

На правах рукописи



**Чеглаков Владимир Викторович**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ  
АВТОМАТНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ С ЦЕЛЬЮ  
ПОЛУЧЕНИЯ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК С ЗАДАНЫМИ  
СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ**

Специальность 05.16.04 – Литейное производство

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Красноярск – 2020

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

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор, **Бабкин Владимир Григорьевич.**

**Официальные оппоненты:**

**Никитин Константин Владимирович**, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», факультет машиностроения, металлургии и транспорта, декан.

**Фролов Виктор Федорович**, кандидат технических наук, Общество с ограниченной ответственностью «Объединенная компания РУСАЛ инженерно-технологический центр», директор департамента литейных проектов.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Защита состоится 19 марта 2020 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.10 на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет» по адресу 660025, г. Красноярск, пр. «Красноярский рабочий», д. 95, ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет» и на сайте <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.099.10



Лесив Елена Михайловна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Алюминий и его сплавы по объемам производства и потребления занимают второе место после стали, причем сфера их потребления постоянно расширяется и в ряде областей промышленности они успешно вытесняют традиционные материалы. Рост потребления алюминия и его сплавов обусловлен их свойствами, среди которых следует назвать высокую прочность в сочетании с малой плотностью, удовлетворительную коррозионную стойкость, хорошую способность к формообразованию литьем и давлением.

Автоматные алюминиевые сплавы – это традиционные сплавы системы Al-Cu-Mg и Al-Mg-Si дополнительно легированные свинцом или свинцом совместно с висмутом в количестве 1,0–1,2%. Указанные добавки образуют в структуре слитка нерастворимые включения, которые способствуют ломкости стружки и уменьшению ее длины при обработке резаньем. Установлено, что свинец повышает стойкость инструмента и скорость резания, уменьшает расход охлаждающей эмульсии и снижает шероховатость получаемых поверхностей. Как известно, системы Al-Pb, Al-Pb-Bi относятся к системам с областью несмешиваемости в жидком состоянии. Производство этих сплавов обусловлено рядом технологических трудностей:

1. Невозможность обеспечить однородный химический состав сплава, а следовательно, и получить качественный слиток из-за неравномерного распределения свинцовых фаз оптимальных размеров;

2. Достаточно длительный процесс приготовления сплава в плавильных печах неизбежно вызывает потери свинца в процессе его окисления и замешивания оксида свинца со шлаком;

3. Преждевременный выход из строя футеровки плавильных печей в результате взаимодействия оксидов свинца с компонентами футеровки;

4. Высокая трудоемкость процесса и низкая производительность металлургического оборудования.

В связи с изложенным актуальной задачей для совершенствования технологии получения сплавов содержащих свинец является необходимость более глубокого изучения физико-химических, тепло- и гидродинамических процессов, происходящих в системах с несмешивающимися компонентами в процессе плавки и литья слитков, что позволит повысить их качество и расширить рынок сбыта.

**Степень разработанности темы.** Особенности плавки и структурообразования монотектических сплавов на основе алюминия недостаточно изучены, так как получение их традиционными методами затруднено из-за расслоения сплава в процессе его охлаждения и кристаллизации. Наиболее полно изучены фазовый состав и структура гранулируемых сплавов системы Al-Pb, Al-Pb-Bi. Большой вклад в развитие

металлургии гранул и технологи выплавки алюминиевых сплавов внесли Батышев А.И., Белов Н.А., Бочвар А.А., Буше Н.А., Варга Г.И., Горбунов В.Г., Добаткин В.И., Елагин В.И., Черепок Г.В., Эскин Г.И., Miller M., Pratt G.G. и др.

Многими исследователями установлено, что металлические расплавы в широкой температурно-концентрационной области являются химически неоднородными системами. В трудах таких ученых как Баум Б.А., Попель П.С., Ершов Г.С., Никитин В.И., Чикова О.А., Бродова Н.Г. и др. указывается, что разрушение микронеоднородности и перевод металлического расплава в гомогенное состояние происходит в области высоких температур. Микрогетерогенность монотектических сплавов системы Al-Pb связана с несмешиваемостью компонентов в жидком состоянии. Перевод расплава в состояние однородного раствора существенно замедляет процесс макрорасслоения, что способствует формированию при кристаллизации дисперсных включений свинца. Однако в производственных условиях при плавке и литье слитков автоматных сплавов создать высокий перегрев расплава и повышенные скорости охлаждения не представляется возможным. Поэтому весьма актуальным является разработка промежуточного материала (свинецсодержащей лигатуры), содержащей в большом количестве частицы свинца заданного размера, а также создание условий для максимального диспергирования свинца и его равномерного распределения в объеме расплава. Между тем в научной и технической литературе сведений по этим вопросам недостаточно.

Данная работа выполнялась в соответствии с реализацией инновационных проектов «Ресурсы программы развития СФУ», 2007 г.; Соглашения о сотрудничестве и совместной деятельности между ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и ООО «Красноярский металлургический завод», 2009 г.; теме научно-исследовательской работы по договору №207/20677 от 12.05.2017 г. «Разработка МГД технологии для диспергирования свинца при выплавке автоматных алюминиевых сплавов и условий регулируемого структурообразования слитка в процессе кристаллизации».

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является разработка научно обоснованного комплекса технических и технологических решений для совершенствования технологии приготовления автоматных алюминиевых сплавов и получения литых заготовок с заданной структурой и свойствами.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- анализ существующих технологий выплавки автоматных алюминиевых сплавов и определение влияния различных технологических факторов на склонность к укрупнению включений свинца и их равномерному распределению по сечению слитка;

- исследование макроструктуры опытных образцов автоматных сплавов, изготовленных с различной скоростью охлаждения и выявление условий, при которых уменьшается степень расслаивания несмешивающихся компонентов;

- разработка математической модели процессов теплообмена при получении гранул и определение скорости их охлаждения в зависимости от размера и условий охлаждения, исследование микроструктуры гранул;

- определение величины сил, действующих на частицы свинца у грани растущего кристалла и уточнение механизма распределения включений свинца между жидкой и твердой фазами;

- исследование влияния поверхностных свойств на гомогенизацию расплавов системы Al-Cu-Mg-Pb и формирование структуры слитка;

- применение электромагнитной, гидродинамической и теплодинамической численно-математической модели для расчета параметров системы ковш-индуктор и анализа движения алюминиевого расплава и траекторий движения частиц свинца в процессе диспергирования;

- опытно-промышленная апробация результатов исследования и выработка рекомендаций для их внедрения в действующее производство.

**Научная новизна полученных результатов:**

1. На основе результатов математического моделирования теплообмена в процессе гранулирования расплава лигатурного сплава системы Al-15%Pb установлены закономерности изменения скорости охлаждения и времени кристаллизации гранул в зависимости от их размера и условий охлаждения.

2. Подтвержден и научно обоснован механизм образования в структуре гранул включений частиц второй фазы богатых свинцом различных размеров, в зависимости от температурных условий формообразования.

3. В результате анализа капиллярных, кристаллизационных и гравитационных усилий, действующих на частицу свинцовой фазы перед растущим кристаллом, выявлена закономерность их распределения по сечению слитка: кристаллом захватываются частицы менее 0,1–0,25 мкм, а более крупные – вытесняются в междендритное пространство, где происходит их укрупнение за счет коалесценции.

4. Уточнены и расширены представления о возможности получения слитков из автоматного сплава системы Al-Cu-Mg-Pb с мелкозернистой структурой и дисперсными включениями свинца за счет его модифицирования оловом в количестве до 0,2 мас.%, при этом температура гомогенизации микрогетерогенного расплава снижается с 1100 °С до 720–750 °С.

5. Разработана новая энергоэффективная технология приготовления автоматного алюминиевого сплава в транспортном ковше с применением электромагнитного перемешивания и на основе численно-математической модели диспергирования свинца определены оптимальные параметры технологического процесса.

