

На правах рукописи



**Богданова Татьяна Александровна**

**РАЗРАБОТКА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОЙ  
ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ КОЛЕС  
ИЗ СИЛУМИНА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ А7**

05.16.04 – Литейное производство

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Красноярск – 2015

Работа выполнена в ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

**Научный руководитель:**

Доктор технических наук, профессор, Довженко Николай Николаевич

**Официальные оппоненты:**

Афанасьев Владимир Константинович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Сибирский индустриальный университет», кафедра материаловедения, литейного и сварочного производств, профессор.

Никитин Константин Владимирович, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет», кафедра «Литейные и высокоэффективные технологии», главный научный сотрудник

**Ведущая организация:**

ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых», г. Владимир.

Защита состоится 5 марта 2015 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.10 при ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660025, г. Красноярск, пр. «Красноярский рабочий», д. 95, ауд. 212.

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

Автореферат разослан 20 января 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Гильманшина  
Татьяна Ренатовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ<sup>1</sup>

**Актуальность работы.** Сплавы на основе алюминия занимают особое положение среди конструкционных материалов. С одной стороны, это связано с возможностью достижения уникального сочетания основных эксплуатационных свойств (прочности, пластичности, коррозионной стойкости и т.д.) с низкой плотностью (в частности, сравнительно со сталью и медными сплавами). С другой стороны, алюминий относится к наиболее распространенным в природе элементам, занимая по содержанию в земной коре третье место (и первое среди металлов, превосходя по этому показателю медь в 800 раз). Уже сейчас он занимает прочное первое место по объему производства и потребления среди всех цветных металлов. Все это говорит о хороших перспективах увеличения его производства и потребления. Однако существует актуальная проблема, связанная с необходимостью значительного снижения себестоимости продукции из алюминиевых сплавов (в виде фасонных отливок, слитков, деформированных полуфабрикатов) при сохранении (а желателен при повышении) основных эксплуатационных и технологических характеристик.

Марочные алюминиевые сплавы, ориентированные на применение в ответственных изделиях, как правило, имеют строгие ограничения по примесям, прежде всего, это относится к железу. Такие строгие ограничения требуют применения алюминия повышенной чистоты, что, во многих случаях, приводит к запредельно высокой себестоимости сплава и, следовательно, стоимости готовых изделий.

На основании анализа литературных данных по состоянию технологий производства автомобильных колес из легких сплавов сформулированы цель и задачи работы.

**Цель и задачи исследований.** Целью данной работы является совершенствование сквозной технологии приготовления и литья под низким давлением силумина на основе первичного алюминия А7, обеспечивающей стабильность физико-механических и эксплуатационных свойств автомобильных колес.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- предложить и экспериментально обосновать методы оперативного контроля загрязненности литейных сплавов типа силуминов водородом и оксидными пленками;
- выполнить экспериментальные исследования по поиску соотношения железа и элемента-компенсатора (марганца) в силумине на основе алюминия А7, обеспечивающего стабильность физико-механических и эксплуатационных свойств автомобильных колес;

---

<sup>1</sup> Диссертация выполнена при научной консультации канд. техн. наук, доц. Т.Р. Гильманшиной

– исследовать с использованием программного комплекса ProCast® процесс формирования колес при литье под низким давлением по времени затвердевания и распределению пористости по объёму колеса при различном содержании в силумине железа;

– экспериментально исследовать влияние различных модификаторов и технологий их использования на структуру и свойства силумина на основе алюминия А7;

– провести опытно-промышленное опробование сквозной технологии приготовления и литья под низким давлением колес из силумина на основе первичного алюминия А7.

#### **Научная новизна полученных результатов:**

1. Установлены взаимосвязи прогнозирования индекса плотности от содержания водорода и оксидных включений в расплаве для алюминиевых литейных сплавов. Определено граничное значение индекса плотности, обеспечивающее получение качественных отливок колес методом литья под низким давлением из алюминиевых сплавов. При индексе плотности 8 % пораженность оксидными пленками на макрошлифе составляет от 0,5 до 1,5 %, содержание водорода в сплаве – 0,2-0,25 см<sup>3</sup>/100г.

2. Исследована взаимосвязь между структурой, механическими свойствами, содержанием железа и марганца в силумине, приготовленном на основе первичного алюминия А7, что позволяет прогнозировать высокие механические свойства автомобильных колес. С помощью компьютерного моделирования в программном комплексе ProCast® исследованы и установлены рациональные технологические параметры литья автомобильных колес из силумина на основе алюминия А7.

3. Установлено влияние ультрамелкодисперсных модификаторов (таблетированного модификатора на основе карбида кремния и комплексного гранулированного флюса на основе солей калия) на структуру и механические свойства силуминов, предназначенных для литья конкурентоспособных автомобильных колес под низким давлением. Экспериментально обоснован механизм модифицирования силумина таблетированным модификатором на основе ультрамелкодисперсного карбида кремния, что позволило повысить относительное удлинение сплава на 50 %, временное сопротивление разрыву – на 20 % за счет управления морфологией β-фазы.

4. Показано, что комплексный гранулированный флюс на основе солей калия обладает рафинирующим (индекс плотности снижается в 1,3-1,5 раза) и модифицирующим (размер макрозерна уменьшается до 0,7 мм) действиями, что позволяет совмещать эти операции обработки расплава.

#### **Практическая значимость работы:**

1. Реализованы методы оперативного контроля содержания водорода и оксидных плен в производственных условиях – индекс плотности и метод технологической пробы для доэвтектических и эвтектических силуминов, что позволило повысить показатель воспроизводимости процесса приготовления сплава в 2 раза.

2. Разработан сплав типа силумин на основе первичного алюминия А7 для изготовления автомобильных колес, соответствующих требованиям ГОСТ Р 50511-93, методом литья под низким давлением. Установлено, что уровень механических свойств автомобильных колес, изготовленных методом литья под низким давлением из предложенного сплава, на 25 % по пределу текучести условному, на 15 % по временному сопротивлению на разрыв и на 40 % по относительному удлинению выше уровня свойств колес, полученных по серийной технологии, что дает возможность автомобильным колесам конкурировать на мировом рынке.

3. Предложено технологическое решение, обеспечивающее в силуминах управление морфологией  $\beta$ -фазы ультрамелкодисперсным модификатором на основе карбида кремния, позволяющее снизить себестоимость колес за счет использования более дешевых шихтовых материалов (алюминий марки А7 взамен А8, А85).

4. Разработана технология, совмещающая рафинирование и модифицирование силуминов на основе первичного алюминия А7 гранулированным флюсом на основе солей калия, сокращающая время внепечной обработки расплава.

5. Предложенный сплав прошел промышленное освоение при литье колес под низким давлением на ООО «КиК», г. Красноярск, что позволило снизить затраты на их производство за счет использования первичного алюминия с повышенным содержанием железа. Экономический эффект при этом составил 85,54 дол./1 т годного литья. Уровень механических свойств автомобильных колес, изготовленных из силумина, полученного на основе алюминия А7, соответствует DIN EN 1706, ГОСТ Р 50511-93.

**Методология и методы исследования.** При выполнении диссертационных исследований использованы современные методы и методики исследования физико-механических свойств алюминиевых сплавов на оборудовании в лабораториях ООО «КиК» и ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет».

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Метод оперативного контроля индекса плотности для оценки загрязненности литейных алюминиевых сплавов водородом и метод технологической пробы для оценки загрязненности литейных алюминиевых сплавов водородом и оксидными пленами.

2. Экспериментальные закономерности, подтверждающие эффективность легирования марганцем силумина на основе алюминия А7.

3. Технологические решения, состоящие в выборе рациональной технологии рафинирования и модифицирования силумина с повышенным содержанием железа.

4. Новые технологии приготовления силумина с повышенным содержанием железа и литья под низким давлением автомобильных колес.

**Личный вклад** автора заключается в планировании экспериментов, выборе методики, их выполнении в лабораторных условиях ФГАОУ ВПО

«Сибирский федеральный университет» и проведении опытно-промышленных испытаний в производственных условиях ООО «КиК» (г. Красноярск), обобщении и научном обосновании результатов и в формулировке 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, что гарантировало достоверность полученных результатов, для обработки которых использованы стандартные компьютерные программы.

