

На правах рукописи



КОСОВИЧ Александр Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА АВТОМОБИЛЬНЫХ КОЛЕС
ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ
ПРИ ЛИТЬЕ ПОД НИЗКИМ ДАВЛЕНИЕМ
ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ НОВЫХ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ**

05.16.04 – Литейное производство

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет».

Научный руководитель: кандидат технических наук, **Гильманшина Татьяна Ренатовна**

Официальные оппоненты:

Илларионов Илья Егорович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», кафедра «Материаловедение и металлургические процессы», профессор

Афанасьев Владимир Константинович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский индустриальный университет», кафедра материаловедения, литейного и сварочного производства, профессор-консультант

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва.

Защита состоится 15 мая 2018 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.10 при ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660025, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 95, ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и на сайте <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2018 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета



Бабкин Владимир Григорьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ¹

Актуальность работы. Для колес, отлитых под низким давлением, характерно наличие поверхностных и подповерхностных дефектов (неслитин, пористости и др.). Их возникновение обусловлено присутствием в кристаллизующемся расплаве двухфазной области, играющей ключевую роль в формировании структуры колеса. Ширина этой области прямо пропорционально зависит от величины температурного интервала кристаллизации сплава и обратно пропорционально от интенсивности отвода теплоты к пресс-форме.

Одним из решений по регулированию теплоотвода, не требующих больших экономических затрат, является применение разделительных покрытий, создающих на поверхности пресс-форм защитный слой с заданными теплофизическими свойствами. Однако данная область исследований мало освещена в научных изданиях.

В то же время покрытия, выпускаемые в России и странах СНГ, не в полной мере удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям, часто уступают зарубежным аналогам по уровню свойств. Поэтому отечественные производители фасонной продукции из легких сплавов вынуждены закупать их за рубежом (Великобритания, Германия, Италия, США и др.).

В этой связи данная диссертационная работа направлена на решение актуальной научно-технической проблемы недостаточной изученности возможностей управления свойствами тонких разделительных слоев и их влияния на формирование структуры фасонных отливок при литье под низким давлением.

Цель диссертационной работы состоит в разработке комплекса технологических решений, направленных на повышение качества автомобильных колес при литье под низким давлением за счет предотвращения образования подповерхностных дефектов.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

- выполнить анализ существующей литейной технологии, включая процесс подготовки пресс-форм и свойства используемых зарубежных покрытий;
- предложить составы импортозамещающих разделительных покрытий и экспериментально обосновать возможность их применения при литье автомобильных колес под низким давлением из силумина АК12;
- исследовать с использованием программного пакета ProCAST[®] процесс формирования качества поверхности колес под низким давлением при различных теплофизических свойствах разделительного слоя в системе «расплав – разделительное покрытие – пресс-форма»;

¹ Диссертация выполнена при научной консультации канд. техн. наук Т.А. Богдановой

– внедрить разработанные покрытия на ООО «КиК» и в учебный процесс ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет».

Научная новизна полученных результатов:

1. Установлено влияние содержания связующего (жидкого стекла) на технологические свойства водорастворимых разделительных покрытий пресс-форм для литья под низким давлением, что позволило определить его оптимальное содержание, равное 44–65 % при соотношениях наполнителя и связующего близких к 1:1,1–1,2 и среднем размере частиц минеральных и оксидных наполнителей от 0,2 до 25 мкм.

2. На основании проведенных исследований и анализа кинетики газо-выделения установлено, что уменьшение газотворности разработанных покрытий при их нагреве до 690–720 °С позволяет снизить на 20 % количество газовых дефектов колес при литье под низким давлением.

3. Путем компьютерного моделирования кристаллизации отливок при литье под низким давлением установлено, что разработанное теплопроводящее покрытие в процессе теплообмена в системе «расплав – разделительное покрытие – пресс-форма» ускоряет кристаллизацию колеса на 2,1 с, а теплоизоляционное замедляет на 1,3 с, что позволяет выравнивать кристаллизацию отливки и повышать ее качество.

4. Изучено совместное влияние профиля поверхности покрытия и его теплопроводности и установлено, что впадины профиля способствуют формированию воздушных зазоров, в которых прослойки воздуха выступают в роли тепловых микроизоляторов и ослабляют теплопередачу, нивелируя влияние коэффициента теплопроводности разделительного слоя, в то же время острые выступы на поверхности покрытия стягивают окисные пленки к краям потока металла, преодолевающего окрашенный участок формы, тем самым очищая его и повышая выход годного литья до 10 % в зависимости от модели колеса.

Практическая значимость работы:

1. Предложено технологическое решение по снижению брака легкосплавных колес по термическим, газовым и усадочным дефектам, заключающееся в применении разделительных покрытий с заданными свойствами. Суммарное снижение по данным группам дефектов в среднем составило 30 %.

2. Предложен состав теплопроводящего покрытия (КПТ110), обладающий следующими свойствами в сравнении с зарубежными аналогами: седиментационная устойчивость увеличена на 20 %, приведенная прочность – в 4,5 раза, на 50 % снижена газотворность, средний прирост формозаполняемости сплава АК12 по окрашенной спиральной пробе составляет 9 см. На данный состав получен патент № 2604163 «Разделительное покрытие для литейных пресс-форм».

3. Разработаны рекомендации по технологии приготовления и нанесения теплоизолирующего покрытия (Ж163), содержащего наполнитель и связующее в соотношении 1:1,2 и обладающего плотностью 1110 кг/м³, седи-

ментационной устойчивостью (через 3 ч) 40–45 %, приведенной прочностью 130 кг/мм, на 25 % меньшей газотворностью в сравнении с зарубежными аналогами.

4. Предложенные покрытия внедрены на ООО «КиК», что позволило увеличить выход годных отливок на 1,5–10,0 % в зависимости от модели колеса. Экономический эффект от внедрения разработанных покрытий на предприятии составляет 850 000 руб./год.

Методология и методы исследования. При выполнении диссертационной работы использованы гостированные и современные методы и методики исследования общих, рабочих и технологических свойств покрытий на оборудовании в лабораториях ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и ООО «КиК».

Положения, выносимые на защиту:

1. Способ повышения эффективности технологии производства легкосплавных автомобильных колес, реализуемый через нанесение на пресс-формы покрытий с различными теплофизическими свойствами, позволяющими регулировать условия кристаллизации подповерхностных слоев отливок.

2. Новые составы разделительных покрытий пресс-форм, выполненные на основе полидисперсных наполнителей с повышенным содержанием связующего, технология нанесения которых не отличается от заводской.

3. Экспериментальные закономерности, подтверждающие повышение качества отливок из алюминиевых сплавов при литье под низким давлением за счет управления теплообменом между расплавом и пресс-формой.

4. Результаты компьютерного моделирования, позволяющие оценивать снижение риска возникновения дефектов легкосплавных колес за счет регулирования теплообмена в системе «расплав – разделительное покрытие – пресс-форма».

