

На правах рукописи



ГУТЕМА ЕНДАЛКАЧЕУ МОСИСА

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, АРМИРОВАННЫХ
КАРБИДОКРЕМНИЕВЫМИ ЧАСТИЦАМИ**

Специальность 05.16.02 – Metallургия черных,
цветных и редких металлов

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

Санкт-Петербург - 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Владимир Юрьевич Бажин

Официальные оппоненты:

Ворожцов Александр Борисович

доктор физико-математических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», проректор по научной и инновационной деятельности

Скачков Владимир Михайлович

кандидат химических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт химии твердого тела Уральского отделения Российской Академии Наук», старший научный сотрудник лаборатории химии гетерогенных процессов

Ведущая организация - федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Защита диссертации состоится 28 ноября 2019 в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.03 Санкт-Петербургского горного университета по адресу:

199106, г. Санкт-Петербург, 21 линия, дом. 2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского Горного университета и на сайте www.spmi.ru

Автореферат разослан 27 сентября 2019 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета

БОДУЭН
Анна Ярославна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время активно развиваются технологии производства высокопрочных алюминиевых сплавов со встроенными композиционными соединениями и керамическими материалами, которые при армировании матрицы приобретают улучшенные механические характеристики при заданном уровне пластичности. Существуют технологии модифицирования сплавов керамическими материалами и такими соединениями, как B_4C , AlC_3 , Al_2O_3 , которые не обеспечивают необходимые эксплуатационные характеристики для литейной продукции и заготовок.

Значительный вклад в развитие теории и практики разработки технологий получения алюмо-матричных композиционных материалов и армированных лигатур на основе алюминия внесли российские специалисты Гаврилин И.В., Панфилов А.В., Кечин В.А., Панфилов А.А., Чернышева Т.А., Калашников И.Е., Косников Г.А., Крушенко Г.Г., Амосов А.П., Добаткин В.И., Напалков В.В., Казаков А.А., а также зарубежные ученые Кавалла Р., Гупта М., Уильямс Ж.А., Томас А.Т.

Особенностями технологии получения литых АМКС, разработанных специалистами владимирской и московской научных школ (НИТУ МИСИС) является получение многокомпонентных армированных алюмо-матричных сплавов, упрочненных, помимо карбида титана и кремния, боридами, нитридами, оксидами металлов и др. Существуют запатентованные решения для композиционных сплавов, разработанные специалистами российских институтов ОАО «РУСАЛ ВАМИ», институт «ВИАМ», ОАО «ВИЛС», а также комплексные исследования зарубежных крупных компаний Alcoa, Century Aluminum, Kaiser Aluminum.

В соответствии со Стратегией развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года (Распоряжение №2914-р Правительства РФ от 22.12.18) приоритетным является решение вопросов снижения экологической нагрузки и влияния техногенных отходов при применении новых типов материалов на стыке отраслей. К инновационным технологиям относятся методы и способы получения сплавов и лигатур с использованием отходов крем-

ниевое, алюминиевое и магниевое производства, которые неэффективно используются в различных отраслях. Одним из перспективных решений для армирования алюминиевых сплавов является использование карбидокремниевое наполнителя в виде предварительно обработанных отходов футеровки электролизного производства, когда одновременно решаются вопросы, связанные со снижением экологической нагрузки.

Решение широкого круга неизученных вопросов, связанных с использованием для армирования сплавов частиц карбида кремния, полученных из отходов боковой футеровки алюминиевых электролизеров, может способствовать повышению уровня механических свойств и качества литых изделий из алюминиевых сплавов.

Цель работы. Повышение эффективности технологии производства алюмоматричных сплавов с высоким уровнем механических свойств, модифицированных лигатурами, содержащими частицы карбида кремния, из переработанных отходов боковой футеровки алюминиевых электролизеров.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи исследования:

– Выявление закономерностей для обеспечения рациональных условий ввода предварительно обработанных в магниевом расплаве карбидокремниевых частиц при сохранении максимального уровня смачиваемости для их равномерного распределения в алюминиевой матрице лигатуры и в сплаве Al-Mg-SiC.