**Реализация работы в промышленных условиях.** Результаты внедрения разработанного сплава в условиях ООО «КиК» (г. Красноярск) показали возможность снижения себестоимости автомобильных дисков на 85,54 дол./1 т за счет использования первичного алюминия марки А7.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на IX и X Всероссийских научно-технических конференциях «Молодежь и наука» (Красноярск, 2013-2014 гг.); IV, V, VI международном конгрессе и выставке «Цветные металлы» (Красноярск, 2012-2014 г.); XIII международной науч.-техн. уральской школе-семинаре металловедов-молодых ученых (Екатеринбург, 2012 г.); на всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы проектирования и эксплуатации авиационных двигателей» (Уфа, 2014 г.).

**Публикации.** Результаты диссертационной работы отражены в 14 печатных трудах и тезисах докладов, из них 3 из перечня журналов, рекомендуемых ВАК. Подана заявка на изобретение.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, содержащего 102 источника, и 4 приложений. Основной материал изложен на 150 страницах, включая 19 таблиц и 95 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В ***первой главе*** проведен анализ сплавов, используемых для изготовления автомобильных дисков, рассмотрены современные способы их рафинирования и модифицирования.

Конкурентоспособность дисков определяется их потребительскими свойствами в сочетании с низкой себестоимостью. Повышение потребительских свойств дисков достигается улучшением их качества, определяемое высокими эксплуатационными свойствами, и оригинальными дизайнерскими решениями. Снижение себестоимости может быть получено за счет

использования дешевых шихтовых материалов при приготовлении расплава.

Согласно исследованиям отечественных и зарубежных ученых А.В. Курдюмова, М.В. Пикунова, В.И. Никитина, Р.и Хосена, В.К. Афанасьева и многих других, создавших научные основы плавки и кристаллизации цветных металлов и сплавов, при использовании операций рафинирования и модифицирования можно достигнуть необходимого уровня показателей качества сплава и гарантировать эксплуатационную надежность изделий. Наиболее перспективным направлением при модифицировании является применение ультрамелкодисперсных модификаторов, которые при небольших концентрациях могут повысить качество сплава.

На основании проведенного анализа поставлены цель и задачи диссертационного исследования.

Во *второй главе* приведены методы исследований структуры и свойств сплава и испытаний автомобильных дисков.

Для исследования структуры и свойств сплава применяли *методы* индекса плотности, технологической пробы; спектрального анализа; оптической, электронной растровой и просвечивающей микроскопии; контроля уровня механических свойств, дифференциального термического анализа.

Оценку стойкости автомобильных колес проводили на стендах по ГОСТ Р 50511-93.

Для установления рациональных технологических параметров литья автомобильных колес из силумина на основе алюминия А7 использовали программный комплекс ProCast®.

В *третьей главе* показано, что обеспечение требований ГОСТ Р 50511-93 к структуре и уровню механических свойств колес, с одной стороны, и получение высоких технологических свойств сплава, с другой, требуют системного и оперативного контроля качества металла.

В России сложилась практика определения содержания водорода в алюминиевых сплавах методом вакуум-нагрева, основным недостатком которого является длительность проведения анализа. Поэтому он не может использоваться в качестве экспресс-метода при оперативной корректировке технологии приготовления сплавов и литья изделий. В данной работе в качестве экспресс-метода предложен метод индекса плотности металла на приборе 3vt (RPT test) – косвенный метод определения содержания водорода. Опытная работа показала хорошую воспроизводимость результатов замеров тремя методами: индекса плотности, вакуум-нагрева по ГОСТ 21132.1-98 и прибором Alspek H mini (Foseco), что позволило определить граничные значения индекса плотности, обеспечивающие получение автомобильных колес высокого качества. При индексе плотности 8 % содержание водорода в сплаве составляет 0,2-0,25 см<sup>3</sup>/100г (рис. 1).

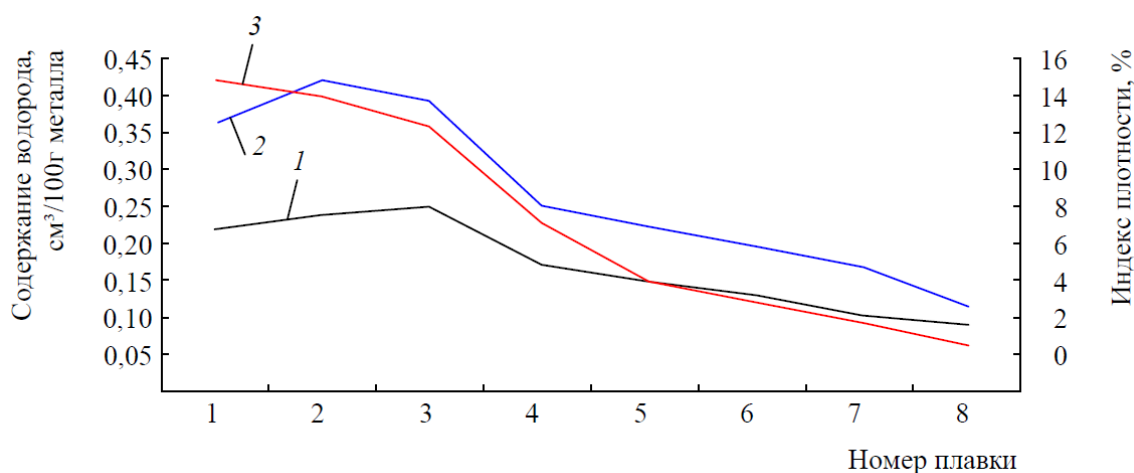


Рисунок 1 – Содержание водорода в сплаве, определенное различными методами: 1 – AlspekHmini; 2 – по твердой пробе; 3 – индекс плотности

Для оценки загрязненности литейного сплава оксидными пленками и водородом был опробован метод технологической пробы, применяемый для деформируемых сплавов. Суть метода заключается в оценке структуры изломов осаженных галет, полученных в процессе горячей деформации открытыми бойками образцов, отлитых в специальный кокиль. Процесс осадки приводит к развитию дефектов, а последующий нагрев галет до температуры 450 °С и выдержка при этой температуре в течение двух часов, способствует фиксации дефектов. В ходе эксперимента для соблюдения данных условий была выбрана степень деформации для осадки  $\varepsilon = 40\%$  (рис. 2).



б



в

а

Рисунок 2 – Кокиль для изготовления технологических проб (а), образцы проб до (б) и после (в) рафинирования

Количественным результатом анализа является расчетный коэффициент пораженности оксидными пленками ( $K_D$ ), равный

$$K_D = S_D / S_{\text{изл}},$$

где  $S_D$  – площадь дефектов, обнаруженных в изломах технологических проб, мм<sup>2</sup>;  $S_{\text{изл}}$  – общая площадь исследуемого излома, мм<sup>2</sup>.



При индексе плотности 8 % пораженность оксидными пленами на макрошлифе составляет от 0,5 до 1,5 %, содержание водорода в сплаве – 0,2-0,25 см<sup>3</sup>/100г (рис. 3).

