

На правах рукописи



Понамарева Татьяна Борисовна

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА НОВЫХ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ
СОСТАВОВ ПРОТИВОПРИГАРНЫХ ПОКРЫТИЙ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОТЛИВОК**

2.6.3. Литейное производство

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Магнитогорск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Научный руководитель

Феоктистов Николай Александрович,
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Илларионов Илья Егорович,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова»

Фирстов Александр Петрович,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Металлургических технологий» Нижнетагильского технологического института (филиала) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Защита диссертации состоится «17» июня 2025 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.324.01 на базе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, малый актовый зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на сайте: <https://www.magtu.ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, доктор технических наук, профессор

Мезин
Игорь Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Литейное производство является одной из основных заготовительных баз машиностроительного комплекса. В настоящее время в РФ порядка 30% всего объема производства литых заготовок изготавливается в песчано-глинистых формах (ПГФ) и 70% – в формах из холоднотвердеющих смесей (ХТС). На поверхности стальных отливок, особенно сложной конфигурации и имеющих большие габаритные размеры, часто возникает пригар, предупреждение которого, как правило, осуществляется с помощью нанесения на поверхность литейной формы специальных противопригарных покрытий (ПП), защищающих рабочие поверхности формы от непосредственного соприкосновения с расплавом металла, препятствующих его проникновению в поры смеси и химическому взаимодействию оксидов металла с материалом формы.

Традиционно в качестве таких покрытий при производстве стальных отливок используют ПП на основе высокоогнеупорного наполнителя – цирконового концентрата. Многолетняя практика производства литых изделий показала, что применение ПП устраняет необходимость дополнительных работ по очистке поверхности на крупных отливках. В то же время цирконовый концентрат является дорогостоящим, остродефицитным и импортным сырьем. В связи с этим разработка новых составов противопригарных покрытий для стального литья на основе недефицитных огнеупорных материалов из класса промышленных отходов или комбинированных (смесевых) наполнителей, обеспечивающих требуемую чистоту поверхности отливки и снижение её себестоимости, является актуальной задачей литейного производства.

Степень разработанности темы исследования. Диссертационная работа представляет собой завершенное научное исследование, которое является обобщением теоретических и практических результатов по вопросам защиты поверхности стальной отливки от образования пригара. Анализ причин образования пригара, процессов, протекающих в зоне контакта отливка–литейная форма, показал необходимость повышения высокотемпературной прочности применяемых водных противопригарных покрытий на основе цирконового концентрата, а также разработки новых неводных составов ПП на основе недефицитных промышленных отходов.

Объект исследования – противопригарные покрытия для литейных форм из песчано-глинистых и холоднотвердеющих смесей.

Предмет исследования – технологические и рабочие свойства противопригарных покрытий разного компонентного состава.

Цель работы – разработка научно-обоснованных технологических решений для создания новых противопригарных покрытий, обеспечивающих требуемое качество поверхности отливок при снижении затрат на изготовление литейной формы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- исследовать не нормируемые в технических условиях физико-химические свойства промышленно выпускаемых цирконовых противопригарных покрытий на водной и органической основах, наряду с нормируемыми показателями;
- разработать научно-обоснованное техническое решение по увеличению высокотемпературной прочности цирконового покрытия на водной основе;
- разработать состав нового неводного (органического) покрытия для литейных форм из ХТС на основе вторичных материалов;

- провести лабораторные и опытно-промышленные испытания разработанных противопригарных покрытий и их влияние на качество отливок.

Научная новизна:

1. Предложена математическая модель, устанавливающая взаимосвязь основных технологических свойств противопригарного покрытия: вязкости, плотности, толщины и прочности слоя к истиранию от компонентного состава. Выявлено, что требуемый комплекс свойств, обеспечивающий получение всей номенклатуры литья по массе, возможно достичь при следующем компонентном составе:

- для водного покрытия: метакаолин 18,0–22,0 %; цирконовый концентрат 28,0–31,0 %; бентонит 2,5–4,5 %; декстрин 1,3–1,7 %; вода – остальное;

- для неводного покрытия: отработанный катализатор 45–55%, поливинилбутираль 0,9–1,2 %, модифицированная фенолформальдегидная смола СФПР-050 1,0–2,0 %, изопропиловый спирт – остальное.

2. Установлено влияние метакаолина на высокотемпературную прочность противопригарного покрытия на водной основе для разработки его нового состава с комбинированным наполнителем, что обеспечило требуемую чистоту поверхности крупногабаритного литья. Доказано, что формирование высокотемпературной прочности покрытия происходит в период контактного взаимодействия расплава и литейной формы за счет образования новой муллитовой фазы ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), формирующей термостойкий слой, приводящий к увеличению прочности при температуре 1500 °С на 30–60 % (с 3,0 кг/мм до 4,1 – 4,9 кг/мм).

3. Разработана новая методика дифференцированного определения газотворности противопригарного покрытия, отличающаяся от известной разделением источников газообразования и позволившая определить, что наибольшее отрицательное влияние на качество поверхности литого изделия оказывает газотворная способность противопригарного покрытия за счет испарения воды. Выявлено, что отсутствие газовых дефектов на поверхности литых изделий обеспечивается при испарении воды из покрытия не более 5 см³/г.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработаны и обоснованы составы противопригарных покрытий: с комбинированным наполнителем (метакаолин и циркон) для песчано-глинистых форм (водное ПП) и на основе отработанного алюмохромового катализатора (ОАК) для форм из ХТС (неводное ПП).

2. Снижена стоимость ПП в 2,5 раза для песчано-глинистых форм при использовании комбинированного наполнителя.

3. Увеличена высокотемпературная прочность защитного покрытия на 60 % при комбинированном использовании цирконового концентрата с метакаолином.

4. Выявлено, что неводное покрытие на основе ОАК защищает поверхность от образования пригара на средних и мелких отливках.

5. Разработанные противопригарные покрытия прошли промышленные испытания в литейном цехе ООО «Механоремонтный комплекс» на стальных шлаковых чашах объемом 16 м³, «корпус подшипника» и «зуб ковша экскаватора». На состав водного противопригарного покрытия на основе комбинированного наполнителя (метакаолин и циркон) получен патент РФ №2671520.

