

На правах рукописи



АБАЛЫМОВ Виталий Русланович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА
ЛИТЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДИСКОВ КОЛЕС ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
КАЧЕСТВА И КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ПРОДУКЦИИ**

Специальность 05.16.04 – Литейное производство

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Красноярск – 2018

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

Научный руководитель: доктор химических наук, **Жереб Владимир Павлович**

Официальные оппоненты:

Бродова Ирина Григорьевна, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики металлов» Уральского отделения Российской академии наук, лаборатория цветных металлов, главный научный сотрудник

Батышев Константин Александрович, доктор технических наук, доцент, Государственный научный центр Российской Федерации Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения», отдел литейных процессов, главный научный сотрудник

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет» (г. Самара)

Защита состоится 16.05.2018 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.10 на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660025, г. Красноярск, пр. Красноярский рабочий, д. 95, ауд. 212.

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

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Гильманшина Татьяна Ренатовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ¹

Актуальность темы исследования. В настоящее время наиболее перспективным рынком для производителей литых колёс являются автозаводы, это связано с большими объёмами и стабильностью заказов. В то же время крупные автопроизводители с мировым именем предъявляют повышенные требования к прочностным характеристикам легкосплавных дисков, таким характеристикам соответствуют колеса, произведённые из термоупрочняемых алюминиевых сплавов, в частности из сплава АК7пч. Однако литье колёс из сплава АК7пч сопровождается некоторыми технологическими трудностями.

Жидкотекучесть доэвтектических силуминов ниже эвтектических, в связи с этим, при литье изделий сложных форм необходимо перегревать расплав и некоторые зоны пресс-формы, что в конечном итоге приводит к огрублению структуры и повышению пористости отливок. Пористость и дефекты структуры оказывают негативное влияние на герметичность, снижают декоративные и прочностные свойства колес.

При литье колёс из сплава АК7пч повышения формозаполняемости достигают путём проектирования литейного клина, что в свою очередь приводит к увеличению металлоемкости отливок, однако такой подход не всегда достаточен, особенно при литье сложных по конструкции и больших по размеру изделий. Также это порождает другую проблему – растёт объём образующейся стружки.

При производстве отливок из эвтектического силумина АК12 литейные проблемы практически отсутствуют, однако сплав является термически неупрочняемым и изготовленные из эвтектического силумина диски автомобильных колес не удовлетворяют требованиям заказчиков по прочности.

В связи с вышеизложенными проблемами и повышенными требованиями к механическим и литейным свойствам сплавов, для дисков автомобильных колес, необходимо разрабатывать новые и совершенствовать существующие составы и технологии изготовления силуминов с высокими литейными и прочностными характеристиками, как из первичных шихтовых материалов, так и с вовлечением отходов производства, что подтверждает актуальность представленной работы.

Данная работа была проведена в соответствии с планами опытных работ ООО «ЛМЗ «СКАД». Выполненное исследование поддержано грантом программы «УМНИК» от «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (грант № 6581ГУ/2015).

Цель диссертационной работы состояла в разработке комплекса новых технологических решений, обеспечивающих получение качественных автомобильных дисков колёс, удовлетворяющих требованиям предъявляемым к ним стандартов, из нового сплава, приготовленного, в том числе, с вовлечением переплава оборотных отходов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи:**

- изучить возможность использования больших объёмов низкосортной

¹ Диссертация выполнена при научной консультации канд. техн. наук, рук. науч.-ан. лаб. ИТЦ РУСАЛ Т.Н. Ковалёвой (Дроздовой)

шихты, в том числе стружки, для развития технологии рециклинга при производстве литых колёс из эвтектического силумина;

- исследовать влияние содержания магния на структуру и свойства эвтектического силумина, а также обосновать состав нового термически упрочняемого сплава;

- изучить и провести сравнение, в том числе с использованием программного комплекса ProCast[®], литейные свойства нового термически упрочняемого эвтектического силумина и стандартного сплава АК7пч;

- с помощью рентгеноструктурного анализа и просвечивающей электронной микроскопии исследовать процесс искусственного старения нового эвтектического силумина;

- методами планирования эксперимента оптимизировать содержание магния и параметры термической обработки отливок из нового сплава с целью достижения сочетания прочностных и пластических свойств на максимально высоком уровне;

- провести опытно-промышленное опробование технологии производства литых автомобильных дисков из нового эвтектического термически упрочняемого силумина, приготовленного с использованием оборотных отходов производства колёс.

Научная новизна полученных результатов:

1. Изучены основные литейные свойства нового силумина и установлены жидкотекучесть, температуры ликвидуса, равновесного и неравновесного солидуса, а так же интервал кристаллизации, позволяющие определять параметры литья и термической обработки отливок.

2. Исследованы процессы происходящие при термической обработке отливок из нового сплава, и доказана возможность его упрочнения при искусственном старении за счёт распада пересыщенного α -твердого раствора, с уменьшением параметра решетки и выделения метастабильных β'' и β' фаз.

3. Установлены зависимости механических свойств от содержания магния и температуры старения при термической обработке отливок, изготовленных методом литья под низким давлением, из нового эвтектического термически упрочняемого силумина. Определено граничное значение содержания магния в сплаве, обеспечивающее оптимальное сочетание механических свойств.

4. Доказана возможность вовлечения больших объёмов низкосортной шихты, преимущественно из стружки, при приготовлении эвтектического силумина, за счёт применения разработанной технологической схемы подготовки и переплава стружки, позволяющей получать сплав с индексом плотности до 1,9%, пригодный для производства литых дисков автомобильных колёс.

Практическая значимость работы:

1. Разработан новый эвтектический термически упрочняемый силумин, для изготовления автомобильных дисков методом литья под низким давлением, соответствующих ГОСТ Р 50511-93. По результатам исследований получен патент №2616734 «Литейный высококремнистый сплав на основе алюминия».

2. С использованием программного комплекса ProCAST[®] определены рациональные технологические параметры литья дисков колёс из нового силумина.

3. Разработана технологическая схема, позволившая повысить качество

сплава, получаемого из переплава оборотных отходов, основным этапом в которой является рафинирующая обработка, обеспечивающая снижение на порядок объёма вредных включений и уменьшающая в разы индекс плотности.

4. С применением планирования эксперимента выбраны содержание магния и параметры термической обработки колёс, отлитых из нового сплава, позволяющие получать наибольшие прочностные свойства, сохраняя пластические свойства на достаточно высоком уровне и при этом уменьшая время затрачиваемое на термообработку.

5. Получена партия дисков, удовлетворяющих требованиям, предъявляемым к литым автомобильным дискам из термически упрочняемого сплава. Расчетный экономический эффект при производстве 360.000 колёс из нового сплава составит 21.946.336,32 рублей.