– Изучение влияния композиции фтористых солей, находящихся в смеси с порошковыми отходами карбидокремниевой футеровки электролизеров, на режимы плавления и кристаллизации алюмо-матричного сплава.

– Исследование комплекса механических свойств (предел прочности, пластичность, твердость, ударная вязкость, изгиб) литых заготовок Al-Mg-SiC, полученных из сплавов, модифицированных лигатурами, содержащими карбидокремниевые частицы в зависимости от условий литья и содержания карбидокремниевых частиц в алюминиевом расплаве.

– Обоснование технологии и алгоритма получения высококачественных алюмо-матричных алюминиевых лигатур армированных частицами SiC, предварительно покрытых магнием.

Научная новизна работы:

1. Получены закономерности распределения по крупности зерна для частиц фторидов и частиц SiC после их механической обработки и активации, произведенных из дробленной карбидокремниевой футеровки алюминиевых электролизеров (до и после сплавления с магнием).

2. Определен уровень смачиваемости, площадь покрытия и состояние поверхности до и после обработки частиц SiC магниевым расплавом, и обоснованы условия для их последующего ввода в алюминиевую матрицу.

3. Выявлено влияние содержания магния и карбида кремния на структуру и механические свойства заготовок, а также выявлен уровень анизотропии лигатур, армированных фторированными частицами SiC, предварительно покрытых магнием.

Основные защищаемые положения:

1. Максимальная смачиваемость и покрытие поверхности частиц карбидокремния магниевым расплавом на уровне 75-85% обеспечивается при их размере 400-600 мкм, при содержании фторида натрия – 1,5%, фторида кальция – 0,5%, фторида алюминия – 2,2%, при температуре процесса 620-650°C.

2. Равномерное распределение предварительно обработанных SiC частиц в алюминиевой матрице лигатуры достигается при их концентрации в расплаве 12-16 мас.%, что обеспечивает высокий уровень механических свойств при снижении пористости.

Методология и методы исследования.

Для упорядочивания размерности карбидокремниевых частиц и фтористых солей после подготовки, измельчения и дробления отходов карбидокремниевой футеровки алюминиевых электролизеров проводили классификацию частиц при контроле размерности частиц в диапазоне измерений 100-1000 μm , при помощи Mastersizer 2000 ver 5.60.

Для определения химического состава частиц, лигатур и сплавов использовался рентгенофлуоресцентный, атомно-эмиссионный анализ, спектральный анализ (PANalytical® Epsilon3).

Анализ формы и площади поверхности частиц карбида кремния до и после их обработки в магниевом расплаве, проводили с помощью анализатора площади поверхности Quantachrome Nova 3200e, при использовании метода БЭТ.

Механические испытания полученных образцов алюмоматричных сплавов (σ_b , $\sigma_{0,2}$, δ , HBW) при согласовании со структурными изменениями на макро- и микроуровне были выполнены в лаборатории Эфиопского технического университета на разрывных машинах и динамическом микротвердомере DUH-211S (SHIMADZU, Япония).

Электронно-рентгеноскопическое и структурное исследование образцов алюмоматричных сплавов для анализа распределения карбидокремниевых частиц в объеме алюминиевой матрицы выполнено при использовании сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 3 LMN с цифровой приставкой.

Проведен комплекс экспериментов на специальном лабораторном стенде в варьируемых технологических условиях. Технические измерения осуществлялись на аттестованных приборах.

Математическое моделирование и обработка результатов опытов выполнено с применением современных программных пакетов ANSYS.15, Statistica.6, MatCad.12.

Теоретическая и практическая значимость работы: Разработка и внедрение технологии производства высокопрочных алюминиевых сплавов с заданными уровнем свойств, модифицированных карбидокремниевыми частицами, выполненными из предварительно обработанных магниевым расплавом порошковой смеси карбидокремниевых частиц SiC и фтористых солей ($AlF_3+CaF_2+NaF+MgF_2$).

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций обусловлена использованием современных технических средств измерений, вновь созданных экспериментальных установок и обобщение результатов проведенных промышленных испытаний.