Методология и методы исследования. Условную вязкость, плотность ПП, седиментационную устойчивость, газопроницаемость, прочность к истиранию, глубину проникновения проводили по стандартным методикам. Кроющую способность определяли по методике, представленной в патентной литературе. Толщину покровного слоя и

газотворную способность определяли методиками, разработанными в исследовательской лаборатории МГТУ им. Г.И. Носова (г. Магнитогорск). Химический состав всех компонентов существующих и разрабатываемых противопригарных покрытий анализировали на энергодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре Quant'X Термо Техно по стандартной методике, описанной в ГОСТ Р 55410-2013. Химический состав отливки определяли на оптико-эмиссионном спектрометре SPECTRO MAXx (Германия) по ГОСТ Р 54153-2010. Изучение морфологии поверхности образцов осуществляли на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM – 6490LV, рентгеноструктурный анализ выполнен на рентгеновском дифрактометре SHIMADZU XRD-7000. Синхронный термический анализ (СТА), включающий дифференциальную сканирующую калориметрию (ДСК) и определение потери массы (ТГ), проводили на приборе STA 499 F3 Jupiter фирмы Netzsch. Шероховатость поверхности отливок определяли на оптическом профилометре Contour GT K1. Все представленные методы исследований проведены в исследовательских лабораториях МГТУ. Гранулометрический анализ на анализаторе Malvern Mastersizer 2000 (Великобритания) проведен ЗАО «Урал-Омега».

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты разработки новых составов противопригарных покрытий взамен серийно применяемых цирконовых покрытий для снижения их стоимости.
2. Результаты исследований свойств разработанных противопригарных покрытий с комбинированным наполнителем метакаолином и цирконовым концентратом и на основе отходов алломохромового катализатора для внедрения в технологический процесс на литейных предприятиях РФ.
3. Новая методика дифференцированного определения газотворности противопригарного покрытия для количественной оценки влияния его компонентного состава на разные источники газообразования.

Степень достоверности научных положений и полученных результатов обоснована:

- применением современных методов исследования противопригарных покрытий на сертифицированном оборудовании, численного моделирования и статистической обработки данных;
- сравнением и подтверждением расчетных данных с результатами физических экспериментов и образцов, а также сопоставлением результатов исследований с известными результатами в этой области;
- практической реализацией и подтверждением эффективности полученных научных результатов при разработке технических и технологических решений в условиях действующего литейного производства;

Текст диссертации и автореферата проверен на отсутствие плагиата с помощью программы «Антиплагиат. ВУЗ».

Результаты работы апробированы на 76, 78, 80-й международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования», ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» (г. Магнитогорск, 2018-2022 гг.).

Личный вклад автора: заключается в научной постановке задач исследования, планировании и проведении экспериментов, в разработке методик исследования и обработке экспериментальных данных, в анализе полученных результатов и в формировании выводов, заключений, написании научных статей, а также участии в опытно-промышленных испытаниях покрытий.

Настоящая работа является продолжением научно-исследовательских работ, выполняемых на кафедре «Литейные процессы и материаловедение» ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» в рамках научно-исследовательских работ с ООО «Механоремонтный комплекс» ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Включенные в диссертацию и выносимые на защиту результаты представляют собой часть общих результатов научно-исследовательских работ по рассматриваемой проблеме, которые были выполнены автором с соавторами и были получены непосредственно автором или при его ведущем участии.

Публикации. По теме исследования было опубликовано 15 статей, в том числе 10 статей в журналах научных трудов, рекомендованных для публикаций материалов диссертаций ВАК РФ, из них 2 статьи опубликованы в журналах категории К3 и 8 статей в журналах категории К2, а также одна статья – в издании, входящем в наукометрические базы данных Scopus и Web of Science. Получен 1 патент РФ.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне, соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.6.3. Литейное производство (технические науки): 1, 17.

Структура и объем работы. Диссертация представлена на 156 страницах, включая 46 таблиц, 47 рисунков, 120 источников литературы. Структура работы включает введение, 5 глав, основные выводы, список использованных источников и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и основные задачи диссертации, показана научная новизна и практическая значимость результатов исследований.

В первой главе проведен литературный обзор, рассмотрены причины образования пригара (температура заливки, длительность заполнения металлом формы, продолжительность затвердевания, толщина и конфигурация отливки и др.), описаны процессы, протекающие в зоне контакта «литейная форма – отливка» (тепловые, физические, химические). Показано, что самым распространенным и действенным способом борьбы с пригаром является нанесение противопригарных покрытий на поверхность форм. Определены основные требования к огнеупорным наполнителям и противопригарным покрытиям. Проанализированы составы традиционно применяемых ПП для стального литья, основные их свойства. Однако многие из них обладают высокой ценой или имеют ограниченную область использования, что затрудняет их широкое применение на производстве. Рассмотрен опыт применения в составах покрытий недефицитных, и доступных материалов, прежде всего отходов различных производств (абразивного, металлургического, литейного и т.д.). Среди них особого внимания заслуживают работы Антошкиной Е.Г., Баранова О.Г., Головня А.А., Илларионова И.Е., Кидалова Н.А., Кулакова Б.А., Леушина И.О., Маминой Л.И., Рулева А.А. и др. Такой подход обеспечивает расширение сырьевой базы огнеупорных наполнителей за счет утилизации отходов и объясняется необходимостью экономии и рационального использования имеющихся ресурсов.

На основании анализа литературных данных о существующем российском и международном опыте по вопросам повышения качества отливок за счет использования эффективных составов противопригарных покрытий были сделаны выводы, поставлены цель и задачи исследования.

Во второй главе приведены стандартные методики исследования для решения поставленных задач, методика планирования эксперимента с применением полного факторного эксперимента 2³ и разработанная методика определения газотворности противопригарного покрытия.

Разработанная методика определения газотворности на анализаторе углерода и воды ELTRA CW 800M MULTIPHASE основана на сжигании пробы противопригарного покрытия в печи сопротивления при температуре 1000 °С в потоке очищенного кислорода и определении количества выделившихся газов H₂O и CO₂ методом инфракрасной абсорбции. Методика универсальна, менее трудозатратна, позволяет получать достоверные результаты с высокой точностью, что подтверждено сравнительным анализом с существующей методикой. Относительная погрешность (δ) измерения газотворности по разработанной методике равна 10%, существующей -15%. Данную методику можно использовать как альтернативу методике по ГОСТ 23409.12-78.