Личный вклад автора заключается в планировании экспериментов, выборе методик, их выполнении в лабораторных условиях ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и проведении промышленных испытаний в производственных условиях ООО «КиК» (г. Красноярск), обобщении и научном обосновании результатов, формулировании выводов. Проведенные работы осуществлены совместно с соавторами, при этом в диссертацию включены результаты исследований, составляющих ту часть, которая получена непосредственно автором или при его ведущем участии.

Степень достоверности полученных результатов обеспечивалась применением современных методов исследования и использованием для их обработки стандартных компьютерных программ.

Реализация работы в промышленных условиях. По результатам промышленных испытаний получен акт внедрения разработанного теплопроводящего покрытия на ООО «КиК». Суммарный экономический эффект от импортозамещения покрытий составит 850 000 руб./год.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на X Всероссийской научно-технической конференции «Молодежь и наука» (Красноярск, 2014 г.); VI, VII и VIII Международном конгрессе и выставке «Цветные металлы и минералы» (Красноярск, 2014–2016 гг.); LV Международной научно-практической конференции «Технические науки – от теории к практике» (Новосибирск, 2016 г.); VIII Международной конференции по научному развитию в Евразии (Вена, 2016 г.); II Международной научно-практической конференции «Научно-технический прогресс: актуальные и перспективные направления будущего» (Кемерово, 2016 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Состояние и перспективы развития литейных технологий и оборудования в цифровую эпоху» (Москва, 2016 г.); II Международной научно-практической конференции «Современные технологии в машиностроении и литейном производстве» (Чебоксары, 2016 г.).

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 15 печатных трудах и тезисах докладов, из них 4 из перечня журналов, рекомендуемых ВАК, 1 монография, 1 патент РФ на изобретение.

Соответствие диссертации паспорту специальности.

Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.16.04 – Литейное производство (технические науки):

- исследование физических, физико-химических, теплофизических, технологических и служебных свойств материалов как объектов и средств реализации литейных технологий;
- исследование литейных технологий для их обоснования и оптимизации;
- разработка методов моделирования процессов заливки, затвердевания и охлаждения литых заготовок и изделий;
- исследование проблем качества литья.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, содержащего 137 источников, и 6 приложений. Основной материал изложен на 107 страницах, включая 20 таблиц и 57 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* показана и обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулирована цель, задачи, научная и практическая значимость диссертационной работы.

В *первой главе* рассмотрен способ литья автомобильных колес под низким давлением и возникающие при этом дефекты отливок; проанализирована существующая литейная технология защиты пресс-форм с помощью разделительных покрытий и их классификация; выделена зависимость брака продукции от свойств покрытий, определяемых физико-химическими харак-

теристиками и соотношением их компонентов, а также методом нанесения (рис. 1).

Литье под низким давлением тесно связано с развитием автомобильной промышленности ведущих стран мира. Наибольшим спросом среди присутствующей ему номенклатуры отливок пользуются автомобильные колеса. В настоящее время в мире существует более 200 производителей колес, в суммарном объеме выпуска которых 82 % приходится на литые. При этом одним из ведущих направлений развития данного метода литья является совершенствование процесса подготовки пресс-форм и повышение их эксплуатационной стойкости путем применения материалов с высокими механическими свойствами, упрочнения их рабочей поверхности нанесением многослойных тугоплавких покрытий, а также использования специальных разделительных теплоизолирующих и теплопроводящих. Последнее требует наименьших экономических затрат и изменений в технологии действующего литейного производства.

Благодаря исследованиям отечественных и зарубежных ученых Батышева А.И., Батышева К.А., Белова В.Д., Белова Н.А., Болдина А.Н., Вейника А.И., Давыдова Н.И., Деева В.Б., Жуковского С.С., Илларионова И.Е., Кидалова Н.А., Крушенко Г.Г., Кукуя Д.М., Кулакова Б.А., Леушина И.О., Маминой Л.И., Михальцова А.М., Сварика А.А. и многих других созданы научные основы разработки и приготовления покрытий с заданными свойствами, способными повышать качество поверхности отливок и сокращать объем брака. Однако несмотря на большое количество работ, посвященных покрытиям металлических форм, до настоящего времени отсутствуют четкие теоретические представления по ряду вопросов формирования разделительных слоев и их взаимодействия с кристаллизующейся отливкой в процессе литья под низким давлением.

На основании проведенного анализа источников поставлены цель и задачи диссертационного исследования.

Во *второй главе* приведены сведения об используемых исходных компонентах разрабатываемых составов, методах исследования свойств покрытий, их влиянии на формозаполняемость расплава и качество колес.

Фракцию наполнителей измеряли методом лазерной гранулометрии. Общие, рабочие и технологические свойства покрытий определяли согласно ГОСТ 10772–78. Данные о газотворности покрытий получены с помощью дифференциально-термического анализа и измерения относительной оптической плотности газов, выделяющихся при нагреве. Значения теплофизических характеристик покрытий установлены методом лазерной вспышки (установка NETZSCH LFA 457 MicroFlash).