Апробация работы: Неделя науки-2016 в рамках 6-ой Международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 2016); VII Всероссийская научно-практическая конференции с международным участием, посвященная 55-летию кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутск, 19–20 апреля 2017 г; VI International Conference on Industrial & Hazardous Waste Management (Международная конференция, Греция, 2018); 10-ый Российско-Германский Форум (Потсдам, Германия, 2018).

Личный вклад автора заключается в определении целей и задач исследования, обосновании направления аналитических исследований, теоретической и методической проработке выбранного направления исследований, выполнении экспериментальных лабораторных исследований, в обработке и анализе полученных результатов исследования, новых технических решений для получения уникальных свойств алюминиевых композиционных сплавов, а также подготовке материалов к публикации в ведущих российских и зарубежных изданиях.

Публикации: Основные положения работы опубликованы в 8 печатных работах, в том числе, в изданиях индексируемых в базе данных ВАК – 4, из которых 3 в международной базе данных SCOPUS.

Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 103 страницах. Содержит 35 рисунков, 15 таблиц, список литературы из 102 источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении выполнен краткий аналитический обзор в области производства алюмоматричных композиционных сплавов и лигатур, обоснована актуальность исследований, сформулированы цель и задачи работы, определены научная новизна и практическая значимость результатов и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ характеристик алюминиевых сплавов, рассмотрены возможности армирования для алюминии-

евых сплавов, технологии процессов для получения лигатур алюминиевых металлматричных композитов, обоснован выбор армирования карбидом кремния, исследовано влияние размера частиц и их распределения на механические свойства получаемых алюмоматричных сплавов.

Во второй главе обоснован выбор способов подготовки карбидокремниевых частиц из отходов боковой футеровки электролизёров.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований гранулометрического состава частиц до и после их обработки в магниевом расплаве. Проведен анализ состояния поверхности частиц SiC и изучена площадь покрытия частиц для определения уровня смачиваемости в магниевом расплаве.

В четвертой главе приведены и обоснованы результаты электронной микроскопии до и после ввода предварительно обработанных частиц в алюминиевую матрицу. Разработана и научно обоснована технологическая схема процесса производства алюмоматричных сплавов с карбидокремниевым каркасом.

В заключении приводится обобщение полученных результатов, выводы и рекомендации по материалам выполненных исследований и разработок.

Основные результаты исследований отражены в следующих защищаемых положениях.

1. Максимальная смачиваемость и покрытие поверхности частиц карбидокремния магниевым расплавом на уровне 75-85% обеспечивается при их размере 400-600 мкм, при содержании фторида натрия – 1,5%, фторида кальция – 0,5%, фторида алюминия – 2,2%, при температуре процесса 620-650°С.

Использование отходов футеровки, пропитанной фтористыми солями (AlF_3 , NaF , CaF_2 , MgF_2), после механической обработки может существенно изменить свойства сплавов и улучшить свойства изделий и заготовок. При вводе в алюминиевый расплав дробленых и классифицированных по размеру частиц 450-750 мкм, при присутствии стандартных флюсов в виде фторидов, не достигается достаточного уровня распределения частиц в алюминиевой матрице. Причиной является образование на границе контакта поверхности

частиц SiC с оксидной пленкой Al_2O_3 , которая возникает в результате внутренней газовой пористости.

Предлагаемый технологический процесс включает несколько подготовительных этапов, один из которых состоит в предварительной обработке карбидокремниевых частиц (дробление и измельчение карбидокремниевой футеровки из отключенных алюминиевых электролизеров, пропитанной фтористыми солями); классификации частиц SiC и фтористых солей на ситах по заданному размеру; получении промежуточной магниевой лигатуры с покрытыми пленкой карбидокремниевыми частицами.

Распределение частиц по размерам (рисунок 1) анализировали с помощью Mastersizer 2000 ver 5.60. Смесь SiC-Mg после обработки в расплаве содержит частицы с размерами в диапазоне от $120\mu m$ к $2400\mu m$.