Газотворность Г, см³/г, определяют по формуле

$$Г = Г(\text{CO}_2) + Г(\text{H}_2\text{O}) = \frac{10 \cdot C_1 \cdot m \cdot V}{M(\text{CO}_2)} + \frac{10 \cdot C_2 \cdot m \cdot V_m}{M(\text{H}_2\text{O})},$$

где Г(CO₂) – газотворность за счет образования и выделения диоксида углерода (CO₂) из покрытия, см³/г; Г(H₂O) – газотворность за счет испарения разных видов воды из покрытия, см³/г; C₁ – массовая доля диоксида углерода, %; C₂ – массовая доля воды, %; m – масса образца, г; V_m – молярный объём одного моля газа, м³/моль; M (CO₂) – молярная масса диоксида углерода, моль/г; M(H₂O) – молярная масса воды, моль/г.

Предложенные решения позволяют дифференцированно определять газотворность ПП за счёт различных источников газообразования (воды и диоксида углерода), что является важным при выборе компонентов для разработки новых составов.

В третьей главе приведены результаты исследования свойств цирконовых ПП (таблица 1), применяемых в настоящее время в литейных цехах: водной (Ц-1) и органической (ЛК-22Ц), для окрашивания форм из песчано-глинистых (ПГС) и холодно-твердеющих смесей соответственно. Сравнительная характеристика свойств ПП на основе выбранных огнеупорных наполнителей и применяемых цирконовых покрытий необходима для того, чтобы показатели качества нового разрабатываемого ПП были на уровне или лучше существующих, при одновременном снижении его себестоимости. Такой подход обеспечивает качество поверхности стальных отливок требованиям технических условий. Отметим, в нормативно-технической документации нормируются основные показатели, такие как условная вязкость, плотность, седиментационная устойчивость, прочность слоя покрытия к истиранию, характеризующие свойства противопригарного покрытия на этапе приготовления. В то же время показатели толщина слоя, глубина проникновения, газотворность и газопроницаемость ПП также важны, они совместно с нормируемыми обеспечивают необходимый уровень защиты поверхности отливки от образования дефектов поверхностного слоя. На полученные количественные характеристики (см. таблицу 1) ориентировались в дальнейшем при разработке новых составов противопригарных покрытий.

Таблица 1 – Свойства противопригарных покрытий

Наименование показателя	Значение определяемой характеристики		Требования по ТИ 3-313-ЛС-18-2014 / ТУ 2223-003-81482096-2017
	Ц-1 (ТИ 3-313-ЛС-18-2014)	ЛК-22Ц (ТУ 2223-003-81482096-2017)	
Условная вязкость разведенного покрытия при температуре (20±2) °С, с	13,5	17,2	(13,0-14,0) / (16,0-25,0)
Плотность разведенного покрытия при температуре (20±2) °С, г/см ³	1,8	1,8	(1,70-1,80) / (1,70-2,10)
Седиментационная устойчивость разведенного покрытия, %	93,0	98,0	не менее 92,0 / не менее 98,0
Прочность слоя покрытия к истиранию, кг/мм	2,2	2,5	не менее 1,5 / не менее 2,5
Толщина окрашенного слоя*, мм	1,0	0,8	не менее 0,5
Глубина проникновения*, мм	2,0	2,0	не менее 1,5
Газотворность*, см ³ /г	14,3	14,6	не более 15,5
Газопроницаемость*, ед.	50,0	50,0	не менее 50,0

* Данные научно-технической литературы.

Учитывая, что обеспечение оптимальных физико-механических и технологических свойств противопригарных покрытий зависит от качества сырья, используемого для изготовления, в данной главе представлены результаты исследования физико-химических свойств материалов различных производителей методами рентгенофлуоресцентного, рентгенофазового, термического и гранулометрического анализа.

На основании экспериментальных данных выбраны следующие составляющие для разрабатываемых ПП (таблица 2).

Таблица 2 – Материалы и их назначение в составе противопригарных покрытий

Материал	Марка	Нормативный документ	Назначение
Цирконовый концентрат	КЦП 45	ТУ 14-10-015-98	Наполнитель
Метакаолин	МКЖЛ-1	ТУ 5729-097-12615988-2013	Наполнитель
Отход отработанного алюмохромового катализатора	ИМ-2201	ТУ 2123-093-16810126-2004	Наполнитель
Декстрин кукурузный желтый	Первого сорта	ГОСТ 6034-2014	Связующее
Бентонит	П1Т ₁	ГОСТ 28177-89	Стабилизатор, связующее
Поливинилбутираль	КА высший сорт	ГОСТ 9439-85	Стабилизатор, связующее
Фенолоформальдегидная смола	СФПР-050	ТУ 2257-767-55778270-2007	Связующее

Метакаолин (Al₂O₃·2SiO₂) используют в настоящее время в качестве пуццолановой добавки для модификации портландцементных композиций – бетонов и сухих строительных смесей. Он представляет собой экологически чистый алюмосиликатный минерал, специально производимый из каолинитов путем обжига в температурном диапазоне 650–750°С.

Методом термического анализа установлено, что при высокотемпературном нагреве метаксолина в результате протекания полиморфных превращений преобразуется в муллит, что подтверждается наличием на кривой ДСК в интервале температур 950–1050°C экзотермического эффекта с максимумом пика при 989°C.

Это являлось основанием выбора метаксолина в качестве огнеупорного наполнителя для повышения высокотемпературной прочности покрытия. Высокотемпературная когезионная прочность противопожарного покрытия на основе комбинированного наполнителя циркона с метаксолином обеспечивается за счет формирования армирующего каркаса в виде игольчатых кристаллов муллита с термостойкостью до 1800°C, образующегося в результате протекания полиморфных превращений с метаксолином при температуре свыше 950°C. Иглы муллита образуют связи между огнеупорными частицами циркона и предотвращают разрушение противопожарного покрытия в период взаимодействия расплава с рабочей поверхностью литейной формы за счет повышения стойкости к термоудару.

Химический состав метаксолина МКЖЛ-1, % мас.: 42-43 Al₂O₃; 53-54 SiO₂; 0,4-0,8 Fe₂O₃; 0,3-0,5 TiO₂; 0,8-1,1 K₂O; до 0,15 CaO; до 0,05 Na₂O (ТУ 5729-097-12615988-2013).

Исследования гранулометрического состава метаксолина МКЖЛ-1 показали, что 100% частиц имеет средний размер от 0,5 до 10 мкм. Принимая во внимания то, что ультрадисперсный размер частиц метаксолина обуславливает его высокую водопотребность, предложили его использовать не в качестве самостоятельного наполнителя, а в составе комбинированного, совместно с цирконовым концентратом.