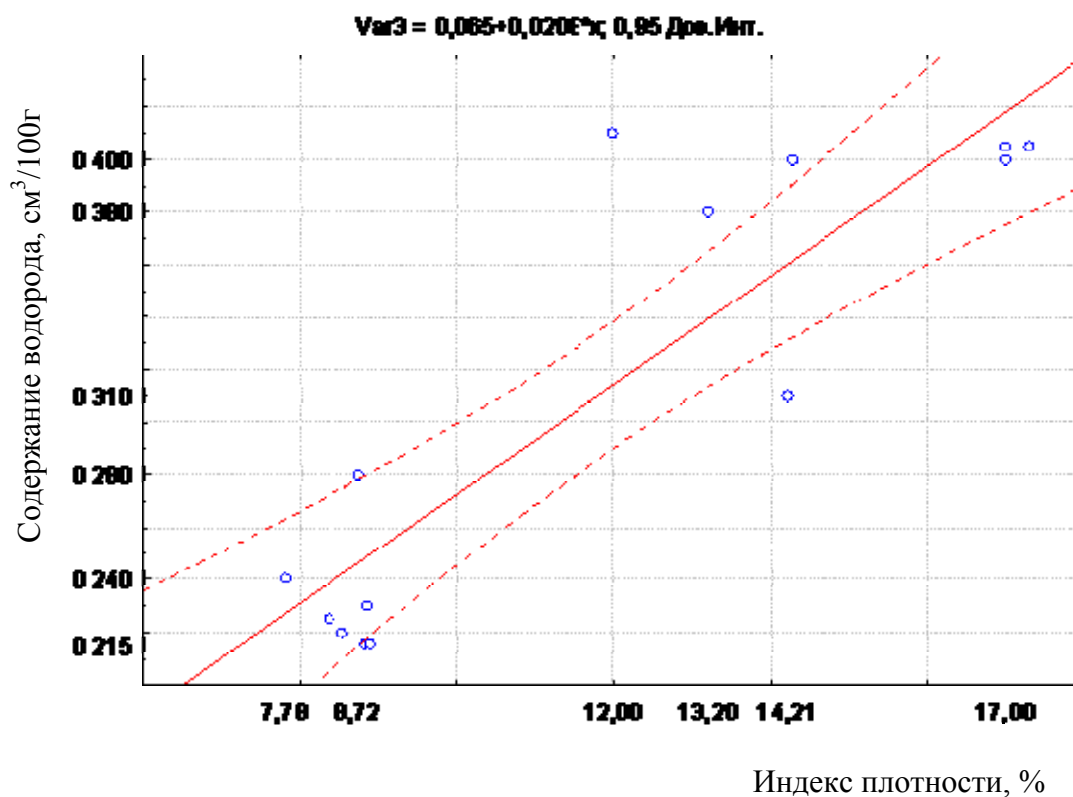


Рисунок 3 – Диаграмма рассеяния индекса плотности сплава и содержания водорода в расплаве

Результаты исследований показывают, что после рафинирования меняется объемная доля площадок/расслоений на поверхности излома в зависимости от содержания водорода и показаний индекса плотности (рис. 4).

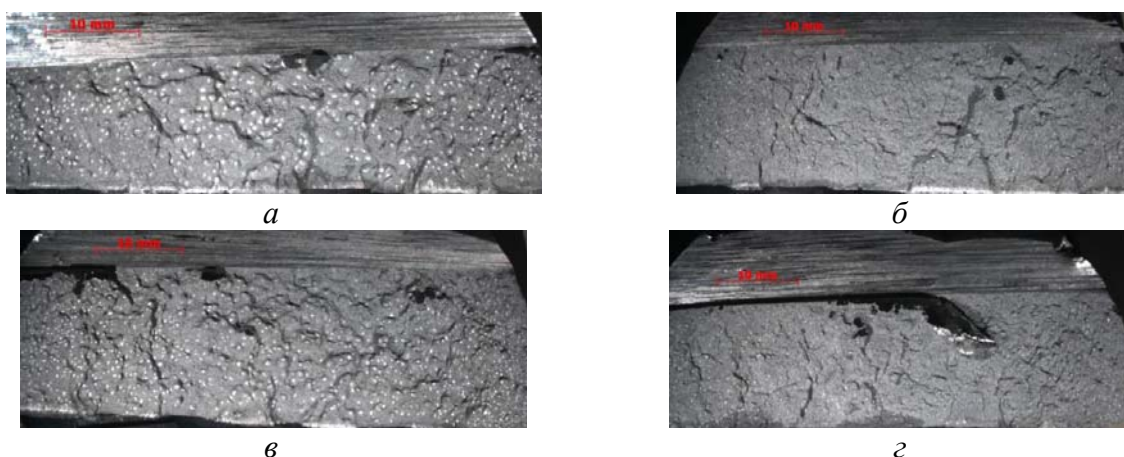


Рисунок 4 – Изломы технологических проб до и после рафинирования расплава АК12:  
*а, в* – до рафинирования; *б, г* – после рафинирования.  
 К<sub>д</sub>, %: *а* – 3,48; *б* – 0,77; *в* – 3,08; *г* – 0,60

Полученные изломы исследовали при больших увеличениях с использованием светового и растрового электронного микроскопов с целью анализа характера и причины их разрушения. Анализ показал, что разрушение заготовок происходит по оксидным пленам, расположенным по границам зерен и развитых в процессе деформации в виде площадок различного цвета (рис. 5, 6).

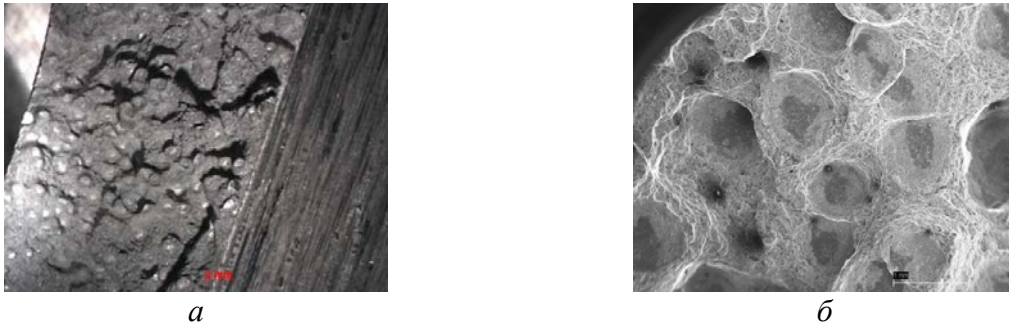


Рисунок 5 – Изломы технологических проб до дегазации.  
Микроскопия: а – световая; б – растровая

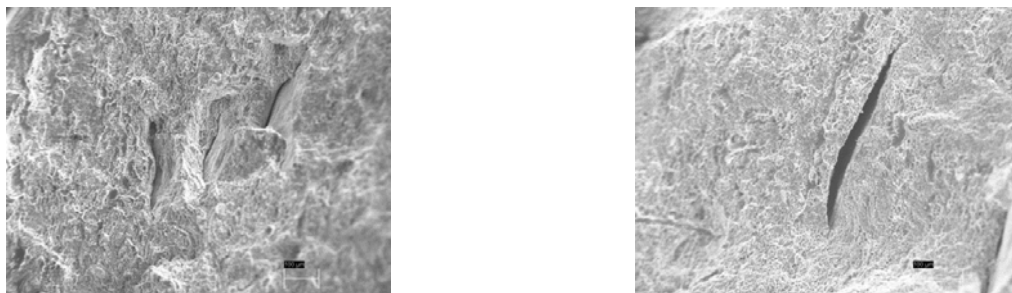


Рисунок 6 – Микроструктура изломов образцов, испытанных на разрыв

Установлены зависимости индекса плотности от загрязненности сплава АК12 оксидными пленами и водородом. Повышение уровня  $K_d$  больше 2 % и содержания водорода в расплаве больше  $0,25 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  сопровождается резким увеличением индекса плотности, следовательно, и снижением качества расплава (рис. 7, 8).

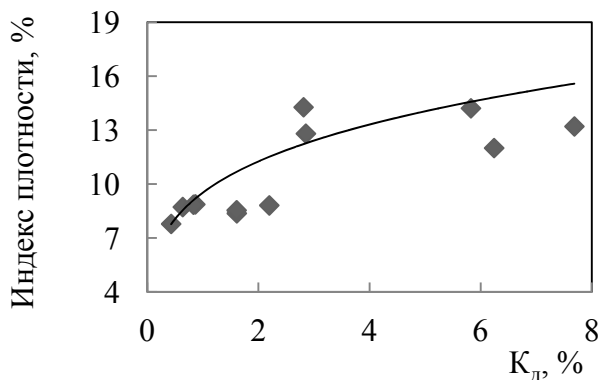


Рисунок 7 – Зависимость индекса плотности от коэффициента пораженности оксидными пленами ( $K_d$ )