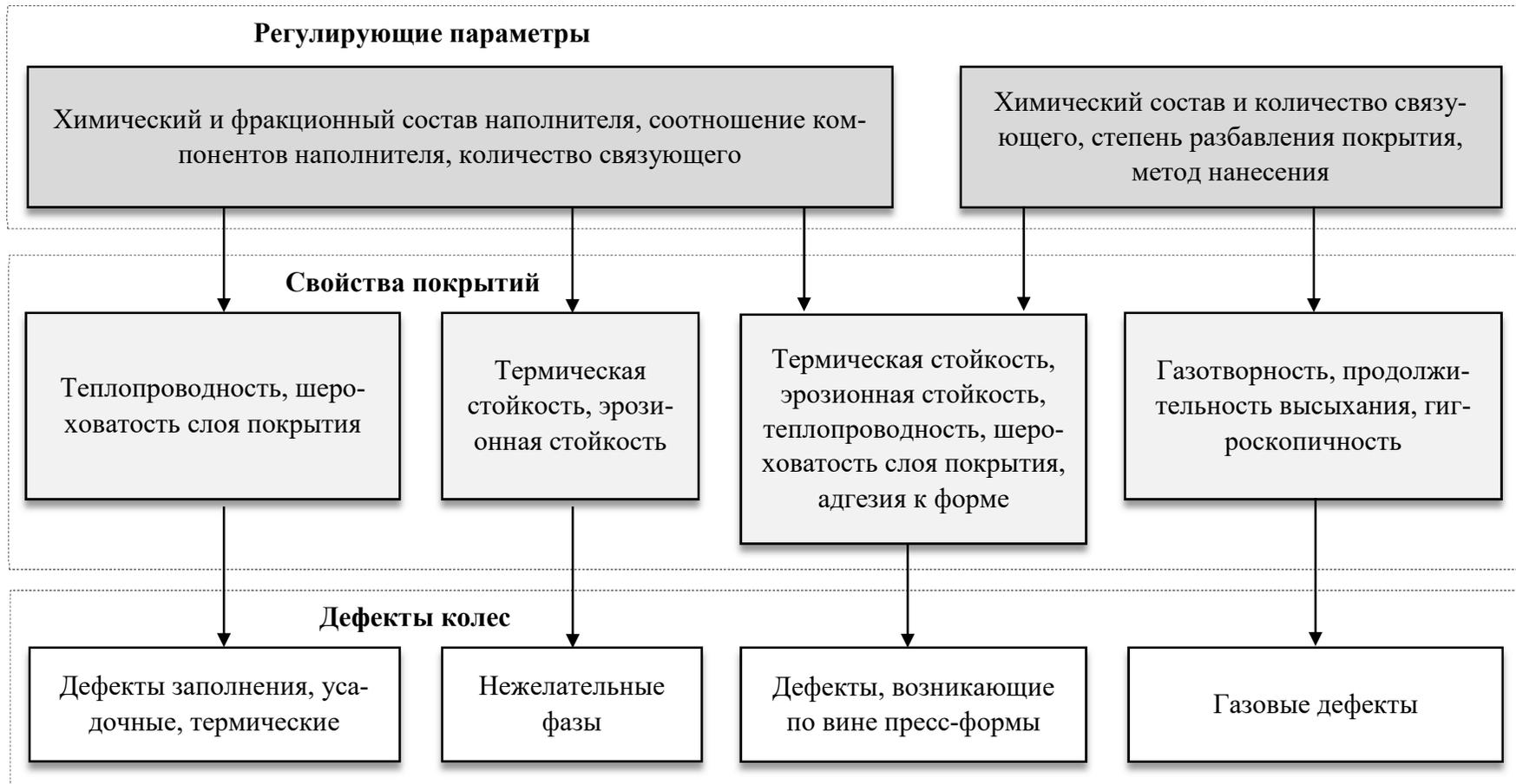


Рисунок 1 – Влияние параметров регулирования качества разделительных покрытий на предотвращение дефектов колес

Влияние покрытий на формозаполняемость оценивали по спиральной металлической пробе ГОСТ 16438–70. Годность колес, изготовленных с применением разработанных покрытий, определяли по ГОСТ Р 50511–93.

Для оценки влияния разделительных покрытий на время кристаллизации, тепловые поля и пористость отливок было проведено компьютерное моделирование литья колес с учетом нанесенного на пресс-форму разделительного слоя в программном комплексе ProCAST®.

Третья глава посвящена разработке составов теплопроводящих и теплоизоляционных разделительных покрытий. Для сравнения изучены свойства покрытий Н1 (производитель Henkel, Германия) и серийно применяемого D1 (производитель Fosco, Великобритания).

В соответствии с проведенным анализом научных публикаций в области теплоизоляционных и огнеупорных материалов был разработан ряд опытных составов с повышенным содержанием связующего (КП), наполнитель которых включает диоксид титана и сульфат бария в соотношении 3:1, выбранном из соображений обеспечения легкости приготовления покрытий и стойкости к воздействию высоких температур. Для данного наполнителя (размер частиц от 0,2 до 2,5 мкм) минимальное содержание жидкого стекла, обеспечивающее получение однородных паст и суспензий при разбавлении водой, составляет 43–44 %. Увеличение количества связующего по отношению к наполнителю ведет к повышению плотности и вязкости покрытий, что положительно сказывается на их седиментационной устойчивости и приведенной прочности. Однако данная тенденция сохраняется при увеличении концентрации жидкого стекла, равной 50 %. Дальнейшее увеличение доли жидкого стекла влечет за собой снижение уровня свойств покрытий за счет неравномерного распределения частиц по объему покрытия, что приводит к агломерации частиц.

Оптимальное сочетание свойств дает соотношение наполнителя и связующего, равное 1:1 (состав КП80). Сравнение проб формозаполняемости (рис. 2) может говорить о более высокой теплопроводности и низкой шероховатости данного покрытия на подложке, что подтверждено отдельным измерением характеристик полученных разделительных слоев (рис. 3).

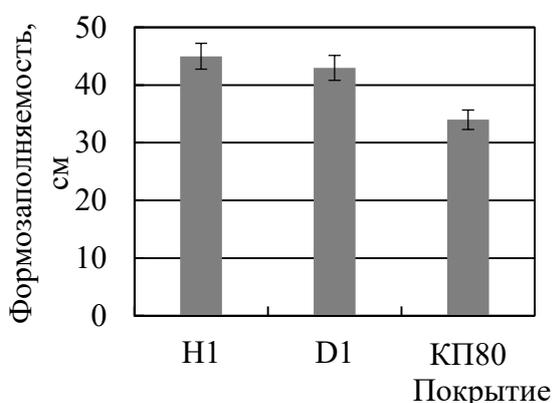


Рисунок 2 – Формозаполняемость в зависимости от нанесенного покрытия формы

Исследования показали, что в данном случае формозаполняемость расплава по окрашенной поверхности прямо пропорциональна шероховатости слоя применяемого разделительного покрытия и обратно пропорциональна его коэффициенту теплопроводности. Литье опытной партии колес (1 077 шт.) диаметром 16 дюймов с использованием состава КП80 проходило с 27 по 30 ноября 2014 года.

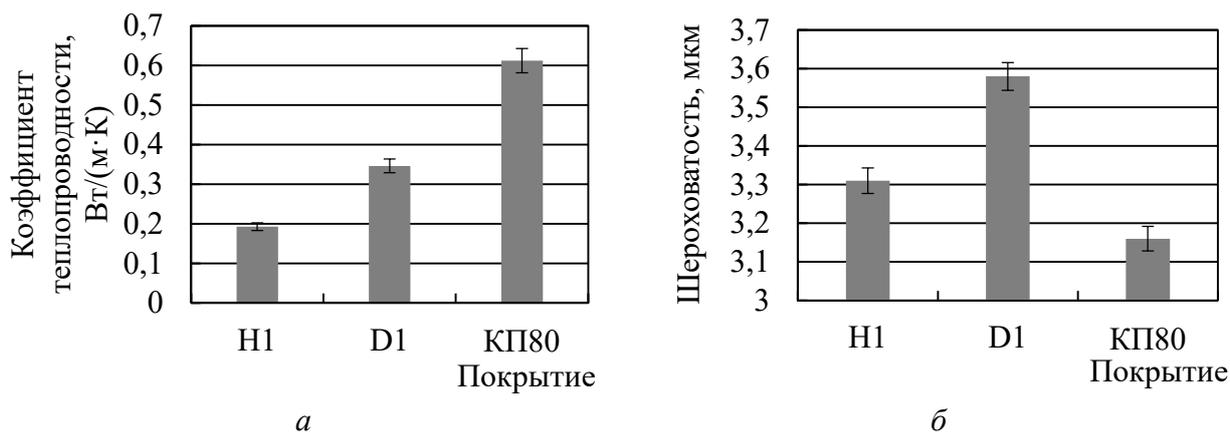


Рисунок 3 – Значения коэффициента теплопроводности (а) и шероховатости (б) покрытий

По сравнению с серийно используемым покрытием пресс-форм выход годного увеличился с 95,44 до 96,56 %. Испытания также показали, что в сравнении с аналогами предложенное покрытие не имеет значительного преимущества по приведенной прочности, а за счет высокой теплопроводности потенциально может захлаживать тонкие сечения колес меньшего диаметра, ухудшать заполняемость, вызывать появление неслитин в области спица-обод.