**Практическая значимость работы:**

1. Разработан способ получения лигатурного сплава системы Al-Pb, защищенный патентом РФ №245442 опубликованный 27.06.2012 г.

2. Разработан способ получения лигатуры Al-Ti-B, защищенный патентом РФ №2215810 опубликованный 10.11.2003 г., применяемой для модифицирования расплава при отливке слитков из автоматных алюминиевых сплавов.

3. Разработаны технологические режимы гранулирования лигатурного сплава, снижающие расслаивание несмешиваемых жидких фаз и получение гранул с дисперсными включениями свинцовой фазы.

4. Использование олова в качестве модифицирующей добавки в расплав автоматного алюминиевого сплава позволяет снижать температуру его гомогенизации и получить сплав с мелкозернистой структурой и дисперсными включениями свинца при общепринятых температурах плавки и литья.

5. Разработана эффективная технология диспергирования свинца в расплаве на основе алюминия при его обработке в транспортном ковше, с применением электромагнитного перемешивания.

6. Результаты исследования внедрены в учебный процесс ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и используются для подготовки магистров по направлениям 22.04.02 «Металлургия», 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов», а также аспирантов по специальности 05.16.04 «Литейное производство».

7. Результаты исследования внедрены на ООО «Красноярский металлургический завод» в технологический процесс получения цилиндрических слитков из автоматных алюминиевых сплавов.

**Методология и методы исследования.** При выполнении диссертационной работы использованы следующие современные физико-химические методы исследования расплавов, металлургических систем и процессов на универсальных установках с применением стандартных сертификационных средств измерения: металлографический, сканирующая электронная микроскопия, термический анализ материалов, термодинамический анализ и др.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты математического моделирования процесса теплообмена при гранулировании лигатурного сплава системы Al-Pb и механизм образования в структуре гранул свинцовой фазы различной формы и размеров.

2. Результаты исследования влияния поверхностных свойств расплавов автоматных сплавов и их модифицирования на структуру литых заготовок и характер распределения включений свинцовой фазы при кристаллизации и затвердевании слитка.

3. Результаты анализа новой технологии диспергирования свинца в расплав на основе алюминия в транспортном ковше с использованием электромагнитного перемешивания.

**Степень достоверности полученных результатов.** Достоверность экспериментальных данных и выводов подтверждается использованием современных методик и методов исследования металлургических и литейных процессов, использовании численно-математического моделирования и статистического анализа. Предложенные технологические решения прошли успешные опытно-промышленные испытания и приняты к внедрению.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Российских и международных конференциях, съездах, конгрессах и выставках: IX, XIV Съезд литейщиков России 2009, 2019 гг.; IX, X International Congress and Exhibition «Non-Ferrous metals and Minerals» 2017, 2019 г. Krasnoyarsk, Russia; VIII научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективны» 2017 г.

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 10 научных работах, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, одна статья в журнале, входящем в библиографическую и реферативную базу данных Scopus и в двух патентах на изобретение.

**Личный вклад** соискателя заключается в общей постановке задач, в проведении экспериментальных работ, анализе и интерпретации полученных данных. Приведенные в диссертации результаты получены либо самим автором, либо при его активном участии.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, содержащего 76 источников и 2 приложения. Основной материал изложен на 112 страницах, включая 9 таблиц и 54 рисунка.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации и степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи исследования, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы

**В главе 1** представлен обзор литературных данных по технологическим особенностям приготовления автоматных алюминиевых сплавов систем Al-Si-Cu, Al-Si-Cu-Mg и др. легированных свинцом. Получение данного типа сплавов в индукционных тигельных печах промышленной частоты посредством введения в расплав легкоплавких металлов небольшими порциями не позволяет обеспечивать однородный химический состав сплава из-за неравномерности распределений свинцовых фаз оптимальных размеров в объеме расплава. Известные способы внешнего

воздействия на расплав (вибрация, электромагнитное перемешивание, ультразвуковая обработка) улучшают однородность химического состава сплава, однако полного устранения расслоения расплава системы Al-Pb не происходит, а размер включений свинца по сечению слитка составляет 40–50 мкм и более. Введение в расплав на основе алюминия свинца в виде гранул позволяет получать более мелкие частицы легкоплавкой фазы, однако при этом не обеспечивается их термодинамическая стабильность в процессе разливки, охлаждения и кристаллизации сплава. Возможность применения гранулированных лигатур системы Al-Pb при выплавке автоматных алюминиевых сплавов требует дополнительных экспериментальных исследований по их эффективности.

Многочисленные исследования кристаллизации расплавов монотектических систем показали возможность их гомогенизации при высокотемпературной обработке, что способствует существенному замедлению процесса расслоения расплавов и формированию в структуре массивных образцов при их затвердевании высокодисперсных включений свинца. Высокотемпературная обработка алюминиевых сплавов, содержащих свинец, неприемлема из-за высокой скорости испарения свинца и его интенсивного взаимодействия с материалом футеровки плавильной печи. Показано, что температура гомогенизации может быть понижена при микролегировании расплава поверхностно-активными веществами, однако выбор таких добавок и выявление механизма диспергирования свинца требует специальных исследований, в том числе в условиях приготовления сплавов в транспортном ковше с применением электромагнитного перемешивания.

**В главе 2** представлены методики и материалы для проведения экспериментов. Используются следующие современные методы исследования:

- термический анализ сплавов системы Al-Pb проводили по стандартной методике на приборе NETZSCH STA 449C;

- определение поверхностных свойств расплавов проводили на универсальной вакуумной установке «Капля» конструкции НИИ «ИЗОТЕРМ» (г. Брянск);

- определение химического состава образцов выполняли методом спектрального анализа на оптико-эмиссионном спектрометре SPECTROLAB-M11;

- исследование микроструктуры образцов проводили с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51;

- определение фазового состава исследуемых материалов производилось методом рентгеноспектрального анализа на дифрактометре BRUKER D8 ADVANCE.

**В главе 3** представлены результаты экспериментальных исследований влияния химического состава, температурных режимов плавления и



кристаллизации расплава на получение гранул лигатурных сплавов системы Al-Pb с регламентированным размером частиц свинца.

Предварительные лабораторные исследования существующих технологий получения высококонцентрированных свинецсодержащих алюминиевых сплавов подтвердили неравномерное распределение свинцовых фаз в структуре слитка, изготовленного в конусном металлическом кокиле. В верхней части слитка содержание частиц свинца составляло 7–8%, в средней – 10–15%, а в нижней части наблюдалась сегрегация основной массы свинца. Переход на гранулирование сплава Al-15%Pb (литье в воду) способствовал равномерному распределению частиц свинца по сечению гранул, а их размер не превышал 10 мкм. Для стабилизации процесса гранулирования разработана лабораторная установка, позволяющая получать гранулы заданных размеров.

В процессе физической постановки задачи гранулирования определили максимально возможную температуру расплава системы Al-Pb, при которой не будет происходить заметного испарения компонентов. С этой целью на приборе термического анализа исследовали фазовые переходы гранулированного алюминиевого сплава с содержанием 15% Pb, предполагаемого для использования в качестве лигатуры. Результаты исследования приведены на рисунке 1.