6. Результаты исследований внедрены в производство на ООО «ЛМЗ «СКАД» и учебный процесс в ИЦМиМ СФУ при подготовке магистров по направлению 22.04.02 «Металлургия» магистерской программе 22.04.02.07 «Теория и технология литейного производства цветных металлов и сплавов» и аспирантов по специальности 05.16.04 «Литейное производство».

Методология и методы исследования. При выполнении диссертационного исследования использованы методы: определения технологичности сплавов, исследований структуры и механических свойств силуминов и качества автомобильных дисков.

На защиту выносятся:

1. Результаты исследования влияния содержания магния на структуру, литейные и механические свойства нового, термически упрочняемого эвтектического силумина.

2. Экспериментально подтверждённые процессы, происходящие при термической обработке нового, легированного магнием, эвтектического силумина, позволяющие управлять механическими свойствами сплава.

3. Технологические решения изготовления термически упрочняемых дисков автомобильных колёс из эвтектического силумина, удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к литым автомобильным дискам.

4. Оптимизированная, с использованием методов математического планирования, технология термической обработки отливок из эвтектического силумина, позволяющая сократить время термообработки при сохранении свойств изделий.

5. Технологическая схема производства методом литья под низким давлением колёс из нового, термически упрочняемого эвтектического силумина с вовлечением до 85% низкосортной шихты в виде МГЧ переплава оборотных отходов производства.

Личный вклад автора заключается в планировании экспериментов, выборе методики, их выполнении в лабораторных условиях ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и проведении опытно-промышленных испытаний в производственных условиях ООО «ЛМЗ «СКАД» (г. Дивногорск), 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.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на X, XI и XII Всероссийских научно-технических конференциях «Молодежь и наука» (Красноярск, 2014-2016 гг.); VI, VII, IX международном конгрессе и выставке «Цветные металлы» (Красноярск, 2014-2015, 2017 г.); XIV международной научно-технической уральской школе-семинаре металлургов-молодых ученых (Екатеринбург, 2013 г.); на IV Всероссийской молодежной школе-конференции «Современные проблемы металловедения» (Севастополь, 2016 г.).

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 18 печатных трудах, из них 3 из перечня журналов, рекомендуемых ВАК, и в 1 патенте РФ.

Соответствие диссертации паспорту специальности.

Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне 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 реализаций литейных технологий;
- исследование влияния обычных, наномодифицирующих, электрических, магнитных, механических и других видов обработки на свойства расплавов, отливок и литейных форм.
- исследование проблем качества литья;
- исследование утилизации отходов литейного производства для использования в литейных цехах;
- исследование процессов формирования свойств литейных сплавов и формовочных смесей.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка используемых источников, содержащего 117 источников, и 5 приложений. Основной материал изложен на 156 страницах, включая 26 таблиц и 49 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** выполнен обзор литературных данных по анализу структуры и свойств сплавов, используемых для изготовления автомобильных дисков; способам рафинирования и модифицирования расплава; влиянию легирующих элементов и режимов термической обработки.

Показано, что прочностные свойства силуминов повышают термической обработкой, которую не применяют для эвтектических сплавов. В связи с этим, необходимо вести поиск и разработку составов и технологий изготовления новых высокотехнологичных силуминов с высокими механическими и литейными

свойствами.

На основании проведенного обзора литературы поставлены цель и задачи диссертационного исследования.

Во *второй главе* приведены материалы, методы и оборудование, использованные в исследовании.

Объектами исследования были выбраны сплавы систем Al-Si и Al-Si-Mg. В качестве шихтовых материалов применяли: алюминий первичный А7, А8, А85 в виде мелкогабаритной чушки (МГЧ); кремний кристаллический; сплавы AlSi7Mg0,3 и AlSi11; магний МГ90; титан губчатый ТГ90; отходы производства. Для модифицирования силуминов использовали лигатуру AlTi5B1 и AlSr10, расход которой зависел от состава сплава. Модифицирование совмещали с рафинированием расплава. Приготовление исследуемых сплавов осуществляли в печах ИАТ-2,5. Нагрев производили до температур 780-800 °С.

Для решения поставленных задач были использованы следующие методы: спектрального анализа на приборе QSN-750 OBLF; индекса плотности, прибор 3VT и взвешивающее устройство МК 2200; метод PoDFA, прибор Prefil-Footer; дифференциальной сканирующей калориметрии с использованием прибора Netzsch 449C; спиральной пробы; рентгеноструктурного анализа на рентгеновском дифрактометре XRD – 7000S Shimadzu. Исследование структуры сплавов проводили с помощью световых микроскопов SZ61 Olympus, Axio Observer.A1m Carl Zeiss, электронного растрового микроскопа EVO 50 HVP CarlZeiss с энергодисперсионным анализатором IncaENERGY 350 Oxford instrument и просвечивающего электронного микроскопа HT – 7700 Hitachi. Измерение механических свойств дисков автомобильных колес осуществляли на универсальной испытательной машине Test Winner, твердомере 2109ТБ, микротвердомере DM8, AFFRI di Affri R.

Оценку качества готовой продукции, автомобильных дисков колес, проводили на стендах Leonardo (Bending Machine 10 KНm FR12) и Borli (МК 634 и МК 715) по ГОСТ Р 50511-93.

В *третьей главе* рассмотрены перспективы использования рециклинга в производстве литых колёс из эвтектического силумина.

При производстве автомобильных дисков объём технологических отходов в виде стружки достаточно велик, это связано с тем, что при проточке, на этапе механической обработки удаляется до 30% металла от общей массы отливки.

В стружке, образующейся при производстве автомобильных колёс, скапливается большое количество СОЖ, содержащей минеральное масло, объёмная доля которого в СОЖ не превышает 2,7%. Потому для повышения качества шихты из переплава стружки проводят предварительную подготовку, заключающуюся в брикетировании (для увеличения насыпной плотности), и в высокотемпературной обработке (для удаления влаги и органического засора).

Для определения влияния шихтовых материалов и рафинирующей обработки на чистоту металла, было приготовлено две плавки:

1 - из первичных шихтовых материалов: МГЧ А8 (82,8%); колеса, брак литья (7,2%); кремний (9,7%); МГЧ Мг90 (0,3%); губчатый Ti (0,08%);

2 - из отходов производства: влажная стружка (77,5%); колеса, брак литья (7,2%); МГЧ крашенных колёс (6,2%); колеса, брак мех. обработки. (4,8%); жирный шлак, облои, съёмы (1,9%); кремний (2,4%).

Далее из каждой плавки было отлито по 2 партии МГЧ: №1 – плавка 1 до рафинирования, №2 – плавка 1 после рафинирования, №3 – плавка 2 до рафинирования, №4 – плавка 2 после рафинирования.

