10T – 268 г/10 мин.

6. Установлено, что разработанные грануляты обеспечивают получение спеченных стальных изделий с физико-механическими свойствами, соответствующими требованиям ГОСТ Р 59651-2021. Для изделий из гранулята на основе карбонильного железа получены предел прочности 1550 МПа, предел текучести 1314 МПа и относительное удлинение 8,41 %. Для изделий из стали 09X16H4B после термической обработки получены предел прочности 1270 МПа, предел текучести 1070 МПа и относительное удлинение 9 %. Для изделий из стали 12X18H10T получены предел прочности 5660 МПа, предел текучести 1970 МПа и относительное удлинение 53,8 %.

7. Показано, что увеличение содержания связующего в грануляте приводит к росту усадки и снижению плотности и твердости спеченных изделий. Установлено, что изменение содержания ПЭВД с 1,50 до 1,56 % позволяет повысить размерную точность изделий с качества h10 до h9 при сохранении допустимых физико-механических свойств.

8. Подтверждена промышленная применимость разработанных гранулятов в АО «ФНПЦ «ПО «Старт» им. М.В. Проценко» для серийного изготовления деталей по МИМ-технологии массой от 0,5 до 80 г. Применение разработанных гранулятов позволило обеспечить снижение себестоимости готовой продукции в 2-7 раз по сравнению с традиционной механической обработкой, годовой экономический эффект в 2025 году составил около 35 млн руб.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях

1. Пархоменко, А.В. Разработка гранулята на полиформальдегидном связующем на основе порошка нержавеющей стали 09X16H4B для МИМ-технологии / А.В. Пархоменко, А.П. Амосов, А.М. Пастухов // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2025. – Т. 19. – № 3. – С. 15-24.

Parkhomenko, A.V. Development of a polyoxymethylene-based feedstock for metal injection molding using 09Cr16Ni4Nb stainless steel powder / A.V. Parkhomenko, A.P. Amosov, A.M. Pastukhov // Powder Metallurgy and Functional Coatings. – 2025. – 19(3). – P. 15–24.

2. Пархоменко, А.В. Разработка и применение гранулята на основе порошка нержавеющей стали 12X18H10T для МИМ-технологии / А.В. Пархоменко, А.П. Амосов,

А.М. Пастухов // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2025. – № 3. – С. 73-81.

3. Пархоменко, А.В. Разработка отечественного порошкового гранулята со связующим на основе полиформальдегида для МИМ-технологии / А.В. Пархоменко, А.П. Амосов, А.Р. Самборук, С.В. Игнатов, Д.В. Костин, А.С. Шульtimiова // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2013. – № 4. – С. 8-13.

Parkhomenko, A.V. Development of domestic powder granulate with a polyformaldehyde-based binder for MIM technology / A.V. Parkhomenko, A.P. Amosov, A.R. Samboruk, [et al] // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2015. - Vol. 56. - P. 68-72.

4. Пархоменко, А.В. Развитие связующих веществ в гранулятах для МИМ-технологии / А.В. Пархоменко, А.Р. Самборук, С.В. Игнатов, Д.В. Костин, А.С. Шульtimiова // Вестник Самарского Государственного Технического Университета. Серия «Технические науки». – 2013. – № 2 (38). – С. 91-98.

5. Пархоменко, А.В. Литьевое порошковое формование металлических деталей / А.В. Пархоменко, А.П. Амосов, А.Р. Самборук, А.А. Антипова, Н.В. Кобзева // Металлургия машиностроения. – 2012. – № 3. – С. 38-41.

6. Пархоменко, А.В. Научоемкая технология инъекционного порошкового формования металлических изделий (МИМ-технология) / А.В. Пархоменко, А.П. Амосов, А.Р. Самборук // Научоемкие технологии в машиностроении. – 2012. – № 12. – С. 8-13.

Публикации в других изданиях

7. Пархоменко, А.В. Практическая реализация производства отечественных металлополимерных гранулятов для технологии инъекционного формования металлических порошков в условиях машиностроительного предприятия / А.В. Пархоменко, А.П. Амосов, А.М. Пастухов // Высокие технологии в машиностроении: материалы XXIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием – Самара, 2026. – С. 366-369.

8. Пархоменко, А.В. Влияние состава связующего в грануляте на повышение точности изделий при изготовлении по МИМ-технологии / А.В. Пархоменко, А.П. Амосов, А.Р. Самборук // Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении: сб. материалов VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием – Пермь, 2024. – С. 209-212.

9. Пархоменко, А.В. Развитие применения металлических порошков для МИМ-технологии / А.В. Пархоменко, А.П. Амосов, А.Р. Самборук // Высокие технологии в машиностроении: сб. материалов XXI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Самара, 2024. – С. 285–289.

10. Пархоменко, А.В. Технология инъекционного формования и спекания металлических порошковых материалов (МИМ-технология), как перспективная технология в авиастроительной отрасли / А.В. Пархоменко, А.П. Амосов, А.Р. Самборук // Перспективные материалы и технологии в авиадвигателестроении: материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Самара, 2023. – С. 148-157.

11. Пархоменко, А.В. Зависимость свойств стальных заготовок от содержания связующих веществ в МИМ-грануляте / А.В. Пархоменко, Д.В. Костин, А.В. Чемашкин,

М.В. Малюков // Новое слово в науке и практике: гипотезы и апробация результатов исследований, сборник материалов XXXIII Международной научно-практической конференции. – Новосибирск, 2016. – С. 66-72.

12. Пархоменко, А.В. Характеристики МИМ-гранулята на основе порошка карбонильного железа марки НМ и полиформальдегида / А.В. Пархоменко, А.Р. Самборук, Д.В. Костин, А.В. Чемашкин, М.В. Малюков // Интеллектуальный потенциал XXI века: ступени познания: сборник материалов XXXII Молодежной научно-практической конференции.— Новосибирск, 2016. – С. 89-93.

13. Пархоменко, А.В. Гранулят для МИМ-технологии из отечественного сырья / А.В. Пархоменко, Н.В. Кобзева, А.А. Антипова // Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент: материалы III Международной научно-инновационной молодежной конференции.— Тамбов, 2011. – С. 124-126.

14. Пархоменко, А.В. Разработка отечественного гранулята на основе полиоксиметилена для МИМ-технологии / А.В. Пархоменко, А.П. Амосов, А.Р. Самборук, О.И. Алтухов, А.А. Антипова, Н.В. Кобзева // Научноёмкие технологии в машиностроении: материалы Всероссийской научно-технической интернет конференции с международным участием. – Самара, 2011. – С.165-168.

15. Пархоменко, А.В. Исследование состава и структуры импортного гранулята для МИМ-технологии / А.В. Пархоменко, А.П. Амосов, А.Р. Самборук, А.А. Ермошкин // Высокие технологии в машиностроении: материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Самара, 2010. – С. 202-205.

Автореферат отпечатан с разрешения объединенного диссертационного совета
99.2.039.02 на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет» и ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С.П. Королёва» (протокол № 8 от 29.06.2026 г.)

Формат 60x84 $\frac{1}{16}$. Набор компьютерный.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № _____.

Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «СамГТУ»

Отдел типографии и оперативной печати

443100 г. Самара ул. Молодогвардейская, 244