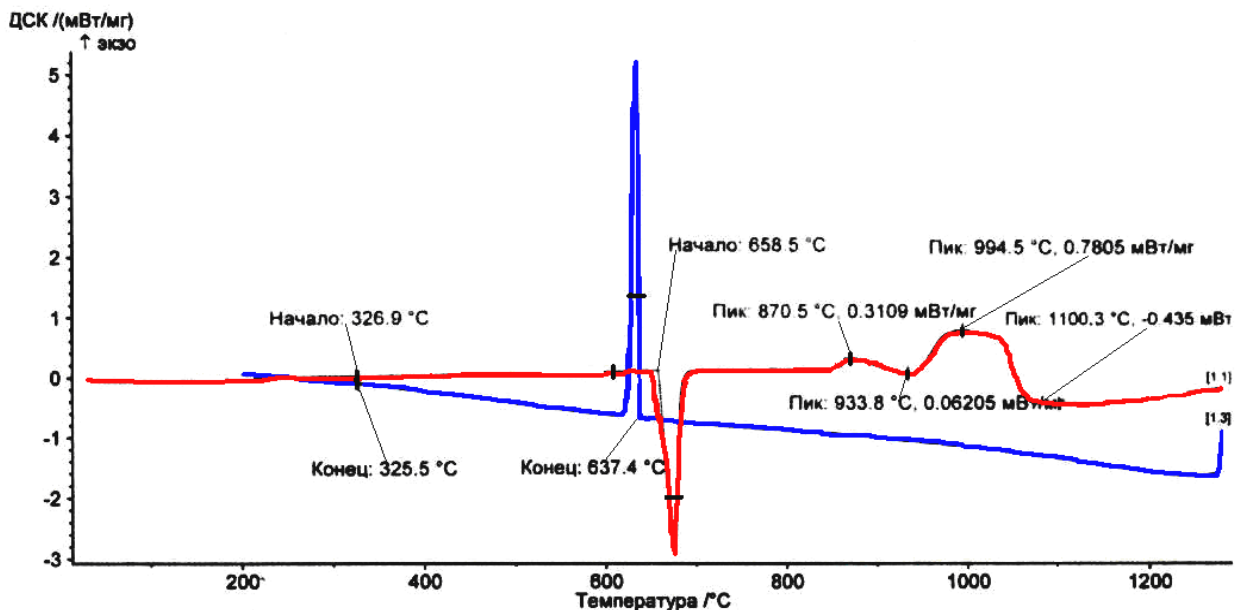


Рисунок 1 – Термограмма фазовых превращений сплава Al-15%Pb

При нагреве образца до температуры 327–330 °C происходит эвтектическая реакция, в результате которой сплав состоит из двух фаз: твердого раствора свинца в алюминии (<0,2% Pb) и жидкой фазы на основе свинца (~0,18% Al). При температуре 656–658 °C происходит монотектическое превращение, к началу которого сплав состоит из двух жидких фаз: фаза 1 содержит 1,5 % Pb, фаза 2 – 0,18% Al. Дальнейший нагрев

расплава системы Al-Pb вызывает повышенное окисление его компонентов с образованием соединения  $PbO \cdot Al_2O_3$  при  $\sim 870$  °С. Результат термического анализа показывает, что это соединение устойчиво до 1100 °С, выше которой происходит испарение PbO и образуется  $\alpha-Al_2O_3$ . На основании результатов термического анализа установили, что содержание свинца в гранулируемом сплаве не должно превышать 15% (масс.), а температура расплава с учетом необходимого перегрева для литья гранул должна составлять 1100 °С.

Оптимизация режимов теплообмена при литье гранул позволяет предупреждать расслаивание расплава в системах с несмешивающимися компонентами и получать заданную структуру гранул. С целью определения технологических параметров гранулирования сплава Al-15%Pb в работе использовали математическую модель процессов теплообмена при литье гранул на экспериментальной установке, разработанную ранее Скуратовым А.П., Бабкиным В.Г. и др., которая состоит из двух частей. Первая часть математической модели включает уравнения неразрывности, импульсов и энергии, описывающие процессы, происходящие при движении капли в воздушной среде, а вторая часть – в воде. При движении капли в воде учитывали процесс парообразования, теплоту, выделяющуюся при кристаллизации, а также теплообмен кристаллизующейся капли в двухфазной среде. В процессе моделирования установлены температурные поля жидкости, омывающей частицу и самой частицы (рисунок 2), а также получены зависимости средней температуры кристаллизующейся капли от времени ее движения в воде.

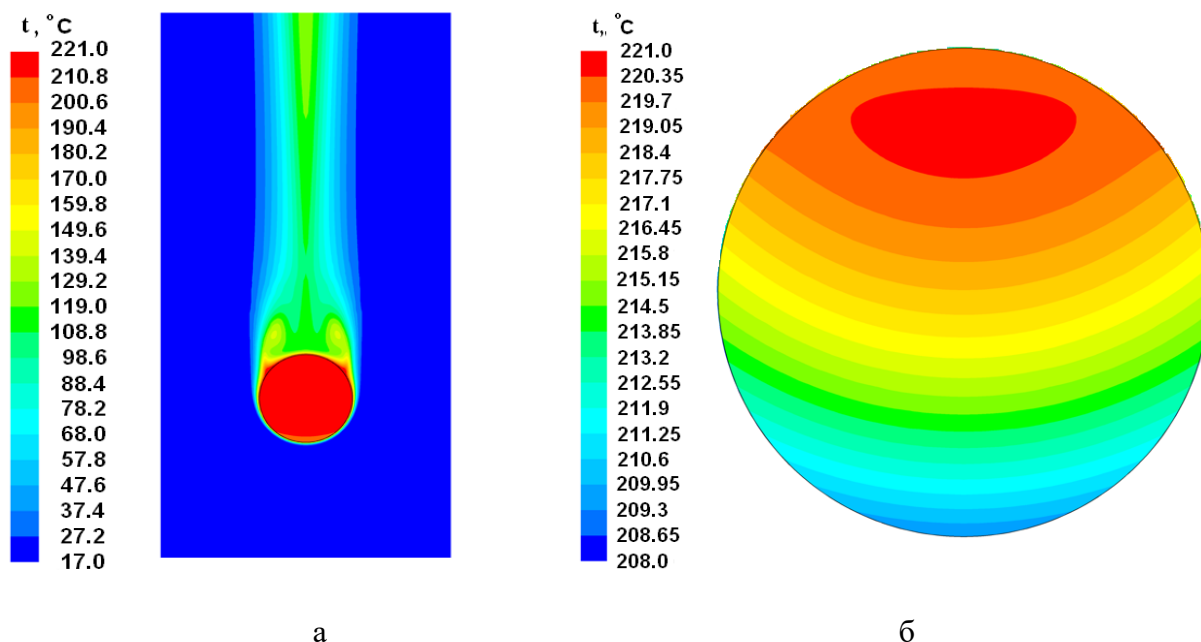


Рисунок 2 – Параметры капли спустя 2 секунды после ее движения в воде:  
а – температурное поле капли и пароводяной смеси; б – температурное поле капли

Установлено, что средняя температура капли уменьшается с 1088 до 26,5 °С за 5 секунд движения ее в воде, что соответствует расстоянию  $\approx 0,25$  мм.

Численное решение математической модели и экспериментальные данные позволили оценить основные характеристики процесса кристаллизации гранул сплава Al-15%Pb. В частности, скорость кристаллизации гранул размером 5–6 мм составила  $1 \cdot 10^2$ , а размером 3–4 мм –  $5 \cdot 10^2$  °С/с.

Структуру гранул исследовали с применением световой и электронной микроскопии. В структуре гранул обнаруживаются частицы свинца, образовавшиеся выше монотектической температуры, в процессе монотектической реакции и ниже монотектической температуры. Наиболее крупные частицы  $\sim 10$  мкм образуются выше температуры монотектики, что связано с коалесценцией мелких частиц свинца, а наиболее мелкие  $\sim 0,1$  мкм при охлаждении от температуры монотектики до температуры эвтектики за счет выделения из раствора  $\alpha$ -фазы второго компонента при понижении температуры. В гранулах диаметром 3–4 мм крупные включения свинца значительно меньше, чем в гранулах диаметром 5–6 мм.