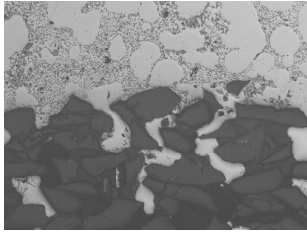


Рисунок 1 – Фото PoDFA, x50

С использованием метода PoDFA проведено определение содержания включений в этих сплавах (рисунок 1). Результаты контроля чистоты металла представлены в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, расплав, приготовленный из отходов производства, прошедший рафинирующую обработку, не сильно уступает по чистоте сплаву, приготовленному из первичных шихтовых материалов. Наличие большего количества включений диборида титана обусловлено тем, что во время рафинирующей обработки производится модифицирование сплава лигатурой AlTi5B1. Соответственно в расплаве, приготовленном из отходов производства, частицы TiB_2 имеются до рафинирования, а после обработки их количество закономерно увеличивается.

Таблица 1 – Результаты контроля чистоты металла по методу PoDFA, мм²/кг

Типы включений	№ партии МГЧ / Рафинирование			
	1 / до	2 / после	3 / до	4 / после
TiB_2	0	0,0835	0,3405	0,4256
$Al_4C_3 \leq 3$ мкм	0	0,0002	0,0296	0,0382
$Al_4C_3 > 3$ мкм	0,0003	0,0002	0,0211	0,0027
Шпинель $MgAl_2O_4$	0,1347	0,0084	0,0175	0,0035
Шлак и др.	0,1020	0,0264	0,0640	0,0051

Наличие большого количества шпинели $MgAl_2O_4$ в МГЧ №1-2 вероятнее всего обусловлено вовлечением в качестве шихты МГЧ Мг90.В сплаве, приготовленном из отходов производства литых автомобильных дисков колёс, находится большее количество карбидов, что связано с использованием в шихте жирного шлака.

Для повышения качества сплава, получаемого из переплава оборотных отходов, была разработана специальная технологическая схема, основным этапом в которой является рафинирующая обработка, включающая в себя обработку флюсами и аргоном.

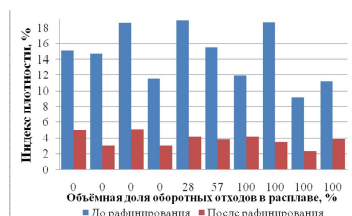


Рисунок 2 – Индекс плотности расплава до и после рафинирования

Для определения качества очистки расплавов от водорода и неметаллических включений, приготовленных как из первичных шихтовых материалов, так и с вовлечением оборотных отходов, отбирались образцы на индекс плотности до и после рафинирующей обработки. Результаты показаны на рисунке 2.

Для определения влияния вовлечения различного объёма МГЧ из оборотных отходов (МГЧо.о.), на механические свойства и устойчивость к разрушению готовой продукции в течение полугода в промышленных условиях готовили плавки серийного сплава АК12, с различным вовлечением МГЧо.о., и производили литьё колёс различных моделей, по стандартным параметрам. Стоит от-

метить, что химический состав всех опытных плавок удовлетворял требованиям ГОСТ 1583-93.

Для исследований были отобраны четыре партии колёс, изготовленных с использованием различного объёма МГЧ изготовленного из переплава стружки: 1) 22%; 2) 75%; 3) 82%; 4) 99,8%. На рисунке 3 представлена макроструктура отливки, изготовленной с использованием 99,8% МГЧ из переплава стружки, а так же индекс плотности исследуемых расплавов после рафинирования и усреднённые плотности металла со всех зон отливок.

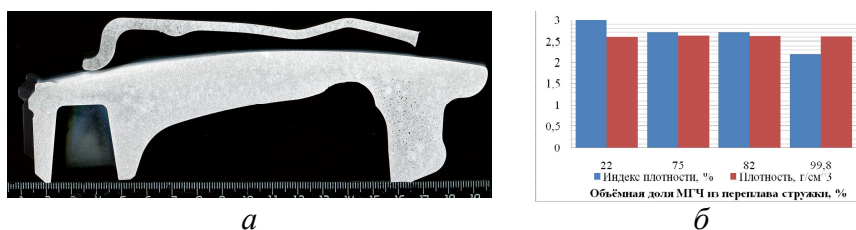


Рисунок 3 – Влияние добавки МГЧ о.о. в расплаве на структуру и плотность металла: *а* – макроструктура отливки (99.8% МГЧ о.о.); *б* – индекс плотности и плотность исследуемых расплавов и отливок

В структуре отливок не обнаружено грубых литейных дефектов и неметаллических включений, однако по некоторым зонам наблюдается небольшое скопление пор.

Согласно ГОСТ Р 50511-93, механические свойства нетермообрабатываемого сплава на образцах, вырезанных из колёс, должны составлять: $\sigma_B = 160$ МПа, $\sigma_{0,2} = 80$ МПа, $\delta = 5\%$, твердость = 45-60 НВ. Механические свойства четырех исследуемых партий приведены на рисунке 4.

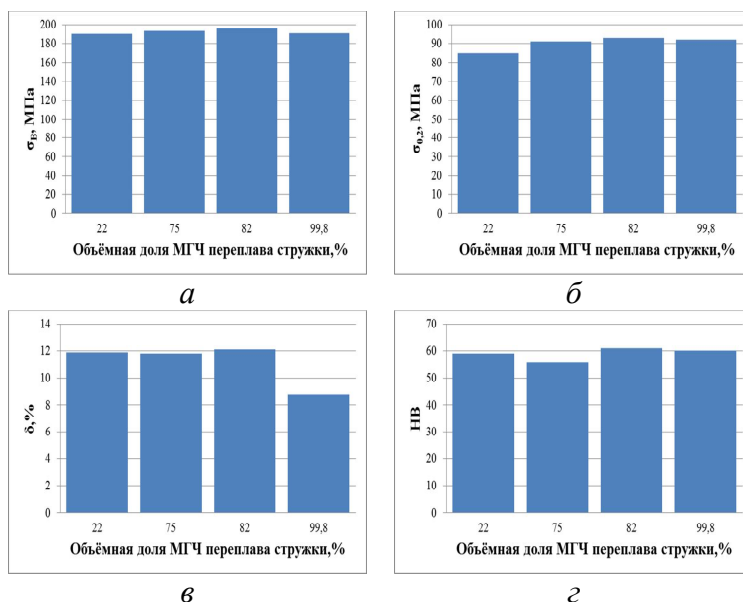


Рисунок 4 – Механические свойства колёс изготовленных с различной объёмной долей вовлечения МГЧ из переплава стружки в шихту: *а* – предел прочности; *б* – предел текучести; *в* – относительное удлинение; *г* – твердость

Анализ механических свойств исследуемых сплавов показал, что даже при вовлечении максимального количества стружки, свойства находятся на высоком уровне и удовлетворяют требованию ГОСТ Р 50511-93. Однако при вовлечении

99% стружки значительно снизилась пластичность, в связи с этим был разработан технический регламент ограничивающий вовлечение переплава стружки на уровне 85%. Следует так же отметить, что все исследуемые колеса прошли стендовые испытания с положительным результатом.