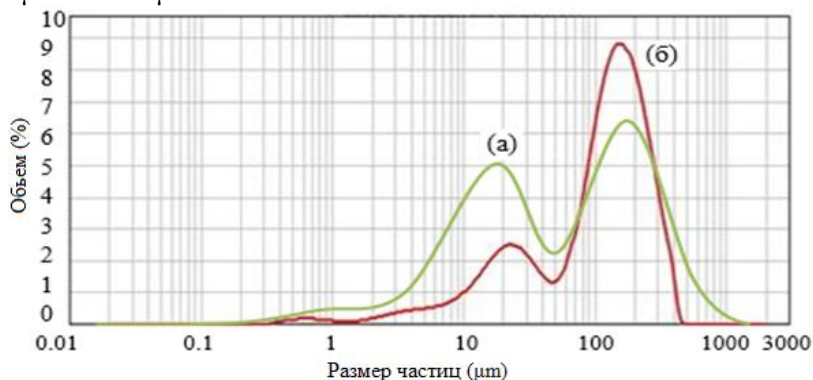


Рисунок 1 - Распределение частиц по размерам после классификации: а – дробленых; б – обработанных в расплаве SiC-Mg

Изучали частицы, имеющие следующий состав лигатуры: $8\% SiC + 1.5\% Mg$ и $12\text{ мас.}\% SiC + 2Mg$. На рисунке 2 (а) и (б) показаны различные уровни адсорбции магния на поверхности карбидокремниевых частиц, т.е. степень покрытия частиц, которое в целом является линейным с положительным уклоном. Нелинейный уровень десорбции указывает на то, что существуют частицы с низким уровнем смачиваемости магниевым расплавом.

Видно, что состав промежуточной лигатуры 8%SiC+1.5%Mg имеет более стабильные показатели и минимальные расхождения в уровне адсорбции и десорбции.

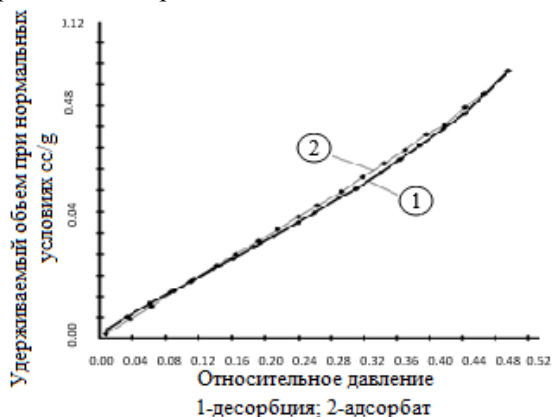


Рисунок 2 - (а) Состав композита 8%SiC+1.5%Mg

Кроме этого, изучали структурные особенности и характер распределения предварительно подготовленной порошковой смеси из частиц SiC и фторидов, и форму частиц в промежуточной магниевой лигатуре, которые далее анализировали с помощью РФА анализа. В структуре (рисунок 3) видны очаги скопления флюсового материала при слипании частиц, особенно таких, как NaF и AlF₃. Наличие флюсовой композиции в дальнейшем при растворении лигатуры то показано на рисунке 3.

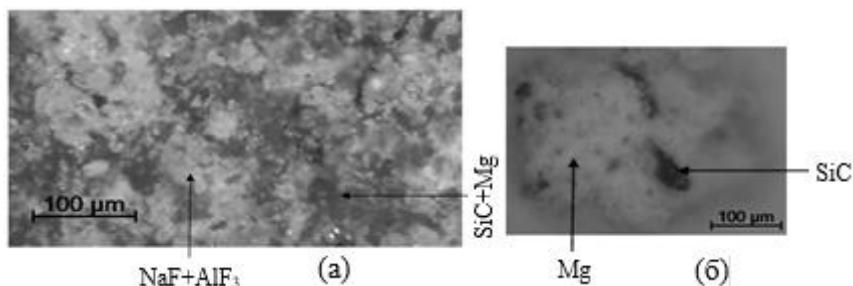


Рисунок 3 - Микроструктура смеси SiC+Mg вместе фтористыми солями футеровки (а), и частица в промежуточной лигатуре SiC-Mg (б)

В результате установлено, что для составов 8%SiC+1.5%Mg 12%SiC+2%Mg наблюдается высокий уровень смачиваемости (75-85%).

Установлено, что флюсовая композиция, входящая в состав порошковой смеси, улучшает смачиваемость, и, как следствие, укрепляет связи материала с магнием.