Эффективность применения свинецсодержащей гранульной лигатуры проверена при получении слитка диаметром 320 мм из сплава марки 2007 в условиях ООО «КраМЗ».

Результаты анализа химического состава сплава приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Содержание легирующих и примесных элементов по длине и сечению слитка

По сечению слитка	Содержание легирующих и примесных элементов, % масс.											
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Pb	Bi	Sn
литник	0,49	0,44	3,81	0,60	0,74	0,06	0,04	0,25	0,04	1,02	0,030	0,010
середина	0,50	0,45	3,76	0,61	0,74	0,06	0,04	0,25	0,05	1,07	0,032	0,009
донник	0,48	0,43	3,62	0,60	0,71	0,06	0,04	0,24	0,05	1,08	0,033	0,009
EN 573-3, сплав 2007	0,8	0,8	3,3–4,6	0,50–1,0	0,40–1,8	0,10	0,20	0,8	0,20	0,8–1,5	0,20	0,20

Результаты макроконтроля и микроскопических исследований показали, что структура по длине и сечению слитка достаточно равномерная, мелкозернистая. Однако свинцовые включения размером от 8 до 30 мкм располагаются преимущественно по границам дендритных ячеек и только более мелкие частицы свинца частично располагаются в теле зерна (рисунок 3).

Производственные испытания подтвердили возможность ввода лигатуры в виде гранул в расплав непосредственно перед кристаллизатором,

что позволяет уменьшать потери свинца и сделать более равномерным его распределение в слитке.

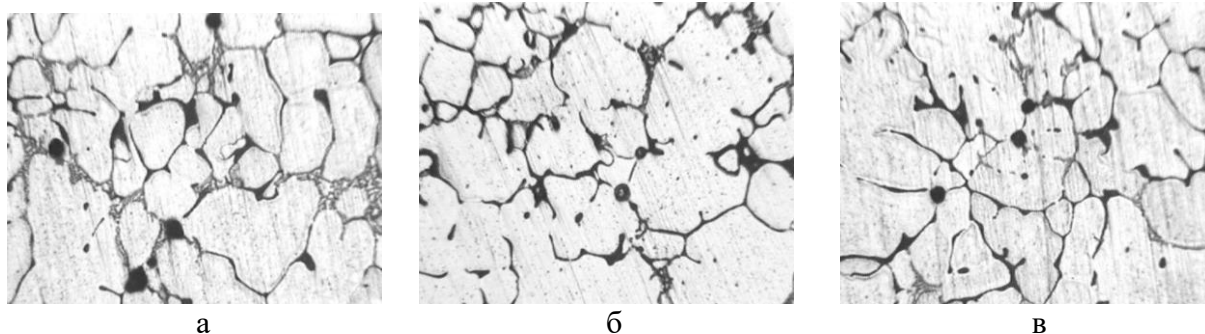


Рисунок 3 – Характерная микроструктура слитка Ø 320 мм из сплава 2007, ×100:  
а – литник, б – середина, в – донник

Для уточнения механизма распределения включений свинца между жидкой и твердой фазами рассмотрели важнейшие силы, действующие на частицы свинца перед растущим кристаллом. Расчеты приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значение сил, действующих на частицы свинца у грани растущего кристалла

Размер $r$ частицы свинца, мкм	Силы и расчетные уравнения		
	капиллярные $f_k = \frac{8}{3} \pi r^2 \frac{\Delta\sigma}{\delta}$ ; $\Delta\sigma = 10 \text{ мДж/м}^2$ ; $\delta = 10^{-5} \text{ м}$	кристаллизационные $f_{кр} = 2\pi r h \frac{\Delta T \Delta H}{TV}$ ; $\Delta T = 10 \text{ К}$ ; $h = 10^{-9} \text{ м}$ ; $T = 934 \text{ К}$	Архимеда $f_A = \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta\rho g$ ; $\Delta\rho = 8,28 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
0,5	$3,5 \cdot 10^{-8}$	$3,24 \cdot 10^{-8}$	$4,2 \cdot 10^{-14}$
1	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$6,5 \cdot 10^{-8}$	$3,4 \cdot 10^{-13}$
5	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$3,24 \cdot 10^{-7}$	$4,2 \cdot 10^{-11}$
10	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$6,5 \cdot 10^{-7}$	$3,4 \cdot 10^{-10}$

Анализ расчетов свидетельствует о преобладающем влиянии на начальных стадиях кристаллизации капиллярных и кристаллизационных сил. С увеличением размера частиц роль гравитационных сил возрастает более интенсивно, чем капиллярных и кристаллизационных и по мере продвижения фронта кристаллизации сила Архимеда может составить значительную величину.

При непрерывном литье и небольшом переохлаждении кристалл растет в форме скелета или дендрита в направлении температурного градиента вглубь слитка. Перед растущим кристаллом сплава системы Al-Pb появляются избыточные концентрации свинца, растворимость которого в твердой фазе незначительна. Обычно образовавшиеся частицы новой фазы, взвешенные в расплаве, имеют размер  $10^{-9} \text{ м}$ . Эти частицы представляют

собой метастабильную, термодинамически неустойчивую фазу, поэтому испытывают естественное стремление к укрупнению. Процесс укрупнения сопровождается уменьшением поверхности раздела, чему способствуют высокие значения межфазного натяжения и соответственно малые величины вязкости расплава и частиц новой фазы. Повышение приграничной концентрации свинца над объемной в глубине жидкой фазы вызывает появление градиента межфазного натяжения  $\sigma$  вдоль поверхности частицы жидкого свинца, оказавшейся в ликватном (диффузионном) слое перед фронтом кристаллизации и соответствующей ему капиллярной силе  $f_k$ . Анализ экспериментальных значений поверхностного натяжения сплавов алюминия со свинцом позволил определить по правилу Антонова разность межфазного натяжения  $\Delta\sigma_{x=0}=170\text{мДж/м}^2$  ( $0,17\text{ Дж/м}^2$ ). Эту величину приняли для оценочных расчетов капиллярной силы, действующей на частицы жидкого свинца различных размеров у грани растущего кристалла. Частица свинца, прошедшая под действием капиллярных сил ликватную пленку на растущей грани кристалла (рисунок 4) и коснувшись кристаллического остова, испытывает противодействие кристаллизационного давления, которое не зависит от символа отталкивающей грани и природы препятствия и связано с энергией фазового перехода.