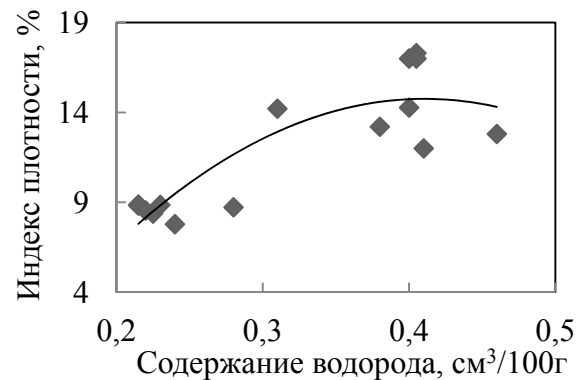


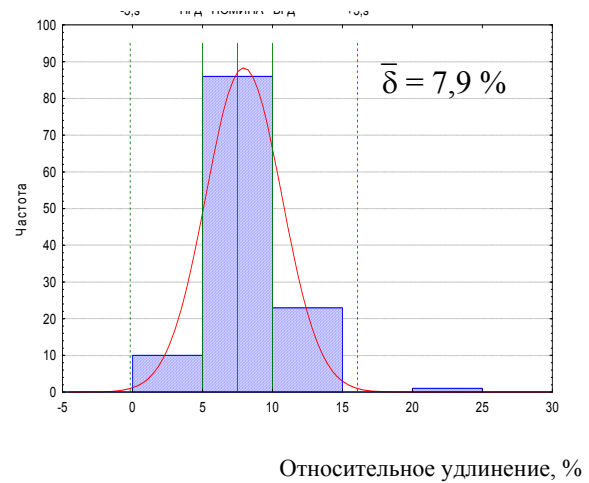
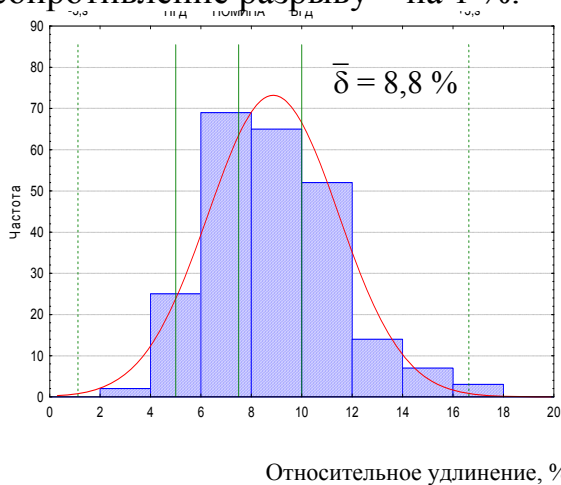
Рисунок 8 – Зависимость индекса плотности от содержания водорода в расплаве

На основании экспериментальных данных методом регрессионного анализа была получена математическая модель зависимости индекса плотности ( $y_{и.п.}$ ) от коэффициента пораженности оксидными пленами ( $x_1$ ) и содержания водорода ( $x_2$ ), которой можно оценивать стабильность технологии приготовления сплава:

$$y_{и.п.} = 1,72 + 0,1 \cdot x_1 + 30,764 \cdot x_2.$$

Таким образом, в ходе работы показана возможность использования экспресс-метода индекса плотности для оценки загрязненности алюминиевых литейных сплавов водородом и метода В.И. Добаткина – оксидными пленами и водородом.

Показано, что для изготовления автомобильных дисков методом литья под низким давлением применяют силумины, приготовленные на основе алюминия марок А85 и А8. Статистический анализ механических свойств, проведенный в программе «Статистика» за период с 2012-2014 гг. показал, что при снижении марки первичного алюминия наблюдается уменьшение уровня механических свойств колес, в частности: среднее значение относительного удлинения снижается на 10 % (рис. 9), временное сопротивление разрыву – на 1 %.



*a* *б*  
Рисунок 9 – Относительное удлинение сплава АК12  
с содержанием железа 0,15 (*a*) и 0,18 (*б*) %

Стандартным решением снижения влияния вредного воздействия железа на свойства алюминиевых сплавов является введение в их состав элементов-компенсаторов. В данной работе для этой цели выбран марганец. В составе опытных сплавов количество железа изменялось от 0,15 до 0,21 мас.% при различном соотношении железа и марганца (табл. 1).

Исследования микроструктуры (рис. 10) показали, что структура сплава без дополнительного легирования марганцем состоит из модифицированной эвтектики и грубых игл  $\beta$ -фазы стехиометрического состава  $Al_5FeSi$ .

Таблица 1 – Составы опытных сплавов

Номер сплава	Марка первичного алюминия	Соотношение Fe : Mn	Содержание элемента, % (алюминий – остальное)				
			Si	Fe	Mn	Mg	Sr
1	A8, A85	1 : 0	11,4	0,15	0,01	0,08	0,003
2	A7	1 : 0,5	11,2	0,20	0,09	0,06	
3		1 : 1	11,3	0,20	0,20		

При соотношении Fe : Mn, равном 1 : 0,5, в структуре наблюдаются микрообъемы с грубыми включениями  $\beta$ -фазы, а также обнаруживается присутствие фазы  $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$  в виде китайского иероглифа –  $\alpha$ -фаза. Дальнейшее увеличение содержания марганца в сплаве и доведение соотношения Fe : Mn до 1 : 1 приводит к полному исчезновению игольчатой модификации железистой фазы и образованию более компактной  $\alpha$ -фазы по всему сечению шлифа.

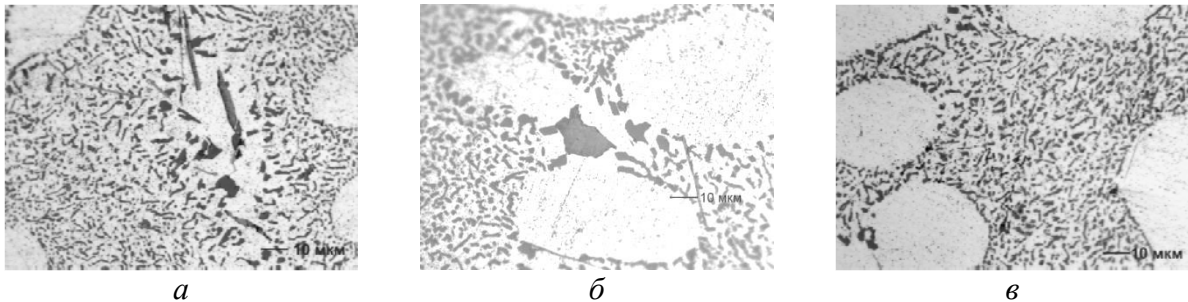


Рисунок 10 – Микроструктура алюминиевого сплава, полученного при соотношении Fe : Mn: *a* – 1 : 0; *б* – 1 : 0,5; *в* – 1 : 1

Максимальные литейные свойства опытного сплава достигаются при соотношении Fe : Mn, равном 1 : 1 (рис. 11).

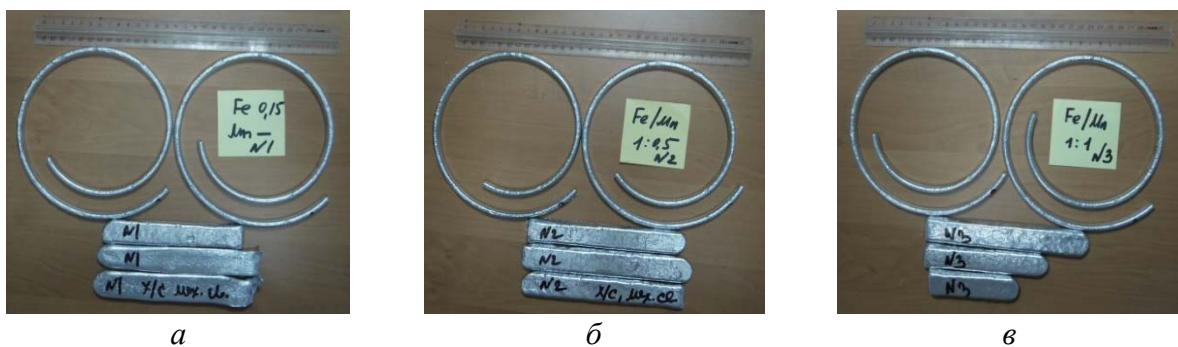


Рисунок 11 – Жидкотекучесть сплавов, см: *a* – 69 (сплав 1), *б* – 66 (сплав 2), *в* – 74 (сплав 3)

Для оценки влияния повышенного содержания железа на качество дисков в системе ProCast было выполнено моделирование процессов формирования легкосплавных дисков при содержании в сплаве железа от 0,25 до 1,5 % и при соотношении Fe : Mn = 1 : 1. Моделирование показало: с

повышением концентрации железа время затвердевания отливки уменьшается, что, несомненно, влечет за собой изменение установленных параметров литья (рис. 12, 13).