В *четвертой главе* проведены исследования по разработке и получению термически упрочняемого эвтектического силумина обладающего высокими литейными и прочностными свойствами на основе имеющегося высокотехнологичного сплава АК12.

На первом этапе изучено влияние магния на структуру и механические свойства эвтектического силумина в литом состоянии. Для этого были отлиты четыре опытные партии колес с различным содержанием Mg: 505 – 0,13%; 506 – 0,18%; 507 – 0,25%; 508 – 0,33%.

Основными структурными составляющими силуминов являются дисперсная эвтектика ($\alpha(\text{Al})+\text{Si}$) и дендриты $\alpha(\text{Al})$ -алюминиевого твердого раствора. Известно, что в литом состоянии из-за прохождения неравновесной кристаллизации, магний в силуминах образует фазу Mg_2Si , входящую в тройную эвтектику, которая выделяется в форме иероглифов, в опытных сплавах размер данной фазы, с повышением концентрации Mg в сплаве, увеличивался с 14 мкм до 73 мкм.

Известно, что магний является эффективным твердорастворным упрочнителем, и с ростом концентрации магния в алюминиевом твердом растворе увеличивается предел текучести и твердость сплавов.

В работе исследовано влияния магния на данные характеристики опытных силуминов. Выявлено, что увеличение содержания магния в опытном сплаве повышает условный предел текучести и твердость, при этом значительно снижается пластичность.

Для косвенного определения технологичности сплавов был проведен термический анализ, с использованием дифференцирующей сканирующей калориметрии, по результатам которого были определены температуры ликвидуса, равновесного и неравновесного солидуса, а так же интервал кристаллизации в равновесных и неравновесных условиях исследуемых сплавов в зависимости от содержания магния (рисунок 5).

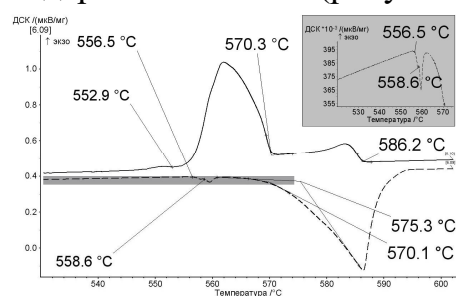


Рисунок 5 – Термограмма опытного сплава (сплошная линия – охлаждение; пунктирная линия – нагрев)

Известно, что в безмедистых силуминах, легированных магнием, в неравновесных условиях кристаллизации образуется тройная эвтектика ($\alpha(\text{Al})+\text{Si}+\text{Mg}_2\text{Si}$). Пик, показывающий наличие данной эвтектики, был обнаружен, на термограммах опытных сплавов, при температуре 557 °C. Тепловой эффект, связанный с неравновесной тройной эвтектикой на термограммах проявляется при содержании магния $\geq 0,18\%$.

Было проведено сравнение литейных свойств опытных и стандартных сплавов по измерениям жидкотекучести, средние значения результатов измерений приведены на рисунок 6.

Опытные сплавы имеют повышенные значения жидкотекучести по сравнению со стандартным термоупрочняемым сплавом. Жидкотекучесть опытных

сплавов на 23% выше сплава АК7пч, что связано с меньшим интервалом кристаллизации. По сравнению со сплавом АК12 жидкотекучесть опытных сплавов находится примерно на одном уровне.

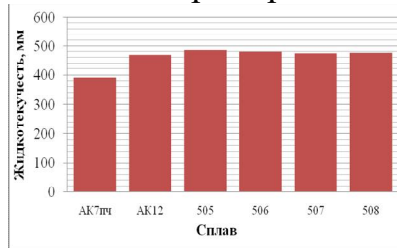


Рисунок 6 – Жидкотекучесть сплавов

С использованием полученных данных было проведено компьютерное моделирование, в системе ProCAST, процесса изготовления методом литья под низким давлением диска автомобильного колеса из опытного сплава с содержанием $Mg=0,25\%$ и стандартного АК7пч, а так же проведена оценка возможности получения бездефектной отливки при существующей технологии литья на ООО «ЛМЗ «СКАД».

Одним из основных недостатков силумина АК7пч, связанного с его широким интервалом кристаллизации и относительно невысокими литейными свойствами, является образование в большом количестве линейной и объёмной усадки, особенно в крупных отливках.

С помощью программного обеспечения системы ProCAST было проведено моделирование формирования усадочных дефектов в отливках, отлитых из исследуемых сплавов, результаты представлены на рисунке 7.

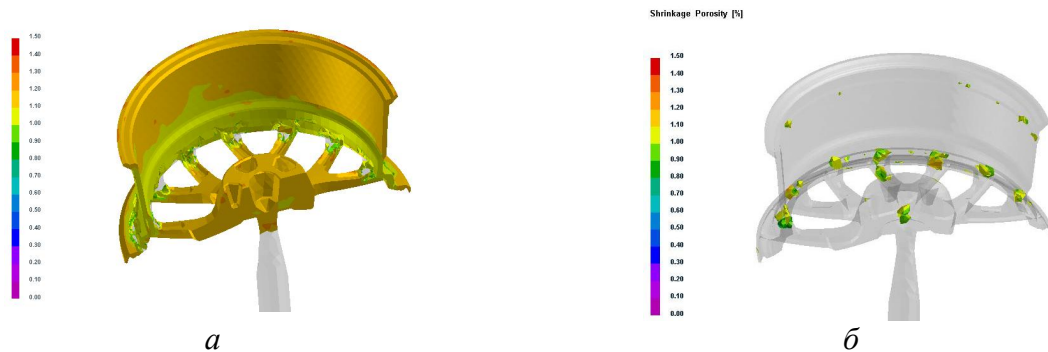


Рисунок 7 – Зоны образования пористости в колесах, отлитых из сплавов:
а – АК7пч; б – 507 (опытный сплав с содержанием 0,27% Mg)

В колесе, отлитом из стандартного доэвтектического силумина, пористость наблюдается по всему сечению, во всех зонах. Такая пористость негативно скажется на механических свойствах металла, что в совокупности с наличием большого количества усадочных пор на поверхности, может привести к разрушению колеса при эксплуатации. Так же пористость на поверхности будет снижать декоративные свойства изделия.

В отливке из опытного сплава, присутствует сосредоточенная пористость в зонах хампа, теплового узла и ступицы. Данная пористость является незначительной и некритичной для готового изделия.

Легирование силуминов магнием обеспечивает упрочнение при термической обработке, поэтому было принято решение проанализировать влияние термообработки на структуру и свойства опытных сплавов.