Благодаря изменению соотношения исходных компонентов покрытия КП80 и введению дополнительных минеральных составляющих (пылевидного кварца и талька) был разработан второй ряд составов (КПТ). Практически применимые композиции серии КПТ получены при содержании жидкого стекла 45–65 %. В отличие от составов КП, рост уровня свойств по мере увеличения количества связующего отмечается во всем рассматриваемом интервале. Это связано с изменением долей компонентов различной плотности и крупности в составе наполнителя, а значит, и объеме суспензии.

Характерной особенностью является довольно резкое падение седиментационной устойчивости после часового отстаивания. Для композиций с содержанием связующего 45–55 % процессы расслоения обратимы: кратковременное интенсивное перемешивание приводит к восстановлению свойств и однородности суспензии. При большей концентрации жидкого стекла наблюдается формирование плотного клейкого осадка.

С учетом этого для дальнейшей работы выбран состав КПТ110. Его сравнение с КП80 и зарубежными аналогами представлено на рис. 4.

Состав КПТ110 сохраняет выделенную ранее взаимосвязь шероховатости слоя на подложке и формозаполняемости: в сравнении с серийным покрытием увеличение профиля неровностей на 0,19 мкм дает прирост длины спирали до 11 см. В то же время, измерение теплопроводности покрытия при температурах, соответствующих моментам его нанесения, сушки, прогрева пресс-формы и заливки расплава, показывает небольшую разницу между КПТ110 и КП80 (рис. 5).

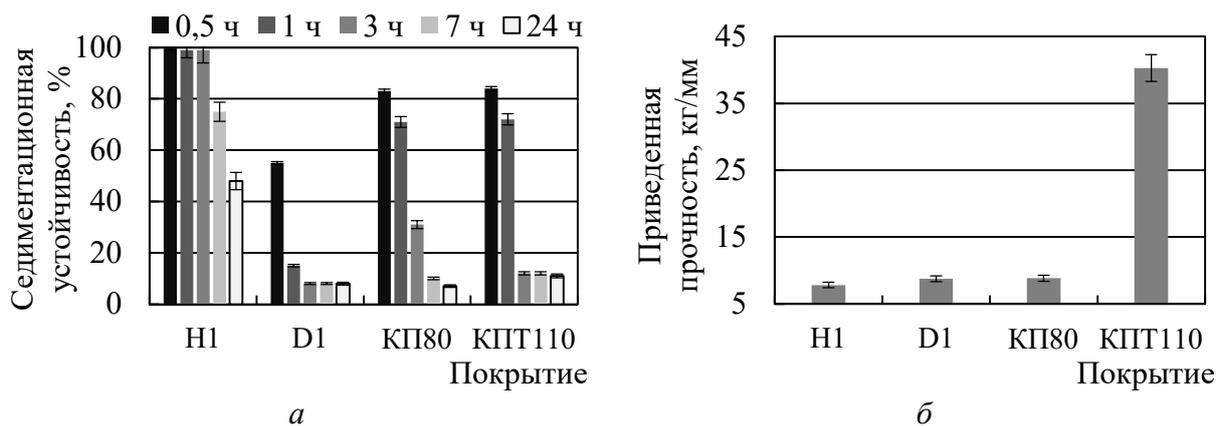


Рисунок 3 – Седиментационная устойчивость (а) и приведенная прочность (б) покрытий

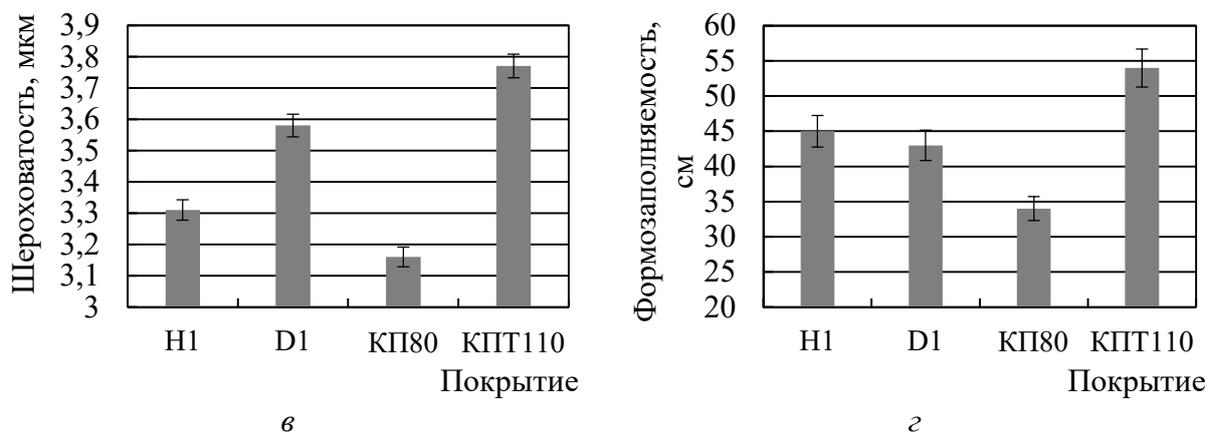


Рисунок 4 – Значения седиментационной устойчивости (а), приведенной прочности (б), шероховатости (в) покрытий и их влияния на формозаполняемость АК12 (г)

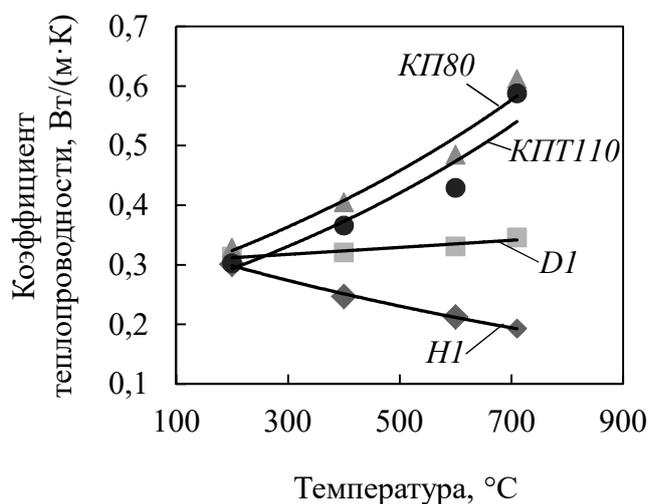


Рисунок 5 – Зависимость коэффициентов теплопроводности покрытий от температуры

Известно, что при прочих равных условиях формозаполняемость алюминиевых сплавов по окрашенной поверхности главным образом зависит от ее шероховатости, нежели от теплофизических свойств покрытия. С другой стороны, полученные данные ставят вопрос о наличии дополнительных, неявных факторов в системе «расплав – разделительное покрытие – пресс-форма». Было сделано предположение о значимости внутренней структуры слоя покрытия: влиянии несплошностей,

равномерности распределения частиц наполнителя.