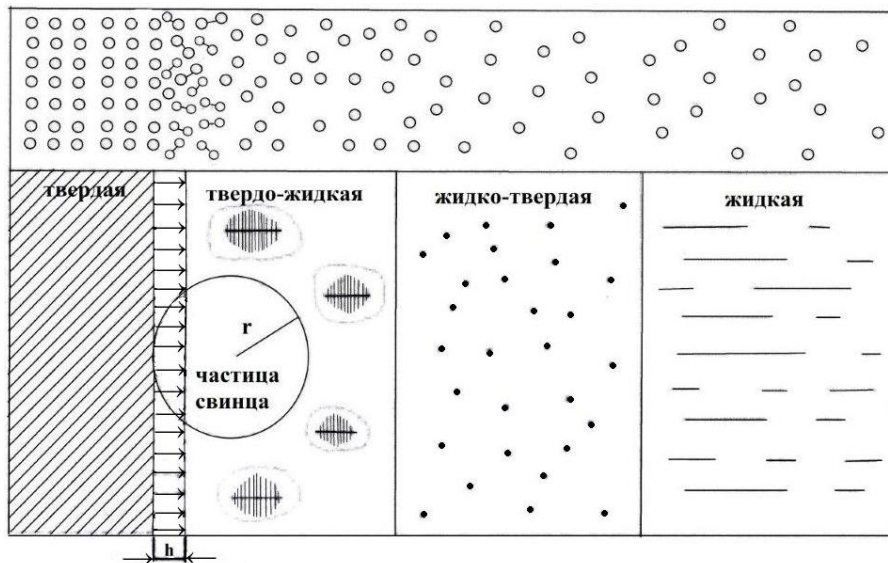
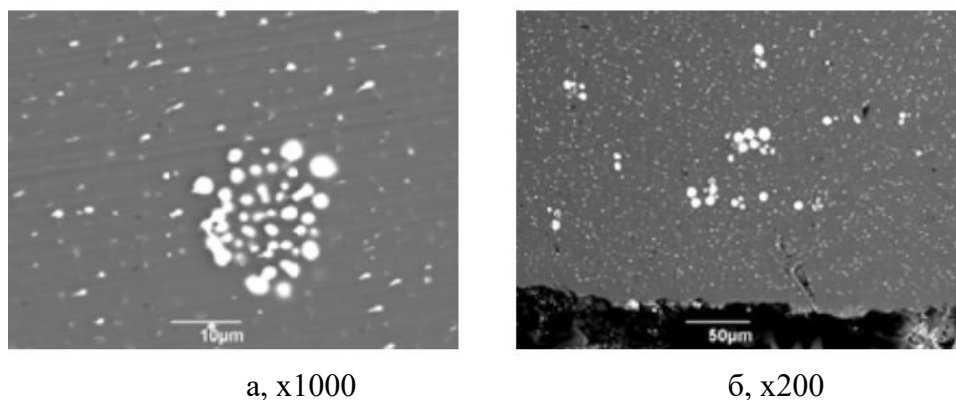


Рисунок 4 – Схема формирования включений свинца в структуре слитка

При степени переохлаждения на фронте кристаллизации 2–5 К растущим кристаллом захватываются частицы менее  $0,1\text{--}0,25\ \mu\text{м}$ , а более крупные оттесняются в междендритное пространство. Частицы жидкого свинца, оказавшиеся между растущими кристаллами в двухфазной зоне, склонны к слиянию (коалесценции) (рисунок 5а). В двухфазной зоне происходит укрупнение жидких частиц свинца и их перемещение вдоль фронта растущих кристаллов. Чем меньше переохлаждение, тем более

крупными образуются частицы жидкого свинца, и их распределение по высоте слитка требует учета архимедовой силы.

Результаты исследований показали, что в периферийной зоне слитка частицы свинца размером менее  $0,10\text{--}0,25\ \mu\text{m}$  располагаются преимущественно в теле зерна, а более крупные включения по границам зерен. По мере приближения к центральной зоне слитка количество и размер свинцовых включений несколько увеличивается (рисунок 5б), достигая  $20\text{--}30\ \mu\text{m}$ , что не оказывает отрицательного влияния на структуру и параметры производства слитков и полуфабрикатов.



а, x1000  
б, x200  
Рисунок 5 – Микрофотографии распределения включений свинца, полученные на растровом электронном микроскопе

**В главе 4** представлены результаты экспериментальных исследований возможности приготовления высоколегированных автоматных алюминиевых сплавов с мелкодисперсными включениями свинца в транспортном ковше.

Как показали экспериментальные исследования и производственные испытания, применение литых свинецсодержащих лигатур и лигатур в виде брикетов, спрессованных из гранул свинца и алюминиевой стружки, позволяет получать слитки с более равномерным распределением свинца по сечению слитка. Получение автоматных алюминиевых сплавов в плавильных печах с использованием таких лигатур позволяет уменьшить потери свинца и повысить стойкость футеровки. Однако во всех случаях при полунепрерывном литье слитков наблюдается склонность к укрупнению включений свинца до  $20\text{--}30\ \mu\text{m}$ , которые располагаются по границам дендритных ячеек, а частицы больших размеров в результате ликвации наблюдаются в донных частях слитка.

Отмеченные особенности формирования структуры слитка из свинецсодержащих алюминиевых сплавов определяются свойствами расплава, в частности его микрогетерогенностью. Разрушение микрогетерогенности, т.е. перевод металлического расплава в состояние однородного на атомарном уровне, происходит в условиях высокого перегрева над линией ликвидус, до  $1100\ ^\circ\text{C}$ . Перевод расплава в состояние

истинного раствора существенно меняет условия кристаллизации, структуру и свойства формирующегося слитка.

В связи с изложенным, представляло интерес изучение возможности снижения температуры гомогенизации расплава автоматного сплава системы Al-Cu-Mg-Pb за счет применения поверхностно-активных веществ (ПАВ) и их влияния на формирование структуры металла в процессе кристаллизации при низких скоростях охлаждения ( $1,0-10,0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{c}$ ), которые характерны для литейных процессов. О возможности разрушения микрогетерогенности расплавов судили по изменению контактных углов на границе двух взаимно насыщенных жидкостей на основе Al и Pb и межфазного натяжения между ними (рисунок 6).

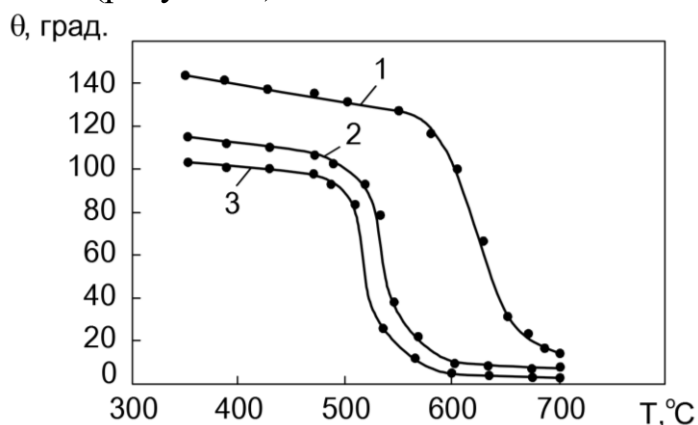


Рисунок 6 – Температурная зависимость углов смачивания свинцом чистого алюминия (1), алюминиевого сплава Д1 (2) и сплава Д1+0,1% Sn (3)

Растворимость свинца в твердом алюминии составляет 0,17%. В результате насыщения поверхностного слоя алюминиевой подложки свинцом и его подплавления ( $t = 658\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) контактные углы резко снижаются со  $130^{\circ}$  до  $20^{\circ}$  (рисунок 6, кривая 1). Для перевода расплава Al-Pb перед кристаллизацией в микрооднородное состояние необходимо существенно улучшить смачивание свинцом алюминиевой матрицы. Представляет интерес легирование алюминиевой основы элементами, увеличивающими взаимную растворимость фаз. В промышленном сплаве Д1 системы Al-Cu-Mg таким компонентом является магний. Магний сокращает область расслоения в жидком состоянии сплавов системы Al-Pb и снижает углы смачивания свинцом подложки из сплава Д1 со  $140^{\circ}$  до  $110^{\circ}$  (рисунок 6, кривая 2). Порог смачивания свинцом промышленного сплава Д1 наблюдается в интервале  $500-540\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Понижение пороговой температуры связано с образованием в системе Al-Pb-Cu однофазной жидкости при  $547\text{ }^{\circ}\text{C}$  и содержании свинца менее 1,0%. Еще большей поверхностной активностью в расплавах на основе алюминия обладает олово. Введение 0,1% Sn в подложку из сплава Д1 приводит к снижению углов смачивания на  $10^{\circ}$  при температуре вблизи  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а при температурах выше  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  угол смачивания приближается к нулю (рисунок 6, кривая 3).