Изменения в структуре опытного сплава после термической обработки, анализировались с помощью рентгеноструктурного метода, который позволил определить параметры кристаллической решётки алюминиевого твердого рас-

твор в зависимости от состояния сплава. При закалке происходит растворение неравновесной фазы Mg_2Si и Si и, как результат совместных процессов, увеличивается параметр кристаллической решетки алюминиевого твердого раствора. После полного искусственного старения, из-за распада твердого раствора с выделением метастабильных фаз β'' и β' , параметр решетки α - твердого раствора закономерно уменьшается. Известно, что в результате полного завершения процессов, протекающих при старении, система стремится к восстановлению фазового равновесия, нарушенного операцией закалки, в связи с чем, параметр решётки твердого раствора после старения опытных сплавов близок к параметру решётки алюминия, равного 4,0494 Å. Параметр решётки и механические свойства опытного сплава в зависимости от состояния представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметр решетки и механические свойства опытного сплава

Состояние	a, Å	Механические свойства			
		σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	HV, кгс/мм ²
Литое	4,0502	193	107	4,3	83
(Т4)	4,0514	210	90	12,1	73
(Т6)	4,0493	264	173	5,5	113

При исследовании микроструктуры опытных сплавов после старения, с помощью просвечивающего электронного микроскопа, были выявлены в твердом растворе ориентированные выделения метастабильных фаз: β'' -фазы игольчатой формы и β' -фазы реечной формы (рисунок 8).

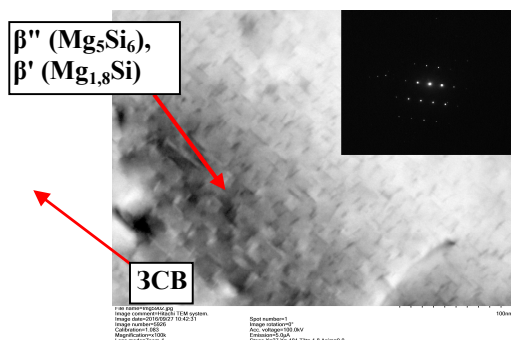


Рисунок 8 – Микроструктура опытного сплава в закалённом и состаренном состоянии

Высокая плотность выделений метастабильных фаз обеспечивает после старения дисперсионное твердение и максимальную прочность опытных эвтектических силуминов, легированных магнием.

Полученные зависимости механических свойств от содержания магния в опытных силуминах после упрочняющей термической обработки сравнивали со стандартом ASTM-B557-10, графики представлены на

рисунке 9.

В связи с тем, что по ASTM-B557-10, требования по уровню механических свойств предъявляются только к зоне внешней бортовой закраины, то экспериментально показано, что требованиям стандарта удовлетворяют колёса с содержанием магния 0,18-0,25%.

Низкие показатели механических свойств в зонах спиц и ступицы обусловлены наличием большого количества пор, которые образовались в связи с использованием технологии литья применяемой для сплава АК7пч, предусматривающей перегрев данных зон. Выбор оптимальной технологии литья колёс именно для этого сплава позволит избавиться от литейных дефектов в виде пористости, что повысит механические свойства отливок.

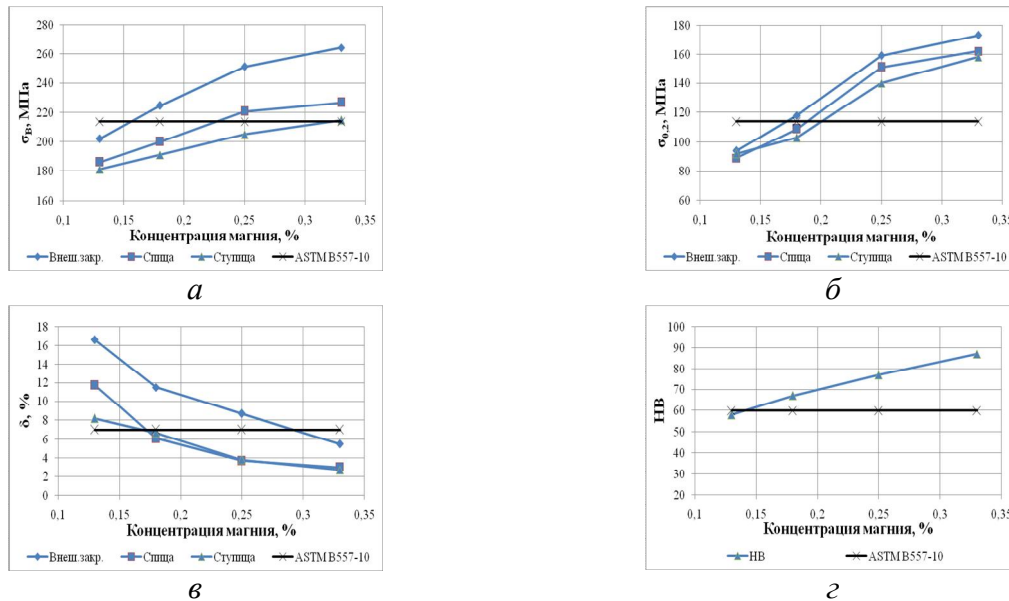


Рисунок 9 – Зависимость механических свойств от концентрации магния в опытных термообработанных сплавах: *а* – временное сопротивление разрыву; *б* – предел текучести; *в* – относительное удлинение; *г* – твердость

Для определения эксплуатационных характеристик опытные колеса были испытаны на изгиб с вращением и на удар под углом 13° , по ГОСТ Р 50511-93. Образцы выдержали стандартные испытания на изгиб с вращением, далее испытания проводили до появления трещины. При испытании на удар опытные колеса показывали положительный результат при нагрузке 750 кг, и испытание продолжали с увеличением нагрузки до 950 кг при максимально 4 ударах или до появления трещины.

Анализ полученных данных показал, что опытный эвтектический силумин, отлитый по параметрам, используемым при производстве колёс из сплава АК7пч, имеет высокие прочностные и эксплуатационные свойства, при этом наилучшим сочетанием свойств обладает сплав с содержанием 0,18-0,25% магния.

По результатам проведённых исследований литейных и механических свойств опытных силуминов, было принято решение уточнить содержание магния и параметры упрочняющей термической обработки отливок, для получения максимальной прочности, изготовленных из нового сплава с применением параметров литья используемых при производстве колёс из эвтектического силумина.

На первом этапе была построена матрица планирования полного факторного эксперимента (ПФЭ) 2^3 . Были определены факторы, влияющие на временное сопротивление разрыву, предел текучести и относительное удлинение. В качестве основных приняты следующие контролируемые и управляемые факторы: содержание Mg (по результатам предыдущих опытов 0,18; 0,25%), общее время на термическую обработку (461; 593 мин) и температура старения (160; 200 °C). Для реализации данных экспериментов были отлиты две опытные партии колёс.

Отливка сложной формы имеет отличающиеся условия кристаллизации по сечению, структура в каждой отдельной зоне отличается от других зон, что определяет анизотропию физико-механических свойств. Поэтому при проведе-

нии опыта использовали образцы только из зоны внешняя бортовая закраина, в связи с тем, что она меньше всего подвержена влиянию процессов кристаллизации.