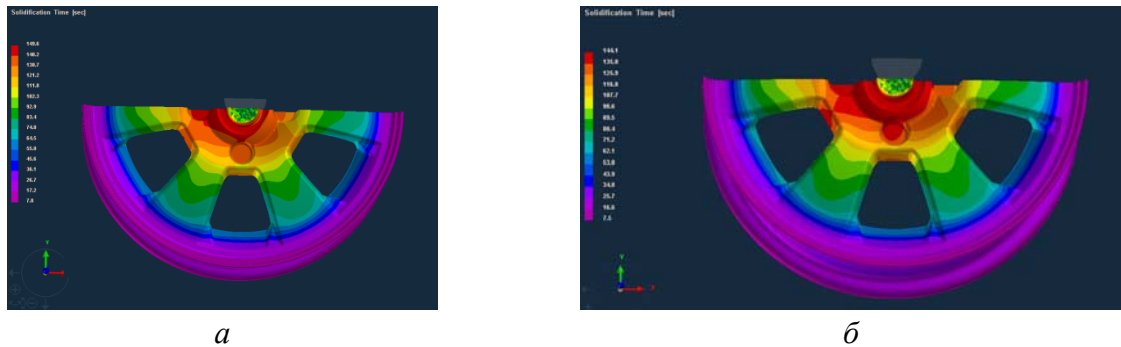


Рисунок 12 – Время затвердевания дисков из сплава АК12 с различным содержанием железа, %: *a* – 0,18; *б* – 1,5

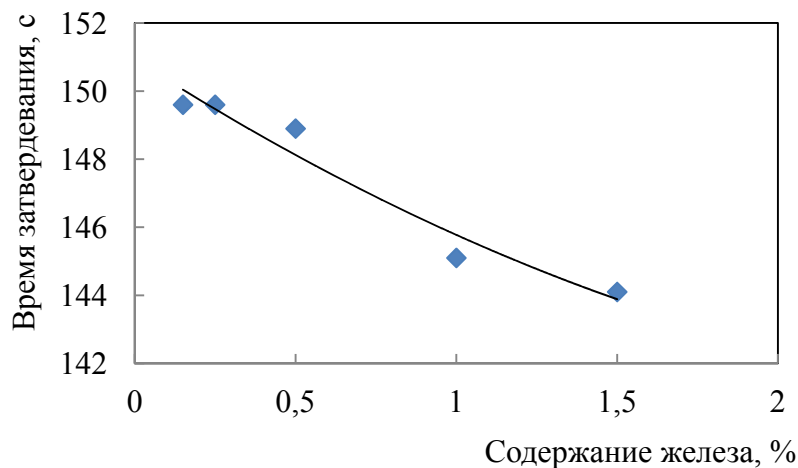


Рисунок 13 – Влияние содержания железа на время затвердевания дисков из сплава АК12

Это можно объяснить изменением интервала кристаллизации для сплава с различным содержанием железа, что следует из анализа дифференциальных термограмм (табл. 2).

Таблица 2 – Влияние содержания железа и соотношения железа к марганцу на температуры ликвидуса и солидуса

Номер сплава	Соотношение Fe : Mn	Температура, °C					
		ликвидуса	нагрева		охлаждения		
			солидуса	$\Delta t$	ликвидуса	солидуса	$\Delta t$
–	0,15 : 0,00	589,4	575,0	14,4	585,4	578,0	7,4
1	0,25 : 0,18	581,5	575,5	6,0	576,0	572,8	3,2
2	0,30 : 0,17	581,3	575,4	5,9	576,5	572,3	4,2
3	0,35 : 0,31	579,8	574,4	5,4	582,0	574,1	7,9

Результаты моделирования распределения зон пористости показали, что для дисков с содержанием железа до 0,25 % характерна сосредоточенная пористость в зонах внутренней закраины, хампа и спиц. Данная пористость является незначительной и некритичной для готового изделия. Повышение содержания железа до 1,5 % приводит к росту пористости усадочного характера. Это связано с образованием крупной игольчатой  $\beta$ -фазы, которая препятствует свободному течению эвтектической жидкости в междендритном пространстве (рис. 14).

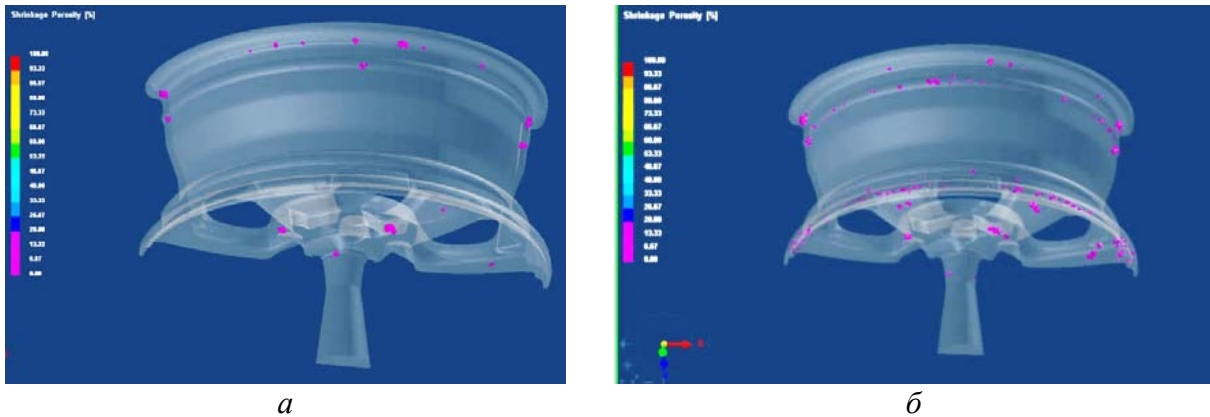


Рисунок 14 – Пористость дисков из сплава АК12 с содержанием железа 0,25% (а) и 1,0% (б)

Оценка полученного результата моделирования дает возможность определить максимально допустимое содержание железа, равное 0,25 %, при котором сохраняются серийные параметры литья дисков под низким давлением. Полученные результаты были внедрены в заводских условиях ООО «КиК». Анализ механических свойств колес, полученных из сплава АК12 с содержанием железа 0,25 % при различных соотношениях железа и марганца, подтвердил теоретические результаты (рис. 15).

Результаты стендовых испытаний дисков, изготовленных из серийного и опытного сплавов, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Стендовые испытания колес

Модель колеса	Количество колес, прошедших испытания, %:	
	Определение сопротивления усталости колес при изгибе	Определение сопротивления колеса удару под углом
Серийная технология:		
Гранта люкс	88	73
Титан-азия	100	75
Орбис	100	27
Опытная технология:		
Гранта люкс	100	100
Титан-азия	100	100
Орбис	100	100

Таким образом, на основании представленных данных можно сделать выводы: максимальное содержание железа в сплаве не должно превышать 0,25 %. При этом приоритетным остается соотношение железо : марганец, равное 1 : 1. По результатам исследования подана заявка на изобретение «Литейный сплав на основе алюминия» № 2014123014 от 05.06.2014.