Доказано, что магний, который был выбран в качестве наиболее эффективного смачивающего агента, удовлетворяет вышеуказанным условиям и снижает образование оксидов алюминия на поверхности SiC частиц. Схема покрытия поверхности частиц SiC магнием представлена на рисунке 4.

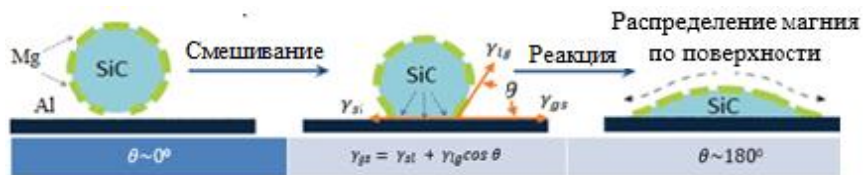


Рисунок 4 - Схема покрытия поверхности частиц SiC магнием

При РФА анализе некоторых участков было выявлено, что максимальная смачиваемость и покрытие поверхности частиц карбидокремния магниевым расплавом на уровне 75-85% обеспечивается при их размере 400-600 мкм, с содержанием флюсовой композиции NaF – 1,5%, CaF₂ – 0,5%, AlF₃ – 2,2%.

2. Равномерное распределение предварительно обработанных SiC частиц в алюминиевой матрице лигатуры достигается при их концентрации в расплаве 12-16 мас.%, что обеспечивает высокий уровень механических свойств при снижении пористости.

Для обоснования влияния состава композита с механическими свойствами литых заготовок нужно определить возникающие структурные образования при вводе SiC непосредственно в расплав алюминия (при изменении содержания Mg) проведен энергодисперсионный рентгеновский спектроскопический (ЭЦП), и сканирующий электронно-микроскопический анализ композиционного мате-

риала (промежуточной лигатуры), содержащего различные составы карбида кремния и магния, для оценки характера распределения частиц в алюминиевой матрице, при минимальной дисперсии сформировавшихся эвтектик.

Электронно-микроскопический анализ подтверждает, что частицы магния и карбида кремния присутствуют внутри алюмоматичного сплава после ввода лигатуры, что соответствует полученным пикам с различной массовой долей Al и SiC+ Mg лигатуры. Результаты анализа также подтверждают равномерное распределение частиц карбида кремния с магниевым покрытием в алюминиевой матрице, что подтверждается соотношением площади и формой поверхностной структуры, расположенной вокруг частицы карбида кремния (рисунок 5а).

| Элемент | Масс. | Атом. |
|---------|--------|-------|
| | % | вес % |
| Al K | 98,32 | 98,28 |
| Mg K | 0,50 | 0,65 |
| Si K | 0,59 | 0,51 |
| C | 0,59 | 0,56 |
| Итоги | 100,00 | |

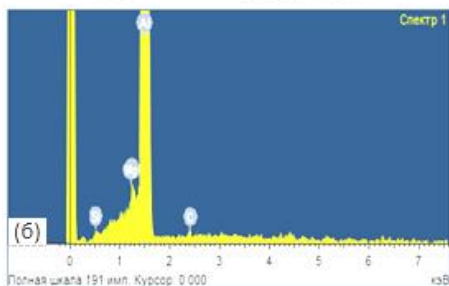
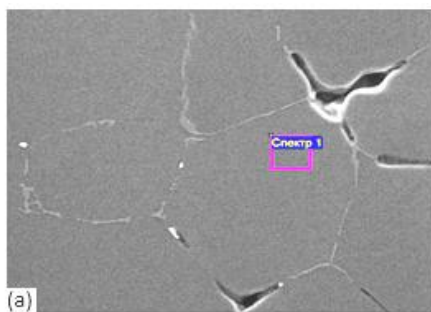


Рисунок 5 - Электронное изображение поверхности композитов (а) и спектры определенных элементов (б) (проб.1)

Расчеты показали, что отклонение по площади армированных частиц между собой составляет 8-10%. Видно, что микрострук-

тура образующегося КММ представлена матрицей на основе алюминия, которая упрочнена каркасом из Al+Mg лигатуры. Электронное изображение поверхности композитов показывает, что при вводе первых порций композита в алюминии, когда лигатура SiC+Mg вступает в контакт, образуются зародыши эвтектических соединений, сопровождающиеся дроблением колоний матрицы с постепенным формированием равномерной структуры вокруг центра кристаллизации, т.е. SiC- частицы.