Результаты опытов показывают, что во всех рассматриваемых системах наблюдается порог смачивания, связанный с фазовым переходом и разрушением оксидных пленок на межфазных границах. Для системы Al-Pb порог смачивания отмечен в интервале  $620-650\text{ }^{\circ}\text{C}$ , т.е. вблизи монотектической температуры, при которой



Значение поверхностного натяжения взаимно насыщенных расплавов на основе алюминия ( $\sigma_1$ ), свинца ( $\sigma_2$ ) и межфазного натяжения  $\sigma_{1,2}$  приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Поверхностные свойства равновесных расплавов в системах Al-Pb, Д1-Pb

Температура, °С	Расплав	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_{1,2}$	$W_a$
		мДж/м <sup>2</sup>			
660	Al-1,0%Pb	650	417	233	834
660	Д1-1,0%Pb	480	420	60	840
660	Д1-1,0%Pb-0,1Sn	450	426	24	852
710		430	430	0	860

Межфазное натяжение на границе взаимно насыщенных фаз алюминия со свинцом при 660 °С составило 233 мДж/м<sup>2</sup>, а в системе Д1-1,0%Pb снижается при этой температуре до 60 мДж/м<sup>2</sup>. Значительное снижение межфазного натяжения обусловлено существенным возрастанием растворимости свинца в расплаве промышленного сплава Д1. В системе Al-Cu-Mg-Pb жидкость (1) появляется при 327 °С (как и для сплава Al-Pb), а жидкость (2) с 4,0% меди – при 547 °С. При содержании свинца до 1,0% жидкость 1 и жидкость 2 растворяются друг в друге с образованием однофазной жидкости. Если свинца больше 1,0%, то для получения однофазной жидкости требуется больший перегрев. Низкие значения углов смачивания и межфазного натяжения, отличные от нуля свидетельствуют о том, что система находится в микрогетерогенном состоянии, для которого характерно наличие межфазной поверхности, отделяющей микрочастицы свинца от остального расплава. После выдержки и разлива при 660 °С сплав охлаждается, из него выделяются мельчайшие включения свинца, которые укрупняются в капли за счет коалесценции еще до начала монотектической кристаллизации. Разрушение микрогетерогенности происходит в области высоких температур, когда металлический расплав на основе алюминия переходит в состояние однородного на атомарном уровне. Снижение температуры гомогенизации микрогетерогенных расплавов, как отмечено выше, достигается при введении в сплав системы Al-Cu-Mg-Pb 0,1% олова (таблица 3), что обусловлено сравнительно слабым взаимодействием атомов алюминия и меди с атомами олова в объеме расплава и более сильным притяжением их пограничными атомами свинца. С повышением температуры до 710 °С возрастает взаимная растворимость компонентов, в соответствие с этим снижается до нуля  $\sigma_{1,2}$ . Адгезия фаз в рассматриваемых системах изменяется незначительно, поскольку вблизи температуры затвердевания углы смачивания свинцом сплавов на основе алюминия малы.

Как показали исследования (таблица 4), температура обработки и модифицирования расплава оловом влияют на структуру сплавов системы



Al-Cu-Mg-Pb. С ростом температуры уменьшается дендритный параметр, а следовательно, и размер зерна.

Таблица 4 – Влияние температуры и модифицирования расплава системы Al-Cu-Mg-Pb (Д1) оловом на величину дендритного параметра

Номер образца	Содержание Pb и Sn в сплаве системы Al-Cu-Mg-Pb (сплав Д1)		Температура, °С	Дендритный параметр (среднее значение), мкм		
	Pb, масс.%	Sn масс.%		Зона 1	Зона 2	Зона 3
1.2	0,7	0,004	660	27,2	29,1	26,9
2.2	0,7	0,003	800	21,6	24,7	20,9
3.2	1,0	0,003	1100	18,8	21,9	18,2
1.2.1	0,7	0,024	660	22,8	25,3	28,9
3.2.1	1,2	0,028	850	19,0	21,4	20,1
1.0	0,8	0,025	750	21,0	21,1	22,2
4.2	1,2	0,230	750	21,7	21,3	19,6

Таким образом, модифицирование расплава системы Al-Cu-Mg-Pb оловом в количестве 0,1–0,2% снижает температуру перехода метастабильной структуры в структуру истинного раствора до 710–750 °С. Исследования опытных образцов показали, что модифицирование способствует также измельчению включений свинца.

Для успешного перевода расплава системы Al-Cu-Mg-Pb в микрогетерогенное и далее в гомогенное состояние с применением ПАВ необходимо его эффективное перемешивание в транспортном ковше при вводе брикетированной свинецсодержащей лигатуры с целью диспергирования свинца и его равномерного распределения в объеме расплава. Поэтому важным этапом в повышении эффективности приготовления автоматных сплавов является использование электромагнитного перемешивания для интенсификации процессов диспергирования и растворения свинца в расплаве на основе алюминия. Для выработки рекомендаций и технических решений по новой технологии провели специальные исследования и их проверку в ООО «Красноярский металлургический завод».

Наиболее эффективным способом электромагнитного перемешивания алюминиевого расплава в транспортном ковше для приготовления автоматного сплава является расположение индуктора вдоль вертикальной образующей ковша. При таком варианте расположения индуктора электромагнитного перемешивателя его эффективная работа возможна уже при высоте столба расплава алюминия, составляющего хотя бы половинную высоту индуктора.

Для анализа электромагнитного и гидродинамических полей системы «ковш - электромагнитный перемешиватель» в процессе диспергации свинца в расплаве на основе алюминия в транспортном ковше была применена математическая модель.

С применением электромагнитной численно-математической модели определены параметры системы ковш - индуктор. Получены значения магнитной индукции на границе «футеровка - жидкий металл» равные 0,3–0,4 Тл. Установлены скорости жидкого алюминия в ковше, равные 0,8–1,3 м/с.

Анализ картины распределения движения алюминиевого расплава в ковше показал, что все части объема расплава находятся в движении. Реверс движения алюминиевого расплава позволяет исключить области с минимальным перемешиванием. Расчеты траектории движения частиц свинца показывают, что при интенсивном движении алюминиевого расплава свинец эффективно диспергируется во всем объеме ковша (рисунок 7). Частицы свинца активно перемешиваются в объеме расплава при направлении бегущего электромагнитного поля индуктора как вниз ковша, так и при изменении направления на противоположное - вверх ковша. Это приводит к реверсированию движения алюминиевого расплава в ковше и пересечению траекторий движения расплава. За счет этого исключаются слабо проработанные области в объеме расплава в ковше.

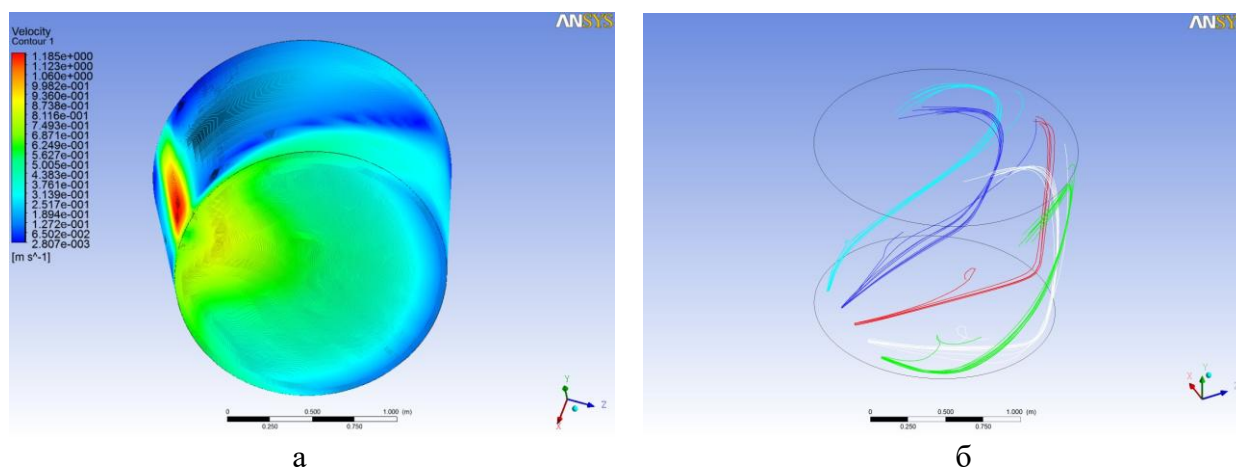


Рисунок 7 – Движение алюминиевого расплава (а) и траектория движения частиц свинца (б) в ковше

Важным этапом эффективности перемешивания является определение интенсивности теплообмена при воздействии электромагнитных сил в расплаве, генерируемых электромагнитным полем индуктора. За основу математической модели расчета теплового поля алюминия в ковше принято дифференциальное уравнение теплопроводности. На рисунке 8 представлено распределение температуры в ковше с алюминиевым расплавом и загруженной лигатурой Al-Pb.