В качестве наполнителя неводного противопожарного покрытия были выбраны отходы алюмохромового катализатора ИМ-2201. Отработанный алюмохромовый катализатор ИМ-2201 (ОАК) относится к разряду высокоогнеупорных мелкодисперсных наполнителей. Он не требует предварительного дополнительного помола, просева и других операций подготовки и готов к использованию в виде поставки ИМ-2201 не является дефицитным и имеет постоянный химический состав, % мас: 65-66 Al₂O₃; 11,5-12,5 SiO₂; 17-18 Cr₂O₃; 1,4-1,6 MgO; 1,3-1,6 K₂O; 0,10-0,15 Na₂O; 0,04-0,08 CaO; 0,01-0,02 Fe₂O₃.

Четвертая глава диссертационной работы посвящена подбору составов и исследованию свойств разработанных противопожарных покрытий для литейных форм из ПГС и ХТС.

Были разработаны два состава ПП для стального литья: на водной основе и на основе органического растворителя.

Водное противопожарное покрытие разрабатывалось на основе комбинированного наполнителя, состоящего из метаксолина (МК) и циркона (Ц) в соотношении (МК)/(Ц) = 0,6-0,8 соответственно и связующих – декстрина и бентонита.

Для выбора концентрации компонентов были приготовлены несколько вариантов составов водного противопожарного покрытия. На основании выполненного комплекса исследований и учета анализа литературных данных был определен диапазон концентраций компонентов. Далее методами математического планирования эксперимента с использованием трехфакторного эксперимента типа 2³ были получены регрессионные уравнения (1)-(3), (5) адекватность которых подтверждается критерием Фишера.

Математические зависимости физико-механических свойств водного ПП на основе комбинированного наполнителя имеют вид:

$$y_1 = 4,37875 + 7,6175X_1 + 0,542X_2 + 2,7975X_3 - 3,325X_1X_3 ; \quad (1)$$

$$y_2 = 0,422 + 1,214X_1 + 0,118X_2 + 0,135X_3 - 0,107X_1X_2 ; \quad (2)$$

$$y_3 = -0,28575 + 1,295X_1 + 0,1985X_2 + 0,0095X_3 - 0,21X_1X_2 + 0,023X_2X_3 , \quad (3)$$

где y_1 – условная вязкость разведенного покрытия, с; y_2 – плотность разведенного покрытия, г/см³; y_3 – толщина окрашенного слоя, мм; X_1 – соотношение МК/Ц; X_2 – количество бентонита, %; X_3 – количество декстрина, %.

По полученным уравнениям и в соответствии с принятыми граничными значениями функций отклика (таблица 3) установили рациональный состав водного противопопригарного покрытия на основе комбинированного наполнителя (патент РФ № 2671520).

Таблица 3 – Параметры оптимизации и их граничные значения

Код параметра оптимизации	Физический смысл параметра оптимизации	Граничное значение функции отклика
Y_1	Вязкость условная по вискозиметру ВЗ-246 (сопло диаметром 4 мм), с	12,0-13,5
Y_2	Плотность, г/см ³	не менее 1,65
Y_3	Толщина окрашенного слоя, мм	не менее 0,9

В таблице 4 представлен компонентный состав разработанного противопопригарного покрытия для стального литья на водной основе, в таблице 5 приведены свойства в сравнении с показателями применяемого водного противопопригарного покрытия Ц-1.

Таблица 4 – Компонентный состав водного противопопригарного покрытия для ПГФ

Наименование компонентов	Количество компонентов, мас. %
Цирконовый порошок	28,0–31,0
Метакаолин	18,0–22,0
Бентонит	2,5–4,5
Декстрин	1,3–1,7
Вода	Остальное до 100%

Таблица 5 – Свойства водных противопопригарных покрытий для ПГФ

Наименование физико-механических характеристик	Разработанное покрытие	Цирконовое покрытие (Ц-1)
Условная вязкость разведенного покрытия при температуре (20±2) °С, с	13,0	13,5
Плотность разведенного покрытия, г/см ³	1,7	1,8
Седиментационная устойчивость разведенного покрытия, %	100,0	93,0
Прочность слоя покрытия к истиранию при температуре (20±2) °С, кг/мм	2,5	2,2
Толщина окрашенного слоя, мм	1,0	1,0
Глубина проникновения, мм	2,0	2,0
Газотворность, см ³ /г	13,8	14,3
Газопроницаемость, ед.	60,0	50,0

Введение метакАОлина в состав разрабатываемого водного ПП позволяет качественно изменить исследуемые свойства покрытия.

Известно, что наиболее опасным источником газовой выделения, влияющим на образование газовых дефектов на поверхности отливки, является вода, так как при испарении 1 см³ воды выделяется 1200–1450 см³ водяного пара, что может привести к дефектам газового происхождения на поверхности отливки. Отмечено некоторое снижение как общей газотворности разрабатываемого покрытия (13,8 см³/г), так и газотворности за счет испарения воды (3,5 см³/г) в сравнении с покрытием Ц-1 (14,3 см³/г и 4,5 см³/г), что снижает риски образования дефектов газового происхождения (пористость, раковины). Источниками газообразования в разрабатываемом ПП являются процессы, связанные с испарением остаточной (химически связанной) воды из метакАОлина и окислением (горением) органического компонента (декстрина) с образованием влаги и диоксида углерода (CO₂).

Установлена зависимость высокотемпературной прочности противопригарного покрытия от температуры (X_1 , °C), времени контактного взаимодействия на границе раздела «расплав – литейная форма» (X_2 , мин) и от количества метакАОлина (X_3 , %), в кодированном (4) и натуральном (5) виде:

$$y = 3,026 + 0,739x_1 + 0,407x_2 + 0,811x_3 + 0,225x_1x_2. \quad (4)$$

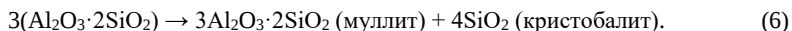
Анализ полученных коэффициентов значимости факторов уравнения (4) показал, что на высокотемпературную прочность ПП оказывают влияние все три фактора. При этом наибольшее влияние оказывают концентрация метакАОлина и температура, что логично, так как с ростом температуры количество муллита непрерывно увеличивается и достигает максимума при температуре 1350–1400°C. Длительная выдержка и увеличение температуры способствуют росту кристаллов муллита.