С целью обоснования этого получены фотографии микроструктуры исследуемых покрытий после нанесения их на металлические пластины, имитирующие рабочую поверхность пресс-форм (рис. 6).

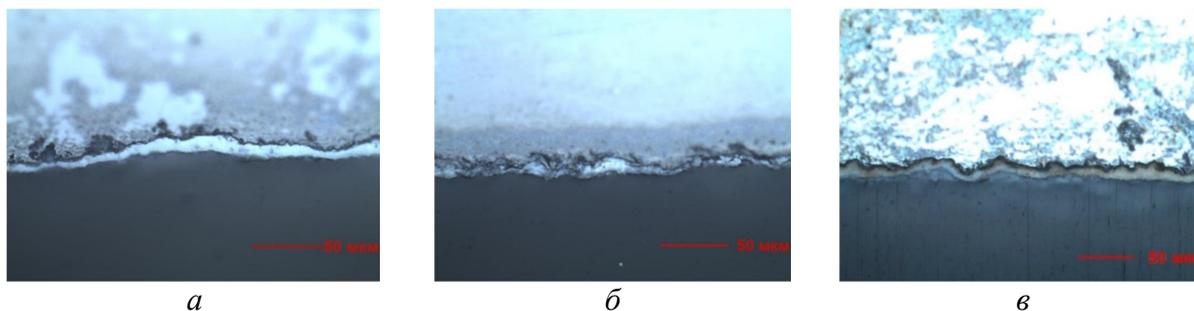


Рисунок 6 – Микроструктура слоя нанесенного покрытия после высыхания:
а – альтернативное Н1; *б* – серийное D1; *в* – КРТ110

Состав КРТ110 при нанесении дает более плотную, однородную структуру слоя на подложке, что соответствует его высокой стойкости (приведенной прочности) и выгодно отличает от серийного и альтернативного покрытий. Грубые частицы различной твердости, входящие в разработанный наполнитель, обеспечивают формирование шероховатой поверхности (3,77 мкм), имеющей следующие особенности:

- впадины профиля способствуют формированию воздушных зазоров, в которых прослойки воздуха выступают в роли тепловых микроизоляторов и ослабляют теплопередачу между кристаллизующимся расплавом и формой;
- острые выступы стягивают окисные пленки к краям потока металла, преодолевающего окрашенный участок формы, тем самым очищая его.

Именно структура разделительного слоя определяет степень влияния его шероховатости и теплопроводности на формозаполняемость металла.

Создание благоприятных условий формирования отливки в процессе литья под низким давлением зависит и от склонности покрытия к выделению газов. Так как заполнение рабочей полости расплавом осуществляется за короткое время при температуре порядка 710 °С, на газовый режим формы оказывает влияние лишь малая часть суммарного газовыделения покрытия. Измерением относительной оптической плотности выделившихся из образца газов установлено, что предлагаемое покрытие обладает в 2 раза меньшей газотворностью, чем серийное. Это позволяет предполагать снижение количества газовых дефектов отливок при литье под низким давлением.

Таким образом, результаты исследования показали, что разработанный состав КРТ110, на который получен патент № 2604163 «Разделительное покрытие для литейных пресс-форм», превосходит серийно применяемый зарубежный аналог и может быть рекомендован для проведения опытно-промышленных испытаний.

С учетом полученных результатов и выделенных зависимостей также был разработан ряд составов теплоизолирующих покрытий (Ж16), наполнитель которых состоит из смеси порошков талька, корунда, мусковита и мела. Размер твердых частиц находится в пределах от 2,6 до 19 мкм, соотношение наполнителя и связующего равно 1:1,2. Композиции содержат различное ко-

личество Al_2O_3 , являющегося наиболее плотным и теплопроводным из компонентов наполнителя (табл. 1).

Таблица 1 – Свойства зарубежных и разработанных теплоизолирующих покрытий

Свойство	Покрытия					
	Альтернативное	Серийное	Разработанные составы			
			H2	D2	Ж160	Ж161
Содержание Al_2O_3 , %	–	–	10	8	6	4
Содержание связующего, %	–	–	60			
Соотношение с водой	2:1	3:1	3:1			
Плотность, $кг/м^3$	1 110	1 090	1 115	1 115	1 110	1 110
Вязкость, с	11,7	10,8	11,4	11,3	11,2	11
Седиментационная устойчивость, %, через, ч:						
1	51	32	30	34	38	47
7	36	20	22	26	29	38
24	29	20	22	24	27	35
Приведенная прочность, $кг/мм$	26,04	29,40	129,52	129,37	129,22	129,08
Шероховатость поверхности, $мкм$	8,15	7,58	9,73	9,71	9,68	9,65

Отличительной особенностью составов данной серии является высокий показатель приведенной прочности, превосходящий аналоги до 4,5 раз.

Последовательное уменьшение количества корунда в предложенных составах приводит к незначительному снижению плотности и вязкости суспензий, а также прочности на истирание нанесенного слоя, сглаживанию его профиля неровностей. Повышенная седиментационная устойчивость позволяет дольше хранить готовые покрытия.

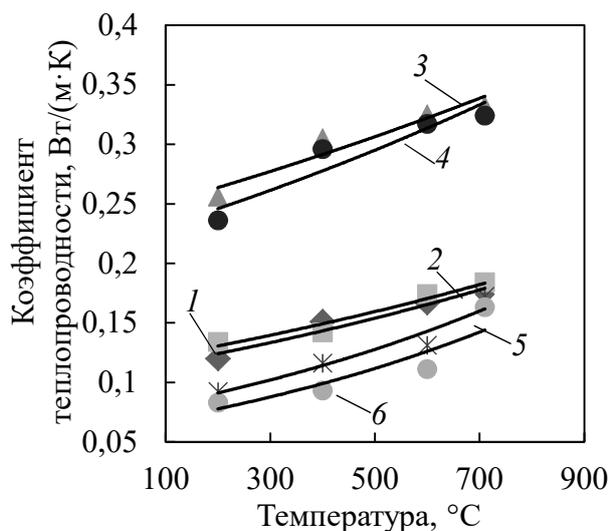


Рисунок 7 – Зависимость коэффициентов теплопроводности покрытий от температуры:

1 – альтернативное H2; 2 – серийное D2;
3 – Ж160; 4 – Ж161; 5 – Ж162; 6 – Ж163

Содержание оксида алюминия главным образом сказывается на коэффициенте теплопроводности покрытий (рисунок 7). Изменение характера кривой при понижении концентрации с 8 до 6 % связано с ослаблением роли корунда в формировании теплофизических характеристик покрытия.