Анализ показал, что достигнут высокий уровень смачиваемости частиц SiC с магнием, которые в отличие от чистых карбидокремниевых частиц имеют более тесный контакт с матричным материалом. Таким образом, это взаимодействие позволяет увеличить поверхностную энергию твердого тела частицы, и снизить поверхностное натяжение и межфазную энергию на границе твердожидкого состояния для получения лучшего механического свойства композитов.

На рисунке 5а видно, что Mg покрыт частицами SiC. Несмотря на то, что с увеличением массовой доли магния происходит увеличение размера зерна, смачиваемость между матрицей и армированной частицей также повышается. Во всем объеме изучаемой площади не обнаружено кластеризации, но во всех случаях частицы карбида кремния, покрытые магнием, и частицы карбида кремния имеют более тесный контакт с матричным материалом.

Отливку и прокатку алюмоматричного сплава проводили в жидко-твердом состоянии при температуре 665-675°C с получением пластин, которые впоследствии обрабатывались и направлялись на анализ структуры и свойств. На рисунке 6 представлена схема получения пластины (образца), и показан пример тестового испытания заготовки из алюмо-матричного сплава на изгиб.

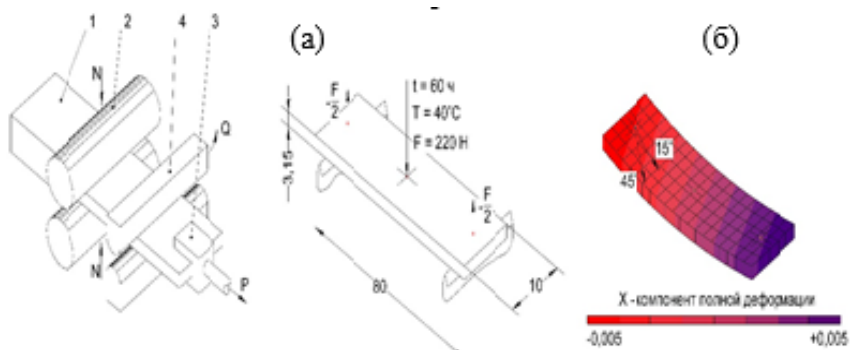


Рисунок 6 - Схема (а) получения пластины Al–Mg–SiC (образца) в валах-кристаллизаторах: 1 – ж-т расплав, 2 – валок-кристаллизатор; 3- механизм прокатки; 4 – формирование заготовки; и (б) пример испытания образца на изгиб (Эфиопия)

Полученные образцы направляли на сканирование с использованием электронного микроскопа TESCAN VEGA 3 LMN с цифровой приставкой. Результаты анализа сканирующей микроскопии показали, что равномерное распределение частиц (рисунок 7), достигается при уровне смачиваемости частиц SiC магнием в интервале 75-85%, что подтверждает выбранный химический состав порошковой смеси с заданным содержанием магния в лигатуре.

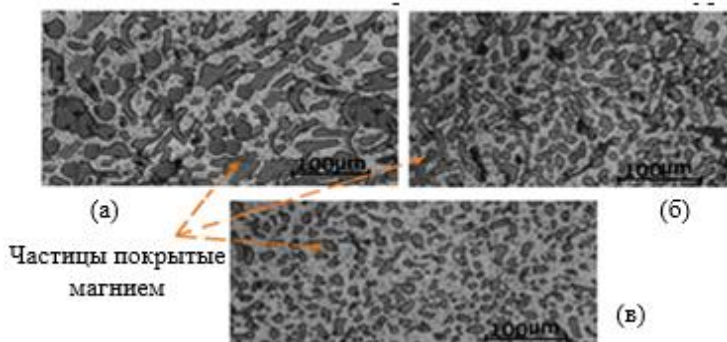


Рисунок 7 - Микроструктура алюмо-матричного сплава Al-Mg-SiC

Анализ микроструктуры (x1000) показал, что сохраняется хорошая межфазная связь при армировании алюминиевой матрицы.