В натуральных значениях факторов уравнение имеет вид

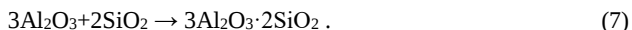
$$y = -3,4409 + 0,0019X_1 - 0,1596X_2 + 0,2028X_3 + 0,0002X_1X_2. \quad (5)$$

Высокотемпературная прочность покрытия при максимальной температуре образования муллита (1500°C) и времени выдержке (10 мин) составила 4,1 и 4,9 кг/мм, без метакАОлина – 3,0 кг/мм.

Повышению высокотемпературной прочности покрытия способствует образование муллита из метакАОлина по реакции



Высвобождаемый в результате первичного синтеза муллита кристобалит возможно связать во вторичный муллит оксидом алюминия, входящим в состав цирконового концентрата (его содержание составляет не более 1,8%) по реакции, протекающей свыше 1200°C:



Количество фазы муллита и кристобалита в ПП определили с помощью методик, представленных в ГОСТ 24704-81. Для этого были приготовлены образцы противопригарных покрытий (на высушенное при (110±10)°C вещество) с содержанием метакАОлина 36% и цирконового концентрата 54% (с разным содержанием оксида алюминия). Для приготовления образца № 1 был взят циркон, в котором содержание алюминия составило 0,1%, для образца № 2 – 1,75%. Образцы № 1-2 выдерживали в печи, предварительно разогретой до 1500°C в течение 10 мин. Результаты исследования представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Количественное определение фаз муллита и кристобалита

Номер образца	Массовая доля фазы, %	
	Муллит	Кристобалит
1	14,2	3,3
2	16,3	2,6

Из данных таблицы 6 следует, что содержание муллита в образце № 2 выше, а кристобалита меньше, чем в образце № 1. Следовательно, в образце № 2 при температуре 1500°C протекает реакция (7).

Результаты исследования позволили установить, что образование муллита в исследуемом противопригарном покрытии связано в первую очередь с его первичным синтезом из метаксолина и затем со вторичным синтезом муллита путем взаимодействия кристобалита с оксидом алюминия, входящим в состав циркона. Это увеличивает суммарную долю образующегося муллита и способствует повышению высокотемпературной прочности противопригарного покрытия с 3,0 до 4,9 кг/мм при 1500°C.

Таким образом, разработанное противопригарное покрытие на основе комбинированного наполнителя – циркона и метаксолина с применением связующего декстрина и бентонита по физико-техническим и эксплуатационным свойствам не уступает известным противопригарным цирконовым покрытиям, а по седиментационной устойчивости и высокотемпературной прочности превосходит его.

Далее представлено второе разработанное ПП для форм из ХТС, где в качестве огнеупорного наполнителя неводного противопригарного покрытия был выбран отработанный алюмохромовый катализатор ИМ-2201.

В состав неводного противопригарного покрытия входят следующие компоненты: наполнитель – отработанный алюмохромовый катализатор, связующее – поливинилбутираль в комбинации с модифицированной фенолформальдегидной смолой марки СФПР-050 и органический растворитель – изопропиловый спирт.

На первом этапе определили необходимую концентрацию ОАК, для этого ориентировались на основные технологические свойства покрытия (рисунок 1).

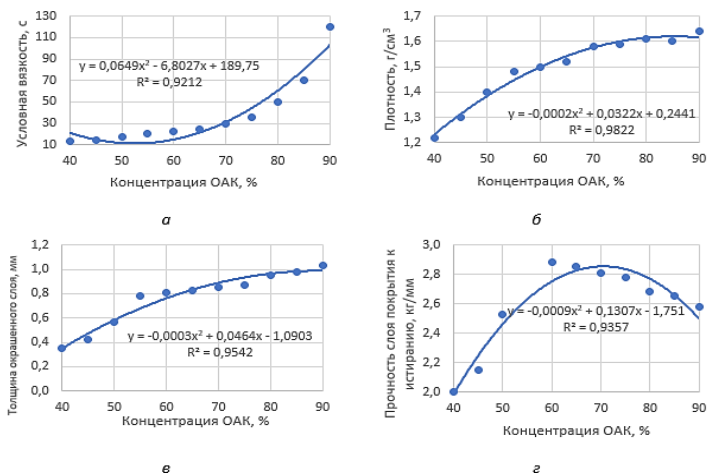


Рисунок 1 – Зависимости технологических свойств ПП от количества ОАК:

а – условной вязкости; б – плотности; в – толщины окрашенного слоя; г – прочности покрытия

Критерием выбора концентрации наполнителя являлась толщина слоя и прочность слоя покрытия к истиранию в заданных пределах: не менее 0,5 мм и 2,5 кг/мм соответственно.

Методом полного факторного эксперимента 2^3 получили зависимости вязкости, плотности, толщины окрашенного слоя и прочности слоя покрытия к истиранию при нормальной температуре от количества огнеупорного наполнителя алюмохромового порошка, связующего поливинилбутирала и фенолоформальдегидной смолы. Регрессионные уравнения для неводного покрытия имеют вид:

$$y_1 = 5,1 + 0,08X_1 - 0,9X_2 + 5,25X_3 + 2,5X_2X_3 ; \quad (8)$$

$$y_2 = 0,139 + 0,0182X_1 + 0,098X_2 + 0,195X_3 ; \quad (9)$$

$$y_3 = 0,654 - 0,0108X_1 - 0,242X_2 - 0,62X_3 + 0,0064X_1X_2 + 0,019X_1X_3 ; \quad (10)$$

$$y_4 = 0,175 + 0,012X_1 + 0,348X_2 + 1,2X_3 . \quad (11)$$

где y_1 – условная вязкость разведенного покрытия, с; y_2 – плотность разведенного покрытия, г/см³; y_3 – толщина окрашенного слоя, мм; y_4 – прочность слоя покрытия к истиранию, кг/мм; количество ОАК – X_1 , %; количество связующих: ФФС – X_2 , % и ПВБ – X_3 , %.

На основе результатов проведенных исследований (см. рисунок 1) и математического планирования эксперимента 2^3 предложен состав неводного противопожарного покрытия (таблица 7) и представлены его свойства (таблица 8).