На основе полученных данных с помощью функции желательности и метода крутого восхождения было рассчитано оптимальное содержание магния и определен режим термической обработки с целью получения требуемых значений прочности и пластичности дисков колес. Рассчитанные условия дополнительного опыта: содержание Mg – 0,303%; общее время термообработки – 509 мин; температура старения 192 °С. Для реализации опыта была отлита партия колёс по технологии, используемой при производстве отливок из эвтектического силумина, с содержанием магния 0,299%. На образцах, изготовленных из трех зон колеса, определялись механические свойства (таблица 3).

Полученная опытная партия колес из нового эвтектического силумина удовлетворяет требованиям по механическим свойствам, предъявляемым как отечественными, так и зарубежными стандартами. При этом сокращение времени, затрачиваемого на термообработку колес, составляет около 23%.

Таблица 3 – Результаты дополнительного эксперимента

Зона	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Спица	271	198	5,4
Ступица	283	219	7,3
Внешняя закраина	291	212	8,5

Проведенные исследования показали возможность применения термической обработки нового сплава для получения требуемого уровня механических свойств колес. В ходе исследований установлены зависимости уровня механических свойств от содержания магния в сплаве и различных режимов старения при термической обработке отливок (рисунок 10).

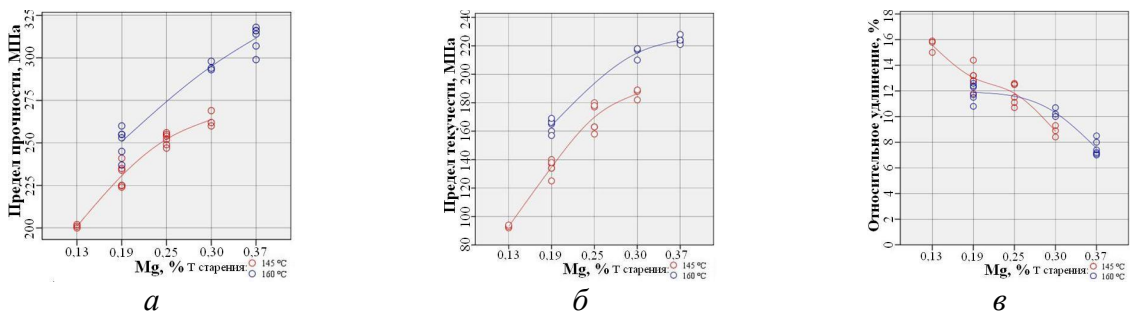


Рисунок 10 – Зависимость уровня механических свойств от содержания магния и температуры старения: а – предел прочности, б – предел текучести, в – относительное удлинение

Показано, что с увеличением содержания магния в исследуемом интервале прочностные свойства дисков автомобильных колес возрастают, пластические снижаются. С повышением температуры старения происходит рост прочностных свойств. Полученные зависимости позволяют сократить время при выборе параметров производства колёс для нового заказчика.

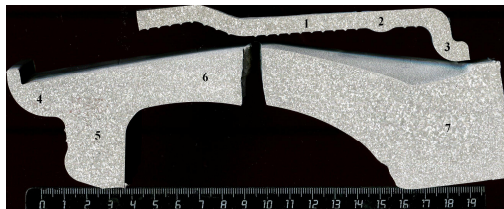
В **пятой главе** описана технология производства автомобильных дисков, методом литья под низким давлением, из эвтектического термически упрочняемого силумина, приготовленного из оборотных отходов производства колёс.

При приготовлении расплава была использована МГЧо.о. (из прессованной

стружки сплавов АК7пч и АК12), в количестве ~99% от всего объёма шихтовых материалов, так же сплав дошихтовывали кремнием, объём которого в составе шихты составил ~1%. Сплав легировали магнием в объёме ~0,14%. Содержание Mg в сплаве составило 0,286%. Рафинирование производили по ранее определенным параметрам. Индекс плотности сплава составил 1,91%, что говорит о хорошей очистке расплава от газа и неметаллических включений.

В качестве опытного колеса была выбрана модель с диаметром диска 16 и шириной обода 6,5 дюймов. Температура заливки металла в печь составляла 700 °С, общий цикл литья одной отливки соответствовал 224 с. Для производства опытной партии колёс из нового сплава специально были подобраны скорость заполнения пресс-формы и параметры охлаждения зон матрицы.

Использованные параметры рафинирования расплава, литья колёс и охлаждения матрицы позволили получить бездефектную отливку, в которой не было обнаружено окисных плёнок и крупных скоплений пор (рисунок 11).



а

Зона	ρ , г/см ³	Зерно, мкм
1	2,6393	370
2	2,6359	390
3	2,6477	380
4	2,6433	420
5	2,5545	480
6	2,6408	460
7	2,6419	560

б

Рисунок 11 – Исследование макроструктуры опытного колеса: а – макротемплет опытного колеса; б – плотность и размер зерна в разных зонах колеса

Как видно из рисунка 11 выбранные параметры охлаждения позволили получить качественную бездефектную отливку, с мелкозернистой структурой. Размер зерна изменяется в зависимости от сечения каждой зоны.

В связи с тем, что рассчитанные в предыдущей главе параметры термообработки ещё не были внедрены, было принято решение провести термообработку по стандартным на ООО «ЛМЗ «СКАД» температурно-временным параметрам, температура старения при этом была повышена до 160 °С.

Механические свойства измеряли по всем зонам отливки, из которых было возможно подготовить образцы. Полученные свойства сравнивали с основными стандартами, в зависимости от зоны, к которой они предъявляются. Результаты измерений представлены на рисунке 12.

Из гистограмм, представленных на рисунке 12, видно, что механические свойства опытной партии колёс по всем зонам отливки удовлетворяют как отечественному, так и зарубежным стандартам.

Готовую продукцию проверяли на надёжность, качественное колесо выбранной модели должно выдержать следующие стендовые испытания:

- 1) сопротивление усталости колёс при изгибе с вращением 200000 циклов, при нагрузке 3050 Н·м;
- 2) усталостная прочность при динамической радиальной нагрузке 1043637 циклов, при нагрузке 1593 Н;
- 3) сопротивление колеса одному удару под углом 13°, нагрузка 650 кг.