Дальнейшие исследования проводились с составом, обладающим лучшей теплоизолирующей способностью среди предложенных. Вкупе с достаточной шероховатостью поверхности нанесенного слоя он способствует удлинению

спиральной пробы формозаполняемости расплава (прирост длины спирали до 9 см относительно серийного покрытия).

После нанесения состав Ж163 имеет однородную структуру (рисунок 8). Она формируется за счет крупных частиц наполнителя (15–19 мкм), промежутки между которыми заполнены более мелкой фракцией и жидкостекольным связующим.

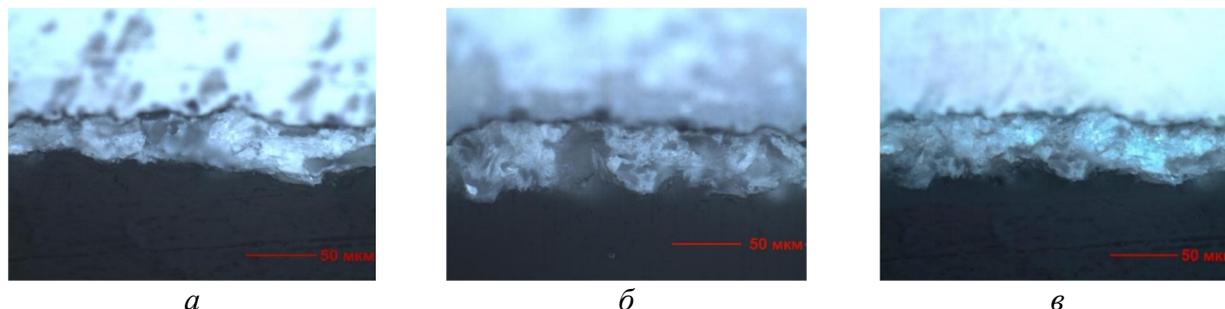


Рисунок 8 – Микроструктура слоя нанесенного покрытия после высыхания: *а* – альтернативное Н1; *б* – серийное D1; *в* – КПТ110

Каркасная структура, характерная для теплоизоляционных материалов, способствует равномерному распределению мелкой пористости по слою без образования заметных несплошностей. Это положительно сказывается на стойкости покрытия к механическому воздействию и передаче теплоты.

Относительная оптическая плотность газов в интервале 690–720 °С для серийного покрытия составляет 0,04, а разработанного – 0,03. При равных условиях меньшая газотворность дает основания предполагать снижение количества газовых дефектов в области обода и бортовой закраины колеса.

Таким образом, предложен ряд теплоизолирующих составов, в которых при равном соотношении наполнителя и связующего (1:1,2) содержится различное количество корунда. Наименьшим коэффициентом теплопроводности при сохранении высокого уровня других свойств обладает композиция Ж163. Данное покрытие положительно влияет на заполняемость тонких сечений отливки, способно улучшить газовый режим пресс-форм.

Для оценки влияния серийно используемых (D1, D2) и разработанных (КПТ110, Ж163) покрытий на процесс литья колес под низким давлением было проведено компьютерное моделирование с учетом нанесенного на пресс-форму разделительного слоя. В основу расчета положены химический состав сплава АК12 и физические свойства материала пресс-форм, используемых ООО «КиК»; свойства силумина, сгенерированные по базам данных ProCAST®; геометрическая модель отливки с оснасткой и слоем разделительного покрытия; режимы литья колес методом ЛНД (табл. 2); полученные значения коэффициентов температуропроводности α и теплопроводности λ покрытий (табл. 3).

По результатам расчета следствием регулирования интенсивности теплообмена в системе «расплав – разделительное покрытие – пресс-форма» яв-

ляется изменение времени кристаллизации колеса: чем больше значения a и λ нанесенного слоя, тем быстрее формируется тело отливки.

Таблица 2 – Базовые технологические параметры литья колес

Параметр	Фаза литья		
	Заполнение литниковой системы	Заполнение пресс-формы	Допрессовка
Давление, кПа	20 ± 1	40 ± 5	75 ± 5
Время, с	4 ± 1	35 ± 5	45 ± 5
Температура расплава, °С	710 ± 10		
Время кристаллизации, с	150 ± 5		
Давление компенсации, кПа	$0,24 \pm 0,04$		

Таблица 3 – Теплофизические характеристики покрытий

Коэффициенты	Покрытия			
	Теплопроводящие		Теплоизолирующие	
	D1	КПТ110	D2	Ж163
Окрашивание пресс-формы, 200 °С				
$a \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}$	0,343	0,347	0,145	0,103
$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	0,314	0,303	0,134	0,083
Нагрев пресс-формы, 400 °С				
$a \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}$	0,350	0,402	0,154	0,115
$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	0,321	0,366	0,142	0,093
Нагрев пресс-формы, 600 °С				
$a \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}$	0,361	0,475	0,185	0,137
$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	0,331	0,429	0,174	0,111
Заполнение пресс-формы расплавом, 710 °С				
$a \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}$	0,377	0,621	0,198	0,210
$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	0,341	0,588	0,184	0,163

Теплопроводящий состав КПТ110 обладает большей теплопроводностью по сравнению с D1 за счет формирования более плотной структуры нанесенного слоя, а также физико-химических свойств его компонентов. Высокая интенсивность теплообмена между затвердевающей отливкой и пресс-формой обеспечивается тем, что основой наполнителя разработанного покрытия является тонкодисперсный порошок диоксида титана (коэффициент теплопроводности – $9,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$). При полной окраске рабочей поверхности формы время кристаллизации сокращается на 2,1 с.

Напротив, изолирующий состав Ж163 уменьшает отвод теплоты к форме, так как его наполнитель преимущественно состоит из низкотеплопроводных материалов: тальк – $0,002 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, мусковит – $0,550 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, мел – $0,930 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Снижение теплопроводности покрытия на $0,021 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ относительно показателя серийного состава дает увеличение времени кристаллизации на 1,3 с.

Предлагаемые покрытия уменьшают пористость, но не изменяют характерные зоны ее распределения по сечению колеса. При моделировании

процесса литья с покрытием КПТ110 пористость, наблюдаемая в зоне хампа и спиц, не является критичной для готового изделия. Применение состава Ж163 в большей степени устраняет пористость по ободу и в области хампа, то есть обеспечивает лучшее заполнение и питание тонких сечений.

Таким образом, проведенное компьютерное моделирование наглядно показывает возможность использования разработанных покрытий при литье колес под низким давлением. Расчетные значения времени затвердевания находятся в пределах допустимого отклонения от базовых режимов, что позволяет в дальнейшем оптимально настроить режимы работы литейных машин и повысить производительность участка.

В *четвертой главе* приведены результаты промышленной апробации композиций КПТ110 и Ж163, проведенной с апреля 2015 по июнь 2016 гг. на участке подготовки пресс-форм и в литейном цехе ООО «КиК» (г. Красноярск).