Таблица 7 – Компонентный состав разработанного неводного противопожарного покрытия для форм из ХТС

Наименование компонентов	Количество компонентов, мас. %
Отходы алюмохромового катализатора ИМ-2001	45,0–55,0
Поливинилбутираль	0,9–1,2
Фенолоформальдегидная смола СФПР–050	1,0–2,0
Изопропиловый спирт	Остальное до 100%

Таблица 8 – Свойства неводных противопожарных покрытий

Наименование физико-механических характеристик	Разработанное покрытие	Цирконовое покрытие ЛК-22Ц
Условная вязкость разведенного покрытия при температуре (20±2) °С, с	17,0	17,2
Плотность разведенного покрытия, г/см ³	1,75	1,80
Седиментационная устойчивость разведенного покрытия, %	98,0	98,0
Прочность слоя покрытия к истиранию при температуре (20±2) °С, кг/мм	2,6	2,5
Толщина окрашенного слоя, мм	0,8	0,8
Глубина проникновения, мм	2,0	2,0
Газотворная способность, см ³ /г	13,5	14,6
Газопроницаемость, ед.	55,0	50,0

Результаты сравнительного анализа показали, что физико-механические показатели и технологические (за исключением газотворности) разработанного неводного состава покрытия на основе отходов алюмохромового катализатора ИМ-2001 находятся на одном уровне с применяемым цирконовым ПП. Это предполагает возможность замены ЛК-22Ц на разработанный состав противопригарного покрытия.

Результаты дифференцированного определения газотворности неводного покрытия, показали низкое содержание газотворности за счет испарения воды ($3,0 \text{ см}^3/\text{г}$) в сравнении с покрытием ЛК-22Ц ($4,2 \text{ см}^3/\text{г}$), что снижает риски образования дефектов газового происхождения.

Внедрение предлагаемого состава неводного противопригарного покрытия позволит улучшить качество поверхности отливок за счет ликвидации пригара. Это устраняет внешнюю сырьевую зависимость по закупке цирконового концентрата, в разы уменьшает транспортные издержки и приводит к снижению себестоимости производства отливок.

В пятой главе представлены результаты лабораторных и опытно-промышленных испытаний разработанных противопригарных покрытий.

Были приготовлены составы водного и неводного противопригарного покрытия. Окрашивание проводили ручным способом – кистью, в один слой. ППФ окрашивали водным ПП с комплексным наполнителем, на форму из ХТС наносили неводное ПП на основе ОАК. Были получены стальные отливки плиты размерами $100 \times 65 \times 30 \text{ мм}$ и куб размерами $40 \times 40 \times 40$ и $100 \times 100 \times 100 \text{ мм}$.

Предварительно окрашенные и высушенные формы залили сталями разных марок (таблица 9), которые выплавляли в печи ИСТ-0,06 с основной футеровкой.

Таблица 9 – Химический состав и температура заливки стали

Марка	T, °C	Массовая доля, %							
		C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
25Л	1550-1560	0,28	0,35	0,58	0,010	0,015	0,010	0,015	0,021
110Г13Л	1490-1510	1,22	0,78	13,5	0,025	0,030	0,055	0,66	0,036
40Х13Л	1520-1530	0,41	0,40	0,62	0,015	0,025	12,8	0,011	0,010

После полного остывания из форм извлекали отливки и осматривали на предмет образования пригара. Полученные отливки представлены на рисунке 2.

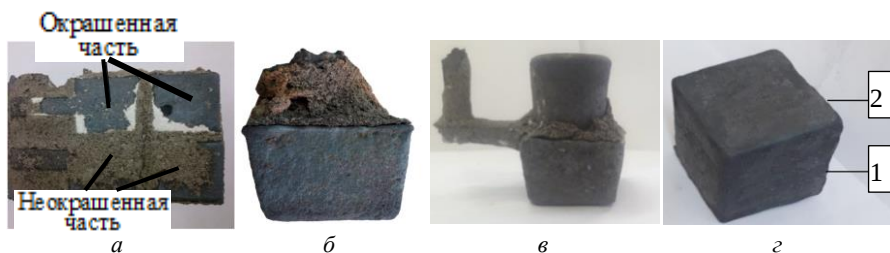


Рисунок 2 – Отливки после окрашивания противопригарным покрытием на основе комбинированного наполнителя: а – 110Г13Л; б – 40Х13Л; в – 25Л; г – крупная отливка из стали 25Л; 1 – разработанное ПП на основе комбинированного наполнителя; 2 – водное цирконовое покрытие Ц-1

Видно, что все отливки имеют ровную и гладкую поверхность. Кроме того, образовавшийся на их поверхностях цементированный слой покрытия с зернами песка легко отделяется после извлечения из формы. Отливки (см. рисунок 2), полученные без применения противопригарного покрытия, имеют шероховатую поверхность, наблюдается пригар.

Как видно из рисунка 2, *з*, часть отливки, окрашенной разработанным ПП, имеют ровную и гладкую поверхность, как и другая часть отливки, полученная с применением цирконового покрытия Ц-1. Следовательно, при контакте углеродистой стали с цирконом и метакаолином также образуется преимущественно FeO , как и при контакте с одним цирконовым концентратом, что обеспечивает получение отливки без пригара.

Исходя из результатов исследований, водное противопригарное покрытие на основе комбинированного наполнителя, в качестве которого используется циркон и метакаолин, является универсальным и применимо для окрашивания разовых литейных песчано-глинистых форм для отливок с разными массогабаритными характеристиками (мелкие, средние и крупные), а также из углеродистой и легированной стали. Это объясняется отсутствием взаимодействия комбинированного наполнителя с оксидами железа, марганца и хрома.

Отливки, представленные на рисунке 3, полученные в формах из ХТС, окрашенные неводным противопригарным покрытием на основе отходов алюмохромового катализатора, имеют чистую поверхность: пригар, газовые и прочие дефекты отсутствуют.