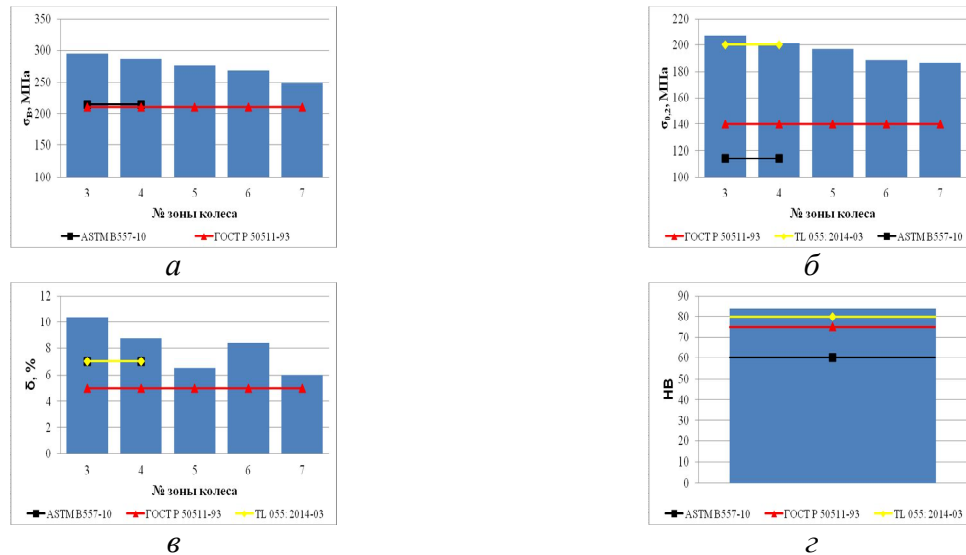


Рисунок 12 – Зависимость механических свойств от зоны колеса: а – временное сопротивление разрыву; б – предел текучести; в – относительное удлинение; г – твердость

Данные испытания моделируют нагрузки, воздействующие на колёса при эксплуатации на автомобиле.

Все колёса опытной партии прошли стандартные испытания с положительным результатом. Далее было принято решение проводить испытания на изгиб с вращением до образования трещин при той же нагрузке, а так же дополнительные испытания с увеличением нагрузки. Так же были проведены дополнительные испытания на удар под углом 13° , их проводили с нагрузками в 800 и 970 кг. Удар производили поочередно, между спиц и в спицу. Результаты испытаний представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты стендовых испытаний

Вид испытания / Требование к нему	Нагрузка	Количество нагружений до разрушения
Изгиб с вращением / 200.000 циклов с нагрузкой 3050 Н·м	3050 Н·м	2.262.000 циклов
	4050 Н·м	2.095.543 циклов
	5050 Н·м	421.874 циклов
Удар под углом 13° / 1 удар с нагрузкой 650 кг	650 кг	4 удара
	800 кг	3 удара
	970 кг	1 удар

Как видно из полученных данных, даже при увеличении нагрузки более чем в полтора раза, колесо выдерживает в два раза большее количество циклов, чем установлено требованиями. Литейных дефектов в изломах обнаружено не было.

При испытании на удар под углом 13° колесо из опытного сплава выдерживает нагрузку не менее чем на 23% превышающую требования. В изломах были обнаружены мелкие газовые поры, размер которых не превышал 0,3 мм.

Таким образом, благодаря хорошим литейным свойствам опытного сплава и правильно подобранным литейным параметрам, была изготовлена партия колес, удовлетворяющая всем требованиям. Отсутствие усадочной пористости в сечении отливки, которая присуща менее технологичному сплаву АК7пч, позволяет получить качественную структуру, которая в сочетании с термической

обработкой обеспечивает высокие прочностные и пластические свойства колес.

Повышенные прочностные свойства нового сплава позволяют разрабатывать более лёгкие колёса, за счёт утонения и создания зон облегчения в зоне спиц и ступице, при этом, не снижая качества изделий.

Исходя из условий производства, на ООО «ЛМЗ «СКАД», был проведён анализ особенностей технологий изготовления литых автомобильных дисков, из доэвтектического и эвтектического силуминов, и определены различия, влияющие на себестоимость готовой продукции. При производстве колёс из эвтектического сплава существуют следующие преимущества: стойкость пресс-формы до текущего ремонта на 400 отливок больше; общая стойкость пресс-формы выше на 5000 колёс; коэффициент использования металла на 4% выше.

Экономическая эффективность изготовления колес из опытного сплава связана с его высокими литейными свойствами. Стойкость пресс-формы выше на 25% из-за отсутствия необходимости её перегревать, высокое значение коэффициента использования металла связано с тем, что не требуется изготавливать толстый обод для качественного заполнения формы расплавом.

В условиях цен на июль 2016 года была посчитана примерная экономическая выгода при использовании нового термически упрочняемого силумина, вместо стандартного АК7пч и производстве 360.000 колёс.

В сумме экономия, при выбранных условиях, равна 21946336,32 рублей в год, что составляет чуть больше 3% себестоимости производства всех колёс. При этом повышается производительность предприятия, что позволяет наращивать пакет заказов.

В **заключении** представлены основные выводы и результаты работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработан эвтектический термически упрочняемый литейный высококремнистый сплав на основе алюминия с содержанием магния 0,2-0,3% для изготовления легкосплавных дисков автомобильных колес (Патент РФ №2616734), интервал кристаллизации которого в два раза меньше, а жидкотекучесть на 23% выше, чем у сплава АК7пч, применяемого в настоящее время.

2. Показано, что термическое упрочнение легированного магнием эвтектического силумина, связано с выделением метастабильных β'' и β' фаз из пересыщенного твердого раствора. Механические свойства автомобильных дисков, полученных литьем под низким давлением, из разработанного сплава, не уступают свойствам дисков из стандартного сплава АК7пч и, в зависимости от зоны колеса, имеют значения: $\sigma_B = 271-291$ МПа, $\sigma_{0,2} = 198-212$ МПа, $\delta = 5,4-8,5\%$, твердость=92-95НВ.

3. Определены оптимальные величины основных технологических параметров процесса изготовления автомобильных дисков, полученных литьем под низким давлением - содержания магния, температуры и продолжительности термической обработки отливок из разработанного сплава, позволяющие получать наибольшие прочностные свойства при сохранении заданного уровня пластичности.

4. Обоснована возможность создания замкнутого цикла производства дисков колёс, за счёт вовлечения больших объёмов низкосортной шихты, преимущественно, переплава стружки, для приготовления разработанного сплава, год-

ного для производства автомобильных дисков.

5. Установлено, что сплав, приготовленный из низкосортной шихты, имеет повышенное содержание карбидов, чем сплав, изготовленный из первичных шихтовых материалов. При этом сплав, приготовленный из оборотных отходов, меньше загрязнен шлаковыми и другими включениями.

6. Разработанный сплав, изготовленный из 99% МГЧ переплава стружки, прошел промышленное освоение при литье колес под низким давлением на ООО «ЛМЗ «СКАД». Получена партия колёс, удовлетворяющая всем требованиям, предъявляемым к литым автомобильным дискам из термически упрочняемого сплава. Планируемый экономический эффект от применения разработанного сплава составит около 3,2% от себестоимости производства.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

1. Исследование влияния легирования магнием сплава АК12 на структуру и свойства автомобильных колес / В.Р. Абалымов, Т.Н. Клейменов, Т.Н. Дроздова, Н.В. Окладникова, В.П. Жереб // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2015. – Т. 8. – № 7. – С. 948–956 (**издание, рекомендуемое ВАК**).