Рабочие поверхности пресс-форм окрашивались предложенными покрытиями по серийной методике с помощью пульверизатора. Состав шихтовых материалов, технология приготовления расплава и режимы литья также не подвергались изменениям. Отливки колес получали на одной и той же литейной машине, после чего они проходили отбраковку по рентген-контролю. За период испытаний было отлито более 4 500 экспериментальных колес (таблица 4).

Таблица 4 – Результаты испытаний разработанных покрытий

Модель	Типоразмер, дюйм	Выход годных отливок в зависимости от применяемого покрытия, %	
		серийное	разработанное
Окинава	7,5x17	92,42	93,95
RAV4	7x17	89,40	93,51
Казантип	7,5x18	81,25	91,60
Brent	6x16	94,37	96,96
Беринг	7x16	86,84	92,96
Creed	6,5x16	85,50	94,40

Металлографическое исследование темплетов, вырезанных из колес опытных партий, свидетельствует об уменьшении пористости и смещении пораженных зон вглубь отливок (рис. 9).

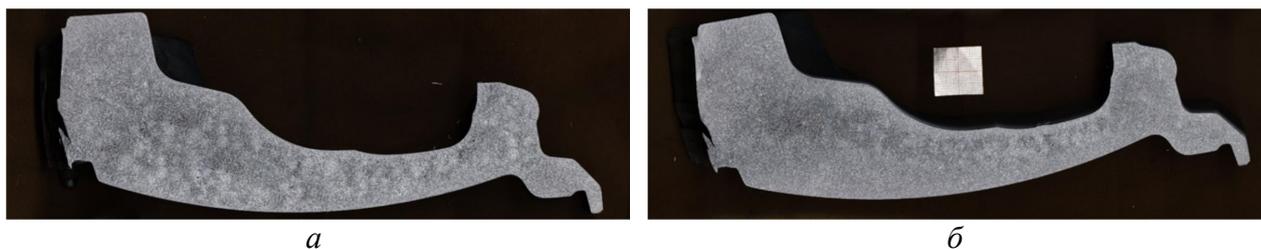


Рисунок 9 – Изменение макроструктуры колеса в зависимости от применяемого теплопроводящего покрытия: *a* – D1; *б* – КПТ110

Увеличение подповерхностного слоя, свободного от пористости, благоприятно сказывается на качестве лицевой поверхности колес, для которых проводится дополнительная механическая обработка и проточка при окрашивании «под алмаз».

По завершении периода апробации покрытия КРТ110 на ООО «КиК» получен акт внедрения в производство.

В то же время теплоизолирующее покрытие Ж163 благодаря низкой теплопроводности разделительного слоя практически полностью устраняет недоливы и неслитины, вызванные обрывом питания (рисунок 10). Значительно снижает технологический брак по подкраске пресс-форм между циклами литья, что связано с высокой приведенной прочностью покрытия и влечет повышение производительности цеха.

Отчетливо видно уменьшение пористости, связанное с более равномерной кристаллизацией отливок. При литье с разработанным покрытием в отливке отсутствуют дефекты, вызванные заворотом окисной пленки, что свидетельствует об оптимальных значениях шероховатости и теплопроводности разделительного слоя.

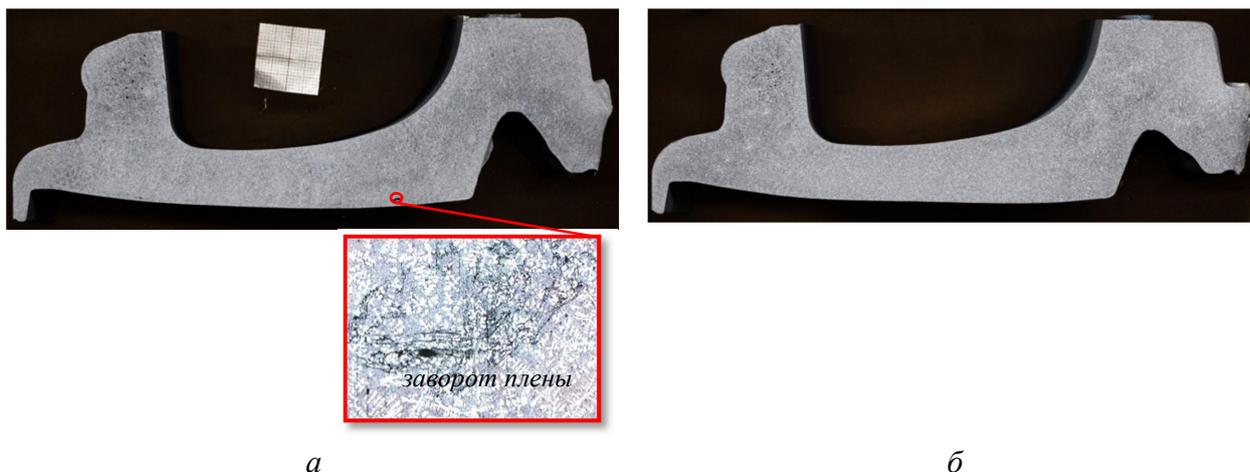


Рисунок 10 – Изменение макроструктуры колеса в зависимости от применяемого теплоизолирующего покрытия: *а* – D2; *б* – Ж163

Анализ механических свойств опытных колес установил, что все годные отливки соответствуют требованиям ГОСТ Р 50511–93 и способны обеспечить безопасную эксплуатацию транспортного средства. При этом отмечается улучшение характеристик (временного сопротивления разрыву, условного предела текучести и относительного удлинения) по сравнению с литьем на серийном покрытии в среднем на 1,5–2 %.

Суммарный экономический эффект от внедрения разработанных импортозамещающих покрытий составит 850 000 руб./год.

В заключении представлены основные выводы и результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Определено, что для составов водорастворимых разделительных покрытий пресс-форм литья под низким давлением, приготовленных на основе минеральных и оксидных материалов с размером частиц от 0,2 до 25 мкм, оптимальное содержание связующего составляет 44–65 %. Лучшее сочетание показателей общих свойств покрытий проявляется при соотношении наполнителя и связующего близкого к 1:1,1–1:1,2.

2. Разработаны составы теплопроводящее (КПТ110) и теплоизолирующее (Ж163) разделительные покрытия, превосходящие серийно используемые составы по уровню общих, рабочих и технологических свойств. По сравнению с зарубежными аналогами седиментационная устойчивость увеличена в среднем на 20 %, а приведенная прочность – в 4,5 раза; на 25–50 % снижена газотворность; средний прирост формозаполняемости сплава АК12 по окрашенной спиральной пробе – 9 см. На теплопроводящий состав получен патент РФ № 2604163 «Разделительное покрытие для литейных пресс-форм».

3. Установлено, что внутренняя структура нанесенного разделительного слоя определяет степень влияния его шероховатости и теплопроводности на формозаполняемость расплава. Для плотных тонких слоев (до 40 мкм) формозаполняемость силумина по окрашенной поверхности прямо пропорциональна шероховатости и обратно пропорциональна теплопроводности применяемого покрытия.