Градиент температур в алюминиевом расплаве печи через 420 секунд работы электромагнитного перемешивателя, установленного с боковой стороны ковша, не превышает 27 °С (максимальное значение температуры 758 °С; минимальное значение температуры – 731 °С). Анализ полученных результатов доказывает, что индуктор, установленный с боковой стороны

ковша, позволяет эффективно перемешивать лигатуру в расплаве алюминия во всем объеме ковша.

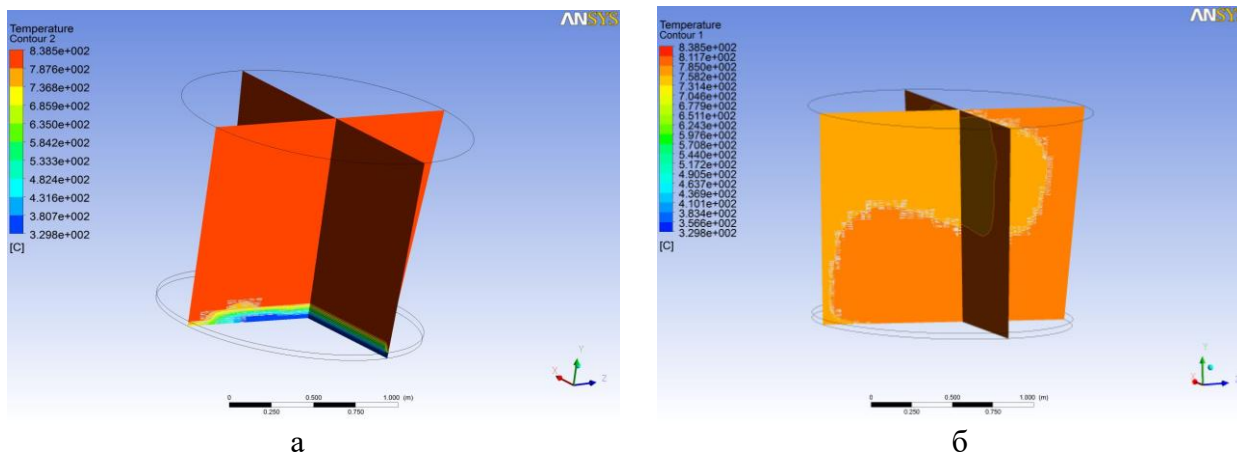


Рисунок 8 – Распределение температуры в расплаве после работы индуктора в течение 30 секунд (а) и по истечении 420 секунд (б)

Следующий этап работы включает проверку результатов исследования эффективности обработки расплава в транспортном ковше, полученных с применением математического моделирования, непосредственно в производственных условиях при приготовлении сплава системы Al-Cu-Mg-Pb. Исследования проводили в условиях ООО «КраМЗ» на установке электромагнитного перемешивания (ЭМП), представленной на рисунке 9.



Рисунок 9 – Установка электромагнитного перемешивания в ковше

Сплав системы Al-Cu-Mg выплавляли в пламенной печи, переливали в транспортный ковш и доставляли к установке электромагнитного перемешивания. Предварительно на рабочую площадку установки поступала свинцовая лигатура в виде цилиндрических брикетов. Вес одного брикета составлял около 2 кг. Лигатура имела следующий состав, масс. %: Pb-50%;

Cu-5%; Al-45%. Параметры работы электромагнитного перемешивателя представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Параметры работы комплекса ЭМП

Параметр	Значение
1. Амплитуда тока, А	230
2. Частота, Гц	1,5
3. Общее время перемешивания расплава, мин	30
4. Реверс движения расплава, мин	10
5. Начальная температура расплава, °С	775
6. Конечная температура расплава, °С	742

После задания параметров перемешивания и включения комплекса электромагнитного перемешивания в работу, в ковш с расплавом загружали заданное количество лигатуры. Через каждые 5 минут работы установки электромагнитного перемешивания с поверхности расплава брали пробы для химического анализа. Для более точного фиксирования включений свинца при определенном времени перемешивания расплава пробы отливали в емкость с водой через 5, 15 и 30 минут после ввода лигатуры и в дальнейшем подвергали химическому анализу и металлографическому исследованию. По результатам исследования отобранных образцов установлено, что коэффициент распределения свинца составил 91%. Приближение расплава к однородному состоянию оказало положительное влияние на процесс кристаллизации и структуру отливок. Установлено, что в структуре всех образцов присутствуют свинцовые монотектики размером от 2 до 12 мкм. В процессе исследования не выявлено существенного различия в количестве монотектик от времени выстаивания расплава, однако их размер уменьшается с увеличением времени диспергирования. Таким образом, благодаря интенсивному электромагнитному перемешиванию и последующему быстрому охлаждению можно достичь довольно высокой дисперсности фаз и их относительно равномерного распределения в объеме ковша. Однако при затвердевании слитков свинцовая монотектика располагается в основном по границам зерен, а не в теле зерна, что свидетельствует о недостаточной степени диспергирования свинца и возможном укрупнении частиц в процессе отбора проб и последующем литье в воду. Для замедления процесса макрорасслоения необходимо микрогетерогенную систему Al-Cu-Mg-Pb перевести в гомогенное состояние при общепринятых температурах плавки и литья. Это достигается введением в расплав на основе алюминия поверхностно-активного олова в количестве, при котором межфазное натяжение на границе жидких фаз снижается до нуля. Для выявления этого условия определили межфазное натяжение  $\sigma_{12}$  по правилу Антонова:  $\sigma_{12} = \sigma_1 - \sigma_2$ , где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  поверхностные натяжения взаимно-насыщенных расплавов на основе алюминия ( $\sigma_1$ ) и свинца ( $\sigma_2$ ). Одновременно оценивали величину угла смачивания свинцом твердой и

жидкой фазы на основе алюминия. Достижение нулевого значения угла свидетельствовало об исчезновении межфазной границы и о переходе системы в однофазное состояние. Результаты опыта приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Поверхностные свойства расплавов системы Al-Pb, Al-Cu-Mg-Pb и Al-Cu-Mg-Sn-Pb

Температура, °С	Расплав	Смачивание свинцом твердой и жидкой фазы на основе алюминия, $\theta$ , град	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_{12}$	Адгезия, Wa
			мДж/м <sup>2</sup>			
500	Алюминий марки А6	130				
660		50	650	417	233	834
710		20				
500	Al-Cu-Mg	100				
660		15	480	420	60	840
710		10				
500	Al-Cu-Mg-Sn	90				
660		5	450	426	24	852
710		0	430	430	0	860

Как следует из таблицы 6, частицы жидкого свинца при температуре 500 °С не смачивают образующуюся при кристаллизации твердую фазу, что способствует их укрупнению и выдавливанию на границу зерен. Повышение содержания олова до 0,2% способствует даже при сравнительно низких температурах плавки и литья (750 °С) значительному измельчению частиц свинца и их внедрению в тело зерна. Таким образом, сочетая интенсивное электромагнитное перемешивание расплава с одновременным модифицированием поверхностно-активным оловом в количестве 0,1–0,2%, можно получить в мелкозернистой структуре слитка дисперсные частицы свинца, преимущественно располагающиеся в теле зерна.