2. Снижение вовлечения модифицирующих лигатур в сплав А356.0 / В.Р. Абалымов, В.П. Жереб, Т.Н. Дроздова, Ю.А. Клейменов // Металлургия машиностроения. – 2015. – № 6. – С. 13–18 (**издание, рекомендуемое ВАК**).

3. Абалымов, В.Р. Использование отходов производства при литье автомобильных дисков / В.Р. Абалымов, В.П. Жереб, Ю.А. Клейменов // Литейное производство. – 2017. – № 2. – С. 15–20 (**издание, рекомендуемое ВАК**).

4. Выбор оптимальных параметров термообработки автомобильных дисков колес из сплава А356.0 / В.Р. Абалымов, Ю.А. Клейменов, Т.Н. Дроздова, Л.И. Серебрякова // XIV Международная научно-техническая Уральская школа-семинар молодых ученых – металловедов : сб. науч. тр. – Екатеринбург : УрФУ, 2013. – С. 8–10.

5. Абалымов, В.Р. Выбор оптимальных параметров закалки и старения для увеличения производительности линии термообработки литых автомобильных дисков колес из сплава А356.0 с использованием методов математической статистики / В.Р. Абалымов, Ю.А. Клейменов, Т.Н. Дроздова // Инновационная деятельность предприятий по исследованию, обработке и получению современных материалов и сплавов : сб. докладов III международной конференции. – Оренбург : ООО ИПК «Университет», 2014. – С. 273–278.

6. Абалымов В.Р., Клейменов Ю.А., Дроздова Т.Н., Серебрякова Л.И. Оптимизация термообработки отливок из сплава А356.0 // 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/s07/s07_001.pdf

7. Оптимизация термообработки отливок из сплава А356.0 / В.Р. Абалымов, Ю.А. Клейменов, Т.Н. Дроздова, Л.И. Серебрякова // 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/s07/s07_001.pdf

8. Абалымов, В.Р. Влияние температуры нагрева при покраске на механические свойства дисков автомобильных колёс из сплавов систем Al–Si и Al–Si–Mg // Наука и современность : сб. статей Международной научно-практической конференции. – Уфа : Аэтерна, 2014. – С. 22–25.

9. Влияние содержания магния и параметров упрочняющей термической обработки на структуру, механические свойства и устойчивость к разрушению при стендовых испытаниях автомобильных дисков колес из сплава AlSi11 / В.Р. Абалымов, Ю.А. Клейменов, Т.Н. Дроздова [и др.] // Цветные металлы и минералы – 2014 : сб. материалов VI Международного конгресса. – Красноярск : ООО «Версо», 2014. – С. 1102–1107.

10. Абалымов, В.Р. Повышение свойств дисков автомобильных колес из сплава АК12 / В.Р. Абалымов, Ю.А. Клейменов, Т.Н. Дроздова // Материаловедение и металлофизика легких сплавов : сб. науч. тр. III Международной научной школы для молодежи. – Екатеринбург : УрФУ, 2014. С. 21–24.

11. Модифицирование сплава А356.0 лигатурой AlTi5B1 / В.Р. Абалымов, Ю.А. Клейменов, Т.Н. Дроздова, Л.И. Серебрякова // Проспект Свободный – 2015 : материалы Международной научной конференции, посвященной 70-летию Великой Победы, [Электронный ресурс] / отв. ред. Е. И. Костоглодова. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2015. – Режим доступа : <https://clck.ru/ALfPe>

12. Абалымов В.Р., Клейменов Ю.А., Дроздова Т.Н. и др. Модифицирование сплава А356.0 // Цветные металлы и минералы 2015 : сб. мат-лов VII Международного конгресса. – Красноярск : ООО «Версо», 2015. – С. 1298–1307.

13. Абалымов, В.Р. Модифицирование сплава А356.0 лигатурой AlSr10 // XVI Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металловедов – молодых учёных : сб. науч. тр. – Екатеринбург : УрФУ, 2015. – Ч. 2. – С. 280–283.

14. Абалымов, В.Р. Сокращение общего времени, затрачиваемого на термообработку, при сохранении механических свойств сплава за счёт увеличения температуры старения / В.Р. Абалымов, П.А. Удод // Проспект Свободный – 2016 : материалы Международной научной конференции, посвященной году образования Содружеств Независимых Государств, [Электронный ресурс] / отв. ред. А.Н. Тамаровская. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2016. – Режим доступа : <https://clck.ru/ALfQo>

15. Удод, П.А. Исследование эксплуатационных характеристик автомобильных колес из новых сплавов системы Al–Si–Mg / П.А. Удод, В.Р. Абалымов

лымов // Проспект Свободный – 2016: материалы Международной научной конференции, посвященной году образования Содружеств Независимых Государств, [Электронный ресурс] / отв. ред. А. Н. Тамаровская. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т., 2016. – Режим доступа <https://clck.ru/ALfQo>

16. Оптимизация термической обработки отливок опытного высококремнистого силумина с применением планирования экспериментов / В.Р. Абалымов, Т.Н. Дроздова, Ю.А. Клейменов, Л.И. Серебрякова // Современные проблемы металловедения : сб. науч. тр. IV Всероссийской молодежной школы-конференции. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2016. – С. 62–69.

17. Исследование закономерностей формирования структуры и свойств новых сплавов системы Al–Si–Mg / П.А. Удод, Т.Н. Дроздова, Т.А. Орёлкина, В.Р. Абалымов // Современные проблемы металловедения : сб. науч. тр. IV Всероссийской молодежной школы-конференции. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2016. – С. 77–84.

18. Абалымов, В.Р. Исследование влияния легирования магнием и термической обработки на структуру и свойства сплава АК12 / В.Р. Абалымов, П.А. Удод // XVII Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металловедов – молодых учёных : сб. науч. тр. – Екатеринбург : УрФУ, 2016. – Ч. 2. – С. 57–61.

19. Удод, П.А. Исследование влияния магния на интервал кристаллизации и жидкотекучесть силуминов системы Al–Si–Mg / П.А. Удод, В.Р. Абалымов // XVII Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металловедов – молодых учёных : сб. научных трудов. – Екатеринбург : УрФУ, 2016. – Ч. 2. – С. 30–34.

20. Пат. 2616734 Российская Федерация МПК C22C 21/04 (2006.01). Литейный высококремнистый сплав на основе алюминия / Абалымов В.Р., Клейменов Ю.А., Дроздова Т.Н.; Заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «СФУ», ООО «ЛМЗ «СКАД». – № 2015151369; заявл. 30.11.2015 ; опубл. 18.04.2017. – Бюл. № 11. – 2 с.

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

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тир 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>