4. По результатам компьютерного моделирования в пакете ProCAST[®], разработанное теплопроводящее покрытие ускоряет кристаллизацию колеса на 2,1 с, а теплоизоляционное замедляет на 1,3 с.

5. Разработанные составы разделительных покрытий прошли апробацию при производстве автомобильных легкосплавных колес методом литья под низким давлением на ООО «КиК» (г. Красноярск). Теплопроводящее покрытие КПТ110, на которое получен акт внедрения, дало увеличение выхода годных отливок следующих моделей, %: Окинава – 1,53, RAV4 – 4,11, Казан-тип – 10,35. При испытаниях теплопроводящего покрытия Ж163 увеличен выход годного для следующих моделей колес, %: Брент – 2,59, Беринг – 6,1%, Creed – 8,90. Все годные отливки соответствуют требованиям ГОСТ Р 50511–93. Предполагаемый суммарный экономический эффект от внедрения разработанных покрытий составит до 850 000 руб./год.

6. Результаты исследований внедрены в учебный процесс ФГАОУ ВО «СФУ» и применяются при обучении бакалавров по направлению 22.03.02 «Металлургия», профиль 22.03.02.04 «Литейное производство черных и цветных металлов», магистров по направлению 22.04.02 «Металлургия», магистерская программа 22.04.02.07 «Теория и технология литейного производства цветных металлов и сплавов», аспирантов по направлению 22.06.01 «Технологии материалов», профиль 05.16.04 «Литейное производство».

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

1. Структурообразование литейных алюминиевых сплавов при литье под низким давлением : монография / Т. А. Богданова, Н. Н. Довженко, Т. Р. Гильманшина, А. А. Косович [и др.]. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2015. – 164 с.

2. Теплоизолирующие покрытия для литья легкосплавных колес под низким давлением / А. А. Косович, Т. Р. Гильманшина, Т. А. Богданова [и др.] // Литейное производство. – 2017. – № 1. – С. 14–17 (**издание, рекомендуемое ВАК**).

3. О зарубежной классификации дефектов легкосплавных колес / А. А. Косович, Т. Р. Гильманшина, Т. А. Богданова, Е. Г. Партыко // Литейное производство. – 2016. – № 7. – С. 23–26 (**издание, рекомендуемое ВАК**).

4. Импортозамещающие разделительные покрытия для пресс-форм литья под низким давлением / А. А. Косович, Т. Р. Гильманшина, Т. А. Богданова [и др.] // Журнал Сибирского Федерального Университета. Серия Техника и технологии. – 2016. – Т. 9. – № 5. – С. 686–692 (**издание, рекомендуемое ВАК**).

5. Предотвращение дефектов легкосплавных колес / А. А. Косович, Т. Р. Гильманшина, С. В. Беляев [и др.] // Литейщик России. – 2017. – № 2. – С. 34–36 (**издание, рекомендуемое ВАК**).

6. Косович, А. А. Компьютерное моделирование процессов формирования легкосплавных дисков по технологии литья под низким давлением [Электронный ресурс] / А. А. Косович, Е. Г. Партыко, Т. А. Богданова, А. В. Ермолаев, С. В. Мельников, П. Е. Титаренко // Молодежь и наука : сб. матлов X Юбилейной Всероссийской науч.-тех. конф. – 2014. – Режим доступа: http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2014/pdf/d03/s08/s08_004.pdf

7. Возможность разработки высокотехнологичных покрытий пресс-форм для литья под низким давлением / П. Ю. Барбицкий, А. А. Косович, Т. А. Богданова [и др.] // Цветные металлы и минералы : сб. тезисов докладов шестого международного конгресса. – Красноярск, 2014. – С. 366.

8. Разработка импортозамещающих разделительных покрытий пресс-форм для литья под низким давлением на основе оксидных материалов / А. А. Косович, Т. Р. Гильманшина, Т. А. Богданова [и др.] // Цветные металлы и минералы : сб. тезисов докладов седьмого международного конгресса. – Красноярск, 2015. – С. 388.

9. Сравнение свойств разделительных покрытий для пресс-форм литья под низким давлением / А. А. Косович, Т. Р. Гильманшина, Т. А. Богданова, Е. Г. Партыко // Технические науки – от теории к практике: сб. ст. по матер. LV междунар. науч.-практ. конф. № 2 (50). – Новосибирск, 2016. – С. 55–59.

10. Development experience of effective die mold coatings for low-pressure casting: prospects of using Krasnoyarsk region resources / А. А. Kosovich, Т. R. Gilmanshina, Т. А. Bogdanova, S. V. Belyaev, E. G. Partyko // Proceedings of the

Eighth International conference on Eurasian scientific development. – Vienna, 2016. – Pp. 148-150.

11. Влияние разделительных покрытий на жидкотекучесть силумина АК12 / А. А. Косович, Т. Р. Гильманшина, Т. А. Богданова [и др.] // Научно-технический прогресс : актуальные и перспективные направления будущего : сб. матер. II междунар. науч.-практ. конф. – Кемерово, 2016. – Т. 2. – С. 202–204.

12. Моделирование литья автомобильных колес в пресс-формы с нанесенным разделительным покрытием / Т. Р. Гильманшина, А. А. Косович, Е. Г. Партыко, Т. А. Богданова // Состояние и перспективы развития литейных технологий и оборудования в цифровую эпоху : сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. – Москва, 2016. – С. 72–76.

13. Разработка эффективных покрытий пресс-форм для литья алюминиевых сплавов под низким давлением / А. А. Косович, Т. Р. Гильманшина, Т. А. Богданова [и др.] // Цветные металлы и минералы : сб. тезисов докладов восьмого международного конгресса. – Красноярск, 2016. – С. 230.

14. Предотвращение усадочных, термических и газовых дефектов легкосплавных колес / А. А. Косович, Т. Р. Гильманшина, С. В. Беляев [и др.] // Современные технологии в машиностроении и литейном производстве : сб. матер. II междунар. науч.-практ. конф. – Чебоксары, 2016. – С. 120–125.

15. Пат. 2604163 Российская Федерация, МПК В 22 С 3/00. Разделительное покрытие для литейных пресс-форм / А. А. Косович, Т. Р. Гильманшина, Е. Г. Партыко Т. А. Богданова, П. Ю. Барбицкий, С. И. Лыткина, А. Ю. Богданов, С. В. Мельников ; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». – № 2015120544/02; заявл. 29.05.2015; опубл. 10.12.2016 Бюл. № 34.

Подписано в печать __. __.2018. Печать плоская. Формат 60x84/16

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1.0. Тираж 100 экз. Заказ __

Отпечатано полиграфическим центром

Библиотечно-издательского комплекса

Сибирского федерального университета

660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а

Тел./факс: 8(391)206-26-67, 206-26-49

E-mail: print_sfu@mail.ru; <http://lib.sfu-kras.ru>