Оценку влияния структуры слитков произведенных по опытной технологии на уровень механических свойств прессованных изделий сплава системы Al-Cu-Mg-Pb проводили на базе прессового производства ООО «КраМЗ». Набор данных проводили при прессовании продукции из серийного сплава 2007. В результате анализа полученных данных установлено, что механические свойства прутков как прочностные характеристики, так и пластичность, с уменьшением размеров свинцовых монотектик закономерно повышаются на 7–10%.

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

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Установлено, что независимо от способа литья структура слитка автоматного алюминиевого сплава имеет неоднородное строение по сечению и высоте, а размеры включений свинцовых фаз достигают 40 мкм и более. При этом уменьшить расслоение монотектической системы Al-Pb и размер

частиц свинцовой фазы можно за счет применения гранулируемых свинецсодержащих лигатур и перевода расплава автоматного сплава из микрогетерогенного в гомогенное состояние.

2. На основе результатов термического анализа лигатурного сплава Al-15%Pb и математического моделирования процессов теплообмена при литье гранул на экспериментальной установке определены следующие технологические параметры процесса гранулирования: температура перегрева расплава 1100 °С; скорость кристаллизации гранул размером 5–6 мм  $1,0 \cdot 10^2$ , а размером 3–4 мм –  $5,0 \cdot 10^2$  °С/с.

3. Металлографическим анализом и электронномикроскопическими исследованиями в структуре гранул обнаружено небольшое количество включений свинцовой фазы размером ~10 мкм, образовавшихся в результате коалесценции при температуре выше монотектической и самые мелкие частицы менее 1 мкм, образовавшиеся при охлаждении гранул от температуры монотектики до температуры эвтектики за счет выделения из раствора  $\alpha$ -фазы второго компонента.

4. Испытание гранулированной свинецсодержащей лигатуры при литье слитков из автоматного сплава марки 2007 в условиях ООО «КраМЗ» показали, что структура по сечению и длине слитка достаточно равномерная и мелкозернистая, однако частицы свинца располагаются, в основном, по границам дендритных ячеек. Расчет усилий действующих на частицу свинца перед растущим кристаллом в процессе кристаллизации слитка подтвердил эти результаты: при степени переохлаждения 2–5 К растущим кристаллом захватываются частицы менее 0,1–0,25 мкм, а более крупные оттесняются в междендритное пространство, что объясняется соотношением величин межфазных энергии на границе контактирующих фаз микрогетерогенной системы.

5. Разрушение метастабильной неоднородности и перевод расплава в состояние истинного раствора существенно меняет условия кристаллизации, структуру и свойства слитка. Установлено, что взаимное смачивание контактирующих фаз и образование однородной дисперсной системы может быть достигнуто не только высоким перегревом расплава, но и при более низких технологических температурах за счет модифицирования монотектического расплава системы Al-Cu-Pb поверхностно-активными металлами: оловом, магнием, висмутом.

6. Применение брикетированной лигатуры состава 50%Pb, 5%Cu и 45% масс Al потребовало разработки новой эффективной технологии получения автоматных алюминиевых сплавов в транспортном ковше. Доказано, что важным этапом технологического процесса приготовления сплава системы Al-Cu-Mg в ковше является электромагнитное перемешивание расплава с целью диспергирования свинца и его равномерного распределения в объеме расплава. На основе электромагнитной, гидродинамической и термодинамической численно-математических моделей выполнены расчеты

технологических параметров процесса: значение магнитной индукции на границе «футеровка-расплав» 0,3–0,4 Тл; температура расплава в транспортном ковше 775–742 °С; скорость движения расплава в активной области индуктора 1,1–1,3 м/с, время перемешивания - 30 мин, реверс движения расплава через каждые 10 мин.

7. Для успешного перевода расплава системы Al-Cu-Mg-Pb в микрогетерогенное и далее в гомогенное состояние при заданном интервале температур необходимо введение в расплав автоматного сплава поверхностно-активного олова в количестве до 0,2 мас. %, что обеспечивает повышение эффективности диспергирования свинца и расположение дисперсных частиц свинца в теле зерна в процессе затвердевания слитка.

### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК и патенты:

1. **Чеглаков, В.В.** Применение гранул из лигатуры системы Al-Pb для введения свинца в автоматные алюминиевые сплавы / В.Г. Бабкин, А.И. Черепанов, Е.В. Низовцев, В.В. Чеглаков // Технология легких сплавов. — 2009. — № 2. — С. 62-69.

2. **Чеглаков, В.В.** Повышение качества слитков из автоматных алюминиевых сплавов при полунепрерывном литье / В.Г. Бабкин, В.Ш. Резяпов, А.И. Черепанов, В.В. Чеглаков // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. — 2013. — Т. 6, № 3. — С. 307-313.

3. **Чеглаков, В.В.** Влияние высокотемпературной обработки и модифицирования сплавов на основе Al и Cu на формирование структуры отливок / В.Г. Бабкин, В.В. Чеглаков, А.И. Трунова // Литейное производство. — 2019. — № 3. — С. 15-18.

4. Патент на изобретение № 2454472 Российская Федерация, МПК С22С 1/03, С22С 21/06. Способ получения сплава на основе алюминия системы Al-Pb / В.Г. Бабкин, А.И. Черепанов, В.Ш. Резяпов, **В.В. Чеглаков**, Е.В. Низовцев. — № 2011105590/02; заявл. 15.02.2011; опубл. 27.06.2012, Бюл. № 18.

5. Патент на изобретение № 2215810 Российская Федерация, МПК С22С 35/00, С22С 1/02. Способ получения лигатуры алюминий-титан-бор / **В.В. Чеглаков**, А.П. Назаров, В.И. Шпаков. — № 2001135901/02.; заявл. 26.12.2001; опубл. 10.11.2003, Бюл. № 31.

Статьи, входящие в библиографическую и реферативную базу данных Scopus:

6. **Чеглаков, В.В.** Диспергирование свинца при выплавке автоматных алюминиевых сплавов и условия регулирования структурообразования слитка / В.Г. Бабкин, В.В. Чеглаков, Р.М. Христинич, Т.П. Пушкарева // *Металлург.* — 2019. — № 10. — С. 76-81.

Другие публикации:

7. **Чеглаков, В.В.** Пути повышения качества слитков из алюминиевых сплавов при полунепрерывном литье / В.Г. Бабкин, В.Ш. Резяпов, А.И. Черепанов, В.В. Чеглаков // *Цветные металлы–2012: сб. докладов IV Международного конгресса.* — Красноярск, 2012. — С. 696-699.

8. **Чеглаков, В.В.** Повышение качества автоматных алюминиевых сплавов за счет модифицирования и температурной обработки / А.Н. Гузев, В.В. Чеглаков, В.Г. Бабкин // *Перспективныи материалы* // *Прспект Свободный–2017: материалы Междунар. науч. конф.* — Красноярск: СФУ, 2017. — С. 12-16.

9. **Чеглаков, В.В.** Легирование автоматных алюминиевых сплавов в транспортном ковше свинцом с применением электромагнитного перемешивания / В.Г. Бабкин, В.В. Чеглаков, Р.М. Христинич // *Сборник докладов XIV Международного съезда литейщиков– Казань, 2019.* – С. 42-48.

Подписано в печать \_\_.\_\_.2020. Печать плоская. Формат 60x84/16  
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_

Отпечатано полиграфическим центром  
Библиотечно-издательского комплекса  
Сибирского федерального университета  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а  
Тел./факс: 8(391)206-26-67, 206-26-49  
E-mail: print\_sfu@mail.ru; <http://lib.sfu-kras.ru>