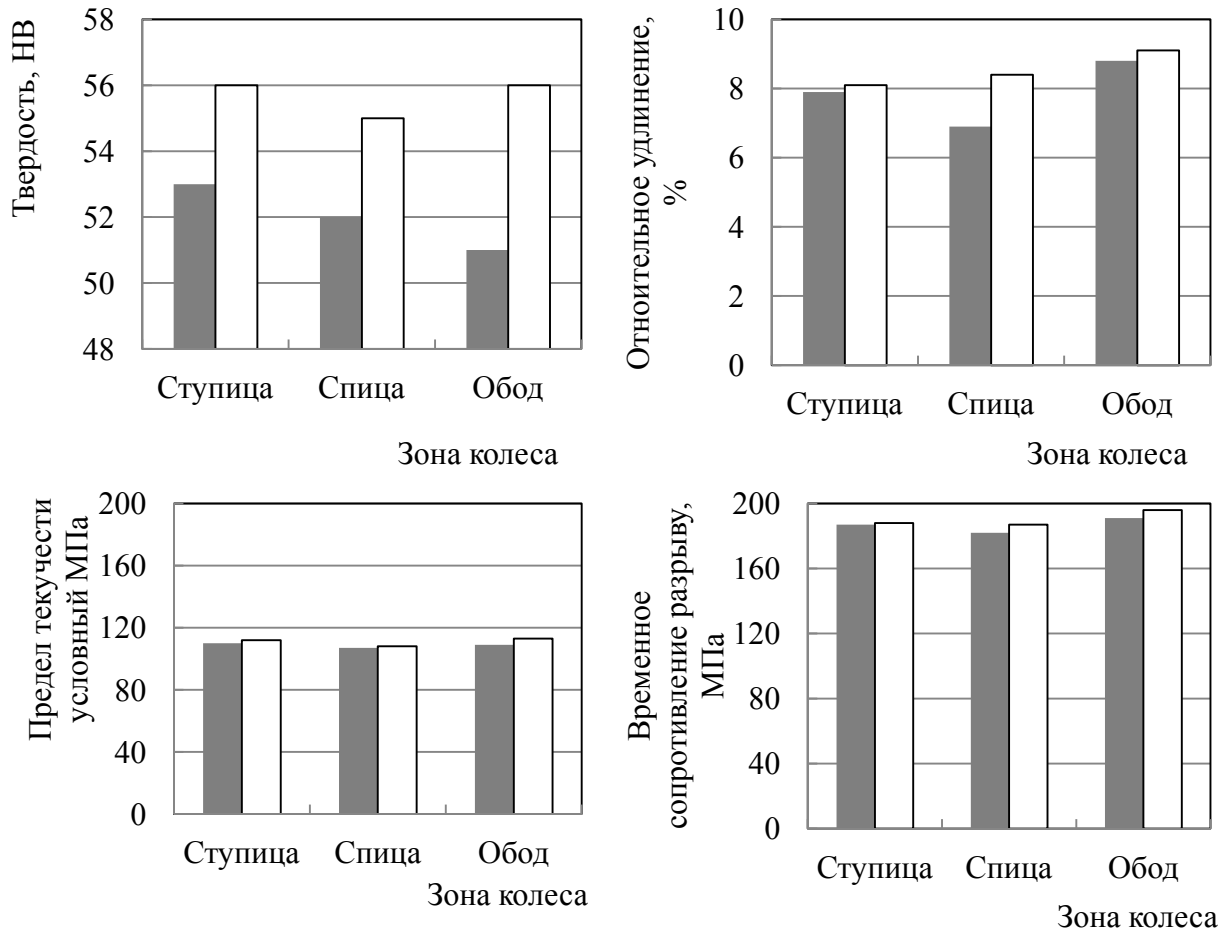


Рисунок 15 – Механические свойства колес, изготовленных из сплава АК12 с различным соотношением Fe :Mn: ■ – 1 : 0,5; □ – 1 : 1

Механические свойства дисков повышаются при нанесении декоративно-защитного покрытия в условиях полимеризации при высоких температурах (до 250 °С). Ранее проведенные исследования на сплаве АК7 показали, что после нанесения покрытия уровень прочностных свойств возрастает, в среднем, на 10 %. Аналогичные результаты были получены при покраске дисков из сплава АК12.

В *четвертой главе* показано влияние ультрамелкодисперсного модификатора на основе карбида кремния (рис. 16) на структуру (рис. 17, 18) и свойства сплава АК12 с содержанием железа 0,5 %. Исследования проводили в два этапа. На первом этапе исследовали влияние ультрамелкодисперсного модификатора на структуру и свойства чушки из сплава АК12; на втором этапе – на структуру и свойства автомобильных колес.

Анализ свойств модифицированной чушки показал, что ультрамелкодисперсный карбид кремния неравномерно распределяется в объеме расплава, что подтверждается исследованиями микроструктуры. Относительное удлинение при этом возрастает на 50 %, временное сопротивление разрыву – на 20 % в сравнении с контрольной чушкой.



Рисунок 16 – Внешний вид модификатора

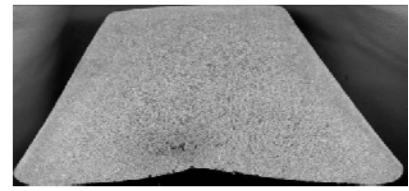
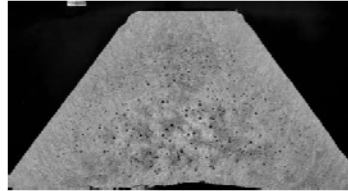


Рисунок 17 – Макроструктура сплава АК12 до (а) и после (б) обработки ультрамелкодисперсным модификатором на основе карбида кремния

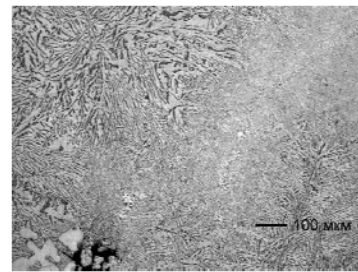
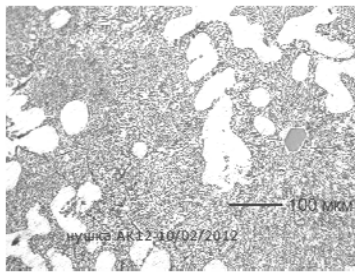


Рисунок 18 – Микроструктура сплава АК12 до (а) и после (б) обработки расплава ультрамелкодисперсным модификатором на основе карбида кремния

Это связано с тем, что введение карбида кремния в сплав способствует изменению морфологии грубых включений β-фазы, что и приводит к значительному увеличению механических свойств.

Полученные результаты можно объяснить следующим образом. Известно, что частицы карбида кремния плохо смачиваются алюминием. Для того, чтобы они стали центрами кристаллизации, необходимо формирование на их поверхности монокристаллического слоя из промежуточной фазы с параметрами решетки, близкими к алюминию, обеспечивающей смачиваемость частиц расплавом (рисунок 19).

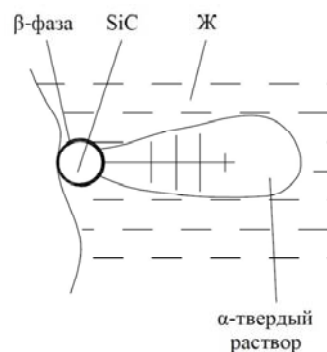


Рисунок 19 – Схема работы SiC, как модификатора



При введении SiC в расплав алюминия нежелательно образование карбида алюминия ( $Al_4C_3$ ). Термодинамические расчеты показали, что протекание данной реакции в интервале температур от 0 до 1000 °С маловероятно. Следовательно, наиболее возможной переходной фазой будет являться железосодержащая фаза. Для подтверждения предложенного механизма были изучены образцы фольг методом просвечивающей электронной микроскопии (рисунок 20).



Рисунок 20 – Частица карбида кремния с поверхностным слоем переходной фазы (а) и сетка дислокаций в переходном слое (б)

Установлено, что на поверхности двойников частиц карбида кремния формируется монокристаллический поверхностный слой, характеризующийся наличием муаровой картины (рисунок 20, а). На рис. 20, б в переходном слое отмечается эффект электронного муара и хорошо видны несовершенства в виде сетки дислокаций.

Сравнительный анализ механических свойств автомобильных дисков, отлитых из серийного сплава и сплава, обработанного ультрамелкодисперсным модификатором на основе карбида кремния, показал, что, в среднем, прирост уровня механических свойств для дисков из модифицированного сплава (например, относительное удлинение), увеличивается на 15-20 %. Однако, для этих дисков характерны и большие значения стандартного отклонения, что подтверждает неравномерность распределения модификатора в объеме расплава (табл. 4).

С целью получения равномерной дисперсной структуры и свойств в алюминиевом сплаве была исследована возможность использования в качестве его модификатора современного гранулированного флюса на основе солей калия ( $KBF_4$ ,  $K_2TiF_6$ ,  $K_2TiO_3$ ). Обработка расплава данным флюсом позволяет более эффективно уменьшить размер зерна в сравнении с прутковой лигатурой AlTi5B1. Это подтверждается меньшим изменением температуры ликвидуса (рис. 21, табл. 5).