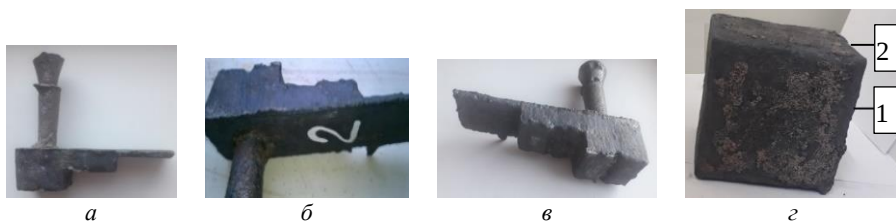


Рисунок 3 – Стальные отливки после окрашивания противопригарным покрытием на основе отходов алюмохромового катализатора: *а* – 110Г13Л; *б* – 40Х13Л; *в* – 25Л; *з* – крупная отливка; 1 – разработанное покрытие; 2 – покрытие ЛК-22Ц

Однако на отливке (рисунок 3, *з*) с толщиной стенки 100 мм наблюдается пригар, как на стороне, окрашенной разработанным покрытием, так и на стороне с покрытием ЛК-22Ц. Наличие пригара связано с недостаточно высокой высокотемпературной прочностью покрытий, из-за деструкции органических связующих при длительном воздействии высоких температур, что приводит к разрушению покрытия и смыванию потоком металла частичек огнеупорного наполнителя с поверхности литейной формы, из-за чего она становится незащищенной от агрессивного воздействия расплава. Поэтому, неводное противопригарное покрытие рекомендовано для изготовления мелких и средних отливок при литье в формы из ХТС.

Данные по шероховатости поверхностей отливок при литье в ПГФ и формы из ХТС, с применением различных ПП на основе комбинированного наполнителя (№ 1) и алюмохромовых отходов катализатора (№ 2), приведены в таблице 16 для отливок из стали 25Л. Для сравнения качества литой поверхности представлены отливки с применением цирконовых покрытий: водного Ц-1 (№ 3) и неводного ЛК-22Ц (№ 4).

Шероховатость поверхности отливок, полученных в ПГФ с использованием составов ПП № 1 и 3, практически одинакова (см. таблицу 10). Наименьшие значения шероховатости имеют поверхности отливок, полученные при использовании составов № 2

и 4. Лучший результат достигнут при использовании состава № 2, обеспечивающего снижение пригара на мелких и средних стальных отливках. Поэтому отливки имеют минимальные припуски на механическую обработку.

Таблица 10 – Средние значения шероховатости Rz поверхности стальных отливок после окрашивания ПФФ и ХТС

Марка	ПФФ		ХТС	
	Покрытие №1	Покрытие №3	Покрытие №2	Покрытие №4
25Л	95,1	96	65	70,2
110Г13Л	85,7	92,4	60	68,4
40Х13Л	94,2	93,5	67	71,1

Проведенные испытания показали, что отливки, полученные с использованием разработанных противопригарных покрытий, по качеству поверхности не уступают соответствующим отливкам на цирконовом концентрате.

Производственные испытания проводили в литейном цехе ООО «Механоремонтный комплекс» ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Водное противопригарное покрытие на основе комбинированного наполнителя (циркона и метаксаолина) было испытано при изготовлении песчано-глинистых форм для серии отливок «шлаковая чаша» объемом 16 м³. Для сравнения противопригарных свойств совместно с разработанным противопригарным покрытием испытывалось покрытие Ц-1 (ТИ 3-313-ЛС-18-2014), содержащее в качестве огнеупорного наполнителя цирконовый концентрат. Формы заливали сталью 25Л при температуре 1550-1560°С, выплавленной в печи ДСП-25 с основной футеровкой. После выбивки, обрубки и термообработки опытные отливки визуально по качеству и чистоте поверхности не уступали серийным и, соответствовали требованиям производства. Производственные испытания показали эффективность разработанного противопригарного покрытия, которое не уступает применяемому ПП Ц-1. Введение метаксаолина в состав цирконового противопригарного покрытия приводит к снижению содержания цирконового концентрата по сравнению с составом Ц-1 примерно в 2,5 раза.

При изготовлении холоднотвердеющих форм для серии отливок «корпус подшипника» и «зуб экскаватора» было испытано неводное противопригарное покрытие на основе алюмохромового наполнителя. Изготовление опытной партии стальных отливок с применением данного состава показало, что качество поверхности соответствует требованиям технических условий и регламенту. Внедрение в технологический процесс противопригарной краски на основе алюмохромового катализатора ИМ-2201 позволило полностью заменить им дорогостоящий, дефицитный и экологически небезопасный цирконовый концентрат и получить экономический эффект порядка 800 000 руб/ мес.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель, отражающая влияние состава на основные технологические свойства противопригарных покрытий, позволяющая установить рациональный состав ПП и обеспечить требуемое качество (по газовым раковинам и пригару) стальных отливок, имеющих разную массу и габариты.

2. Разработан новый состав водного противопригарного покрытия на основе комбинированного наполнителя метаксаолина (МК) с цирконом (Ц): метаксаолин 18,0–22,0%; цирконовый концентрат 28,0–31,0%; бентонит 2,5–4,5%; декстрин 1,3–1,7%; вода – остальное, характеризующийся высокими технологическими

(седиментационная устойчивость 100%) и эксплуатационными (газопроницаемость 60 ед., прочность слоя покрытия к истиранию 2,5 кг/мм) свойствами ПП.

3. Разработан ресурсосберегающий состав неводного (органического) противопригарного покрытия на основе ОАК ИМ-2201: отходы алюмохромового катализатора 45–55%, поливинилбутираль 0,9–1,2%, модифицированная фенолформальдегидная смола СФПР-050 1,0–2,0%, изопропиловый спирт – остальное, обеспечивающий шероховатости поверхности отливок на уровне Rz менее 100 ед. на средних и мелких отливках.

4. Выявлены изменения физико-механических и рабочих свойств разработанных покрытий по сравнению с промышленно применяемыми цирконовыми ПП (Ц-1 и ЛК-22Ц). Установлено, что покрытие на водной основе обладает высокой седиментационной устойчивостью (100 %), прочностью слоя покрытия к истиранию (2,5 кг/мм), лучшей газопроницаемостью (60 ед.) и газотворностью (13,8 см³/г) в отличие от Ц-1 (93%, 2,2 кг/мм, 50 ед., 14,3 см³/г). В ПП на неводной основе повышена прочность слоя покрытия к истиранию (2,8 кг/мм) и снижена газотворность (13,5 см³/г) в сравнении с ЛК-22Ц (2,5 кг/мм и 14,6 см³/г соответственно). Учитывая повышенные технологические свойства, разработанные противопригарные покрытия рекомендуются к применению на предприятиях литья в ПГФ и формы из ХТС, что обеспечит снижение затрат на изготовление литейной формы и, как следствие, себестоимости литья.