После обработки расплава АК12 гранулированным флюсом количество зерен на 1 мм<sup>2</sup> составляет 2 шт., а после обработки расплава AlTi5B1 – 1 шт. (рис. 22, табл. 6).

Таблица 4 – Механические свойства колес, отлитых из сплава АК12, модифицированного модификатором на основе ультрамелкодисперсного карбида кремния

Модификатор	Зона колеса								
	Спица			Обод			Ступица		
	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
Стронций	181	90	6,8	188	110	10,0	183	94	7,6
	184	98	9,5	188	108	10,2	181	100	7,2
	187	97	9,4	191	99	10,3	183	106	7,6
<b>среднее значение</b>	<b>184</b>	<b>95</b>	<b>8,6</b>	<b>189</b>	<b>106</b>	<b>10,2</b>	<b>182</b>	<b>100</b>	<b>7,5</b>
<b>стандартное отклонение</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>1,5</b>	<b>2</b>	<b>6</b>	<b>0,2</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>0,2</b>
Модификатор на основе SiC	176	141	8,4	189	107	12,0	187	105	9,6
	185	104	9,5	194	150	16,5	184	104	8,9
	185	105	11,4	185	146	10,1	184	145	8,0
<b>среднее значение</b>	<b>182</b>	<b>117</b>	<b>9,8</b>	<b>189</b>	<b>134</b>	<b>12,9</b>	<b>185</b>	<b>118</b>	<b>8,8</b>
<b>стандартное отклонение</b>	<b>5</b>	<b>21</b>	<b>1,5</b>	<b>5</b>	<b>24</b>	<b>3,3</b>	<b>2</b>	<b>23</b>	<b>0,8</b>

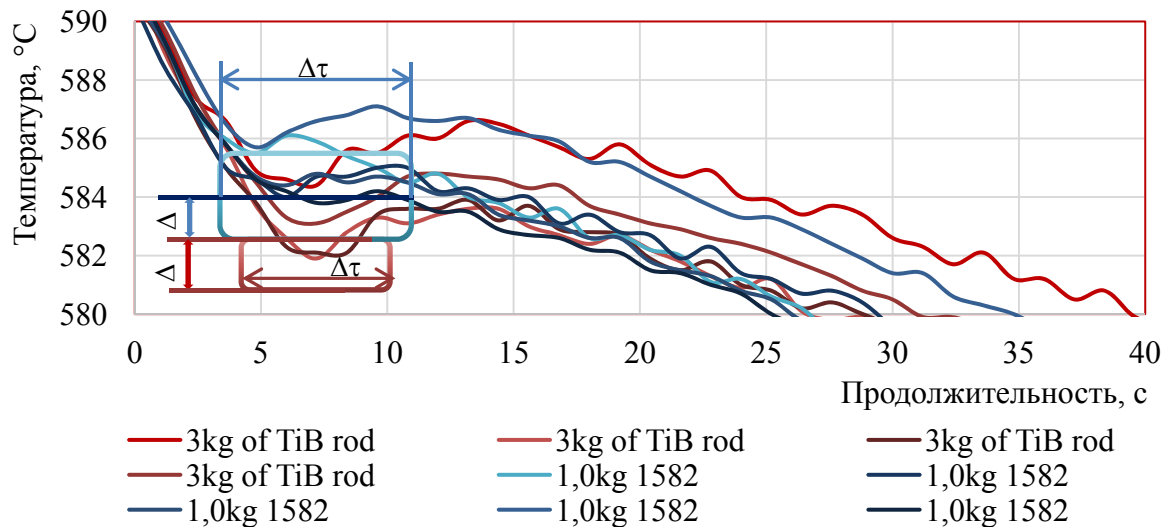


Рисунок 21 – Кривая ликвидуса для модифицированного сплава АК12

Таблица 5 – Параметры ликвидуса

Вид модификатора	Площадь ликвидуса (см. рис. 21)			
	Среднее минимальное значение температуры, °C	Среднее максимальное значение температуры, °C	$\Delta t$ , °C	$\Delta \tau$ , с
Пруток AlTi5B1	582,9	584,7	1,8	5,7
Гранулированный флюс	584,5	585,2	0,7	2,6



Рисунок 22 – Макроструктура проб ALCAN-TEST в долевом направлении после модифицирования AlTi5B1 (а) и гранулированным флюсом (б)

Таблица 6 – Параметры макроструктуры модифицированного сплава АК12

Параметры макроструктуры	Вид модификатора	
	Пруток AlTi5B1	Гранулированный флюс
Средний размер зерна, мм	1,30	0,71
Количество зерен, шт. на 1мм <sup>2</sup>	1	2

Опытно-промышленное освоение технологии модифицирования с использованием гранулированного флюса подтвердило результаты предварительных исследований проб о высокой его модифицирующей способности, обеспечивающей измельчение структуры дисков во всех сечениях (рис. 23).

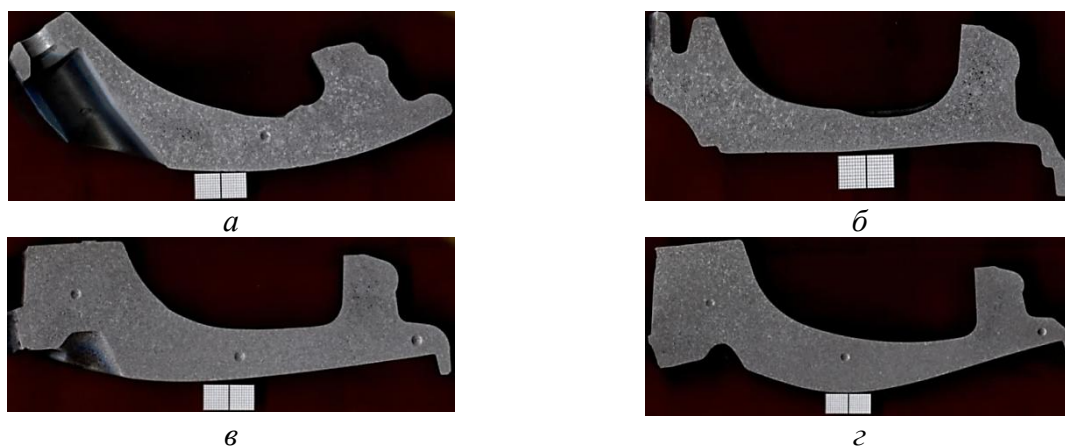


Рисунок 23 – Макроструктура колес, отлитых из сплава АК12.  
Технология модифицирования: а, б – серийная; в, з – с применением флюса.  
Размер зерна, мм: а – 1,1; б – 1,14; в – 0,34; з – 0,64

Анализ механических свойств двух моделей колес также подтвердил результаты ранее проведенных исследований на пробах (рис. 24).



Рисунок 24 – Временное сопротивление разрыву (а) и относительное удлинение (б) автомобильных колес моделей 17Либерти и 16Борелли, отлитых из сплава АК12:  
 □ – модифицирование лигатурой AlTi5B1; ■ – с применением гранулированного флюса

Кроме того, установлено, что гранулированный флюс обеспечивает рафинирование расплава. Индекс плотности сплава АК12 снижается с  $8,66 \pm 1,8$  до  $6,5 \pm 1,2$  %.

Таким образом, по результатам работы можно сделать следующие выводы. Установлено, что технология обработки силумина, приготовленного из алюминия марки А7, модификатором на основе ультрамелкодисперсного карбида кремния, приводит к изменению морфологии  $\beta$ -фазы.

Анализ структуры и уровня механических свойств автомобильных дисков подтвердил неравномерность распределения модификатора в расплаве. Разработана технология модифицирования силумина на основе алюминия А7 гранулированным флюсом, содержащим соли калия, обеспечивающая равномерную мелкодисперсную структуру по всему сечению отливок. Показано, что обработка расплава гранулированным флюсом позволяет более эффективно уменьшить размер зерна в сравнении с прутковой лигатурой AlTi5B1. Экономический эффект при этом составил 85,54 дол./1 т годного литья.

В заключении представлены основные выводы и результаты работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Предложен метод индекса плотности для экспресс-контроля содержания водорода в литейных алюминиевых сплавах. Определены контрольные границы значений индекса плотности, обеспечивающие получение качественных отливок колес методом литья под низким давлением из алюминиевых сплавов. При индексе плотности 8% пораженность оксидными пленками на макрошлифе составляет от 0,5 до 1,5%, содержание водорода в сплаве –  $0,2-0,25 \text{ см}^3/100\text{г}$ .

2. Обоснована применимость метода технологической пробы для контроля оксидных включений в литейных алюминиевых сплавах.

3. Определено, что при литье автомобильных дисков под низким давлением содержание марганца в силумине не должно превышать 0,20-0,25% при содержании железа 0,20-0,25%. Уровень механических свойств автомобильных дисков, изготовленных методом литья под низким давлением из опытного сплава, на 25% по пределу текучести условному, на 15% по временному сопротивлению на разрыв и на 40% по относительному удлинению выше уровня свойств дисков, полученных по серийной технологии. По результатам исследований подана заявка на изобретение «Литейный сплав на основе алюминия» № 2014123014 от 05.06.2014.

4. Установлено, что технология модифицирования силумина, полученного с использованием алюминия марки А7, таблетированным модификатором на основе ультрамелкодисперсного карбида кремния приводит к изменению морфологии  $\beta$ -фазы, что позволяет повысить относительное удлинение сплава на 50%, временное сопротивление разрыву – на 20%.

5. Разработана технология модифицирования силумина на основе алюминия А7 комплексным гранулированным флюсом на основе солей калия, совмещающая операции рафинирования (индекс плотности снижается в 1,3-1,5 раза) и модифицирования (размер макрозерна уменьшается до 0,7 мм), что позволяет сокращать время внепечной обработки расплава.

6. Разработанный сплав прошел промышленное освоение при литье колес под низким давлением на ООО «КиК», что позволило снизить затраты на их производство за счет использования низкосортных шихтовых материалов. Экономический эффект при этом составил 85,54 дол./1 т годного литья.

7. Полученные результаты исследований внедрены в учебный процесс студентов многоуровневой подготовки по направлению 150400 «Металлургия», профиль 150400.62.04 «Литейное производство черных и цветных металлов» и аспирантов по специальности 05.16.04 – Литейное производство.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ**

1. Богданова, Т. А. Перспективный метод экспресс-контроля Al-сплавов / Т. А. Богданова, Н. Н. Довженко, Т. Р. Гильманшина [и др.] // *Металлургия машиностроения*. – 2014. – № 2. – С. 12-14 (**издание, рекомендуемое ВАК**).

2. Богданова, Т. А. Влияние режимов термической обработки и нанесения декоративно-защитного покрытия на механические свойства и структуру дисков автомобильных колес из сплава АК7пч / Т.А. Богданова, Н.Н. Довженко, Г.А. Меркулова [и др.] // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2014. – № 3 (47). – С. 40-43 (**издание, рекомендуемое ВАК**).

3. Богданова, Т. А. Современные технологии изготовления дисков автомобильных колес / Т. А. Богданова, Н. Н. Довженко, Т. Р. Гильманшина

[и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 86  
// Информация с сайта <http://www.science-education.ru/119-15005>. (издание, рекомендуемое ВАК).

4. Индекс плотности, как показатель технологии приготовления и литья алюминиевых сплавов / Т. А. Богданова, А. В. Чеглаков, Е. И. Куклин [и др.] / Цветные металлы – 2012 : сб. докладов IV международной конф., VI конф. «Металлургия цветных и редких металлов», VIII симпозиума «Золото Сибири». – Красноярск: ООО «Версо», 2012. – С. 715-718.

5. О возможности применения ультрадисперсных модификаторов в производстве отливок из силуминов / Т. А. Богданова, А. В. Чеглаков, А. В. Ермолаев [и др.] // Цветные металлы – 2013 : сб. докладов XXXI (ICSОВА) XIX международ. конф. «Алюминий Сибири». – Красноярск : Версо, 2013. – С. 985-988.

6. Антонов, М. М. Качество отливок из сплава АК12 по индексу плотности и коэффициенту пораженности окисными пленками / М. М. Антонов, Т. А. Богданова, Т. А. Орелкина, А. В. Чеглаков // Молодежь и наука : сб. мат-лов IX Всероссийской науч.-техн. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 385-летию со дня основания г. Красноярск [Электронный ресурс] / отв. ред. О. А. Краев. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т., 2013. – Режим доступа <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/thesis/s007/s007-002.pdf>.

7. Богданова, Т. А. Определение оптимального количества лигатуры AlTi5B1 для модифицирования силуминов / Т. А. Богданова, А. В. Чеглаков, В. П. Белимов // Молодежь и наука: сб. мат-лов IX Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 385-летию со дня основания г. Красноярск [Электронный ресурс] / отв. ред. О.А. Краев. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т., 2013. – Режим доступа <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/thesis/s007/s007-004.pdf>.

8. Богданова, Т. А. Исследование свойств сплава АК12 при различном соотношении Fe:Mn / Т. А. Богданова, А. А. Косович, Е. Г. Партыко // Молодежь и наука : сб. мат-лов X Юбилейной Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 80-летию образования Красноярского края, [Электронный ресурс] / отв. ред. О. А. Краев. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т., 2014. – Режим доступа [http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2014/pdf/d03/s08/s08\\_004.pdf](http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2014/pdf/d03/s08/s08_004.pdf).

9. Косович, А. А. Компьютерное моделирование процессов формирования легкосплавных дисков по технологии литья под низким давлением / А. А. Косович, Е. Г. Партыко, Т. А. Богданова [и др.] // Молодежь и наука : сб. мат-лов X Юбилейной Всероссийской научно-технической конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 80-летию образования Красноярского края, [Электронный ресурс] / отв. ред. О. А. Краев. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т., 2014. – Режим доступа [http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2014/pdf/d03/s08/s08\\_004.pdf](http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2014/pdf/d03/s08/s08_004.pdf).

10. Богданова, Т. А. Поиск оптимального модифицирования силумина марки АК12пч / Т. А. Богданова, А. В. Чеглаков, Г. А. Меркулова, М. В. Локтева // Молодежь и наука: сб. мат-лов X Юбилейной Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 80-летию образования Красноярского края, [Электронный ресурс] / отв. ред. О. А. Краев. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т., 2014. – Режим доступа [http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2014/pdf/d03/s07/s07\\_004.pdf](http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2014/pdf/d03/s07/s07_004.pdf).

11. Богданова, Т. А. Качество отливок из сплава АК12 по индексу плотности и коэффициенту пораженности окисными пленами / Т. А. Богданова, М. М. Антонов // XIII международная науч.-техн. уральская школа-семинар металлургов-молодых ученых. – Екатеринбург, 2012. – С. 406-408.

12. Антонов М. М. Методы оценки загрязненности расплава АК12 неметаллическими включениями / М. М. Антонов, Т. А. Богданова, А. В. Чеглаков // XIV Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлургов – молодых ученых, Екатеринбург, 2013. – Екатеринбург, 2013. – С. 196-198.

13. Богданова, Т. А. Возможность использования комплексного флюса Coveral MTS 1582 производства Fosco для модифицирования силумина / Т.А. Богданова, Н.Н. Довженко, Г.А. Меркулова [и др.]: Цветные металлы и минералы 2014: сб. тезисов докладов 6 международного конгресса «Цветные металлы и минералы 2014». – Красноярск, 2014. – С. 410-411.

14. Богданова, Т. А. Влияние модифицирования на структуру и свойства силумина марки АК12 / Т. А. Богданова, Г. А. Меркулова, Ф. Р. Латыпов, Т. Р. Гильманшина // Современные проблемы проектирования и эксплуатации авиационных двигателей: всероссийская научно-техническая конференция: сб. тр. / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: УГАТУ, 2014. – С. 26-29.

Подписано в печать 13.01.2015. Печать плоская. Формат 60x84/16  
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1.0. Тираж 100 экз. Заказ 2055

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](mailto:print_sfu@mail.ru); <http://lib.sfu-kras.ru>