5. Установлено, что применение метакаолина в составе комплексного наполнителя приводит к качественному изменению фазового состава противопригарного покрытия, что определяет повышение в температурном диапазоне 950–1500 °С его высокотемпературной прочности за счет образующегося муллита, который формирует повышенную когезионную и адгезионную прочность в контакте с кварцевым наполнителем формы (4,1 и 4,9 кг/мм) в сравнении с цирконовым покрытием (3,0 кг/мм). Это позволяет использовать недефицитные материалы в составе покрытий без потери качества поверхности литого изделия.

6. Результаты исследования газотворности покрытия от разных источников газообразования показали, что газотворность за счет дегидратации химически-связанной воды и образующейся в результате сгорания органических связующих для водного покрытия составляет 3,5 см³/г, неводного 3,0 см³/г, что на 22 – 28 % меньше промышленных покрытий (Ц-1 – 4,5 см³/г, ЛК-22Ц – 4,2 см³/г). Полученное решение позволит снизить вероятность образования газовых дефектов на поверхности отливки.

7. Опытными-промышленными испытаниями в литейном цехе ООО «Механоремонтный комплекс» подтверждена эффективная замена водного цирконового противопригарного покрытия Ц-1 на разработанное водное ПП на основе комбинированного наполнителя, включающего 30% циркона и 20 % метакаолина и неводного цирконового покрытия ЛК-22Ц на разработанное неводное ПП на основе наполнителя отходов алюмохромового катализатора ИМ-2201 (50 %). Эффективность разработанных противопригарных покрытий обеспечена отсутствием газовых раковин на поверхности отливки, трудноудаляемого пригара, а также использованием в их составе доступных высокоогнеупорных материалов, что обеспечивает высокую конкурентоспособность продукции, в том числе из-за снижения стоимости покрытия.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

В рекомендованных ВАК РФ изданиях:

1. Разработка состава магнетитовой противопопригарной краски для высокомарганцевистой стали / К.Н. Вдовин, Н.А. Феоктистов, К.Г. Пивоварова, Т.Б. Понамарева // *Литейщик России*. – 2019. – № 6 – С. 11-15.
2. Исследование газотворности противопопригарной цирконовой краски для стальных отливок / К.Н. Вдовин, К.Г. Пивоварова, Т.Б. Понамарева, Н.А. Феоктистов // *Литейное производство*. – 2018. – № 11. – С. 16-20.
3. Совершенствование состава противопопригарной цирконовой краски для стального литья / К.Н. Вдовин, К.Г. Пивоварова, Т.Б. Понамарева, Н.А. Феоктистов // *Литейщик России*. – 2018. – № 6. – С. 14-17.
4. Исследование физико-химических превращений в цирконовом покрытии для стальных отливок / К.Н. Вдовин, Н.А. Феоктистов, К.Г. Пивоварова, Т.Б. Понамарева // *Литейное производство*. – 2019. – № 12. – С. 13-17.
5. Исследование химического состава противопопригарных красок методом рентгенофлуоресцентного анализа / К.Н. Вдовин, Н.А. Феоктистов, К.Г. Пивоварова, Т.Б. Понамарева // *Литейное производство*. – 2019. – № 4. – С. 14-18.
6. Влияние гранулометрического состава огнеупорного наполнителя на качество противопопригарной краски / К.Н. Вдовин, Н.А. Феоктистов, К.Г. Пивоварова, Т.Б. Понамарева // *Литейное производство*. – 2020. – № 7. – С. 17-20.
7. Оценка влияния метакаолина на высокотемпературную прочность цирконового противопопригарного покрытия для окрашивания литейных форм / Н.А. Феоктистов, В.П. Чернов, Т.Б. Понамарева, К.Г. Пивоварова // *Заготовительные производства в машиностроении (кузнечно-прессовое, литейное и другие производства)*. – 2022. – Т. 20. – №2. – С. 51-56.
8. Термические методы исследования качества бентонитов при их использовании в противопопригарных покрытиях / К.Н. Вдовин, Н.А. Феоктистов, К.Г. Пивоварова, Т.Б. Понамарева // *Литейное производство*. – 2020. – № 11. – С. 29-34.
9. Оптимизация состава самовысыхающей противопопригарной краски на основе отработанного алюмохромового катализатора / Н.А. Феоктистов, К.Г. Пивоварова, Т.Б. Понамарева, В.П. Чернов, Б.А. Кулаков, В.К. Дубровин // *Теория и технология металлургического производства*. – 2023. – № 3 (46). – С. 25-29.
10. Применение техногенных отходов в качестве наполнителя противопопригарных красок / К.Н. Вдовин, Н.А. Феоктистов, К.Г. Пивоварова, Т.Б. Понамарева // *Литейное производство*. – 2019. – № 3. – С. 22-25.

В изданиях, входящих в наукометрические базы Web of Science и Scopus:

1. Анализ метакаолина на содержание химически связанной воды / К.Н. Вдовин, Т.Б. Понамарева, К.Г. Пивоварова, Н.А. Феоктистов // *Новые огнеупоры*. – 2018. – № 12. – С. 44-48.

В других изданиях:

1. Понамарева, Т.Б. Исследование и разработка противопопригарных красок для стального литья / Т.Б. Понамарева, Н.А. Феоктистов // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: Тезисы 80-й международной научно-технической конференции*. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2022. – Т. 1. – С. 113.
2. Понамарева, Т.Б. Исследование физико-химических свойств противопопригарной краски для стального литья / Т.Б. Понамарева // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 76-й международной научно-*

технической конференции. – Магнитогorsk: Изд-во Магнитогorsk. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. – Т. 2. – С. 27.

3. Применение отходов алюмохромового материала техногенного происхождения для повышения качества отливок и ресурсосбережения в литейном производстве / Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Пивоварова К.Г., Понамарева Т.Б. // Технологии металлургии, машиностроения и материалов обработки. – 2019. – № 18. – С. 154-160.

4. Исследование качества бентонита, применяемого в качестве связующего противопригарных красок / К.Н. Вдовин, Н.А. Феоктистов, К.Г. Пивоварова, Т.Б. Понамарева // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 78-й международной научно-технической конференции. – Магнитогorsk: Изд-во Магнитогorsk. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2020. – Т. 1. – С. 146.

Патенты:

1. Пат. 2671520 Российская Федерация, МПК В22С 3/00. Противопригарная краска для литейных форм и стержней [Текст] / Вдовин К.Н., Понамарева Т.Б., Феоктистов Н.А., Пивоварова К.Г.; патентообладатель Магнитогorskский государственный технический университет. – № 2017145629: заявл. 25.12.2017; опубл. 01.11.2018.