Это наиболее важный фактор для получения высоких механических свойств композитных материалов, который доказывает, что приращение давления сжатия во время механических испытаний при уменьшении размера зерен с низкой пористостью, в итоге, предотвращает промежуточное фазообразование из карбидов, например, таких как карбид алюминия (Al_4C_3). Отмечено, что для лигатуры, имеющей повышенную концентрацию частиц $20\%SiC+3\%Mg$, твердость снижается, причем разность значений этого показателя указывает на ликвационную неоднородность заготовки, особенно по ее краям. По-видимому, это является результатом увеличения массовой доли армированных частиц в алюминиевой матрице при избыточном давлении во время литья и прокатки сплава в валках-кристаллизаторах.

В ходе испытаний механических свойств алюмо-матричных пластин установлено, что при увеличении концентрации армирующих частиц происходит повышение предела прочности на растяжение по сравнению с предельным значением прочности на разрыв для подобных образцов чистого алюминия или сплавов группы 6XXX, что соответствует ранее полученным результатам исследований. Твердость и предел прочности на разрыв при согласовании со структурными показателями полученных лигатур, могут быть критериями оптимизации концентрации карбидокремния в алюминиевой матрице. На рисунке 8 показано увеличение предела прочности на растяжение для различных составов лигатур при увеличении количества частиц $Mg-SiC$. При этом достигается значение максимального предела прочности на растяжение $180-185MPa$, что в 3-4 раза выше, чем для стандартного сплава 6XXX и Al марки A7.

В этом случае при вводе магния с другими порошковыми материалами, такими как криолит, фторид кальция и магния, обеспечивается устойчивое формирование структуры при соответствии с заданными значениями механических свойств. При этом, как было отмечено, кремний повышает образование интерметаллического компонента (Mg_2Si) при формировании межзеренных эвтектических прослоек в алюминиевой матрице. Межфазный слой образуется при реакции между материалом матрицы с поверхностью покрытых магнием частиц карбида кремния. Эти превращения формируют

устойчивый каркас и создают условия для максимальных значений прочности (160-185 МПа). Однако, при анализе микроструктуры отмечаются локальные разрушения в слоях алюминиевой матрицы при увеличении содержания SiC и Mg выше значений Al+16% SiC+2,5Mg, что приводит к снижению предела прочности и деформации разрушения.

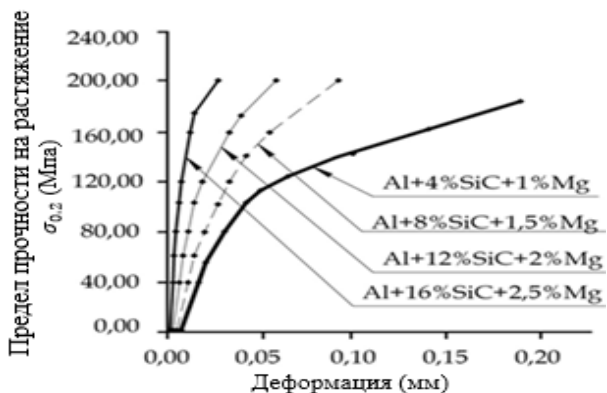


Рисунок 8 - Результаты напряженно-деформированного Состояния образца Al-SiC-Mg

Кривые нагруженного состояния сплава, зарегистрированные для всех тестируемых образцов, показали, что алюминиевые сплавы, армированные частицами SiC с покрытием Mg, имеют лучшие показатели, чем SiC без покрытия магнием.

Для проведения анализа внутренней ликвации элементов при согласовании с макроструктурой в поперечном разрезе, и для определения характера распределения частиц в микробъеме алюминия были проведены 4 тестовых испытания. Для каждого состава алюмо-матричного сплава были зарегистрированы соответствующие кривые отклонения при нагрузке. Результат теста показал улучшение прочности для всех составов усиленных (армированных) частицами SiC покрытыми магнием.

Установлено оптимальное содержание частиц SiC-Mg, при котором лигатурные пластины имеют высокие механические свойства на изгиб, составляет Al+12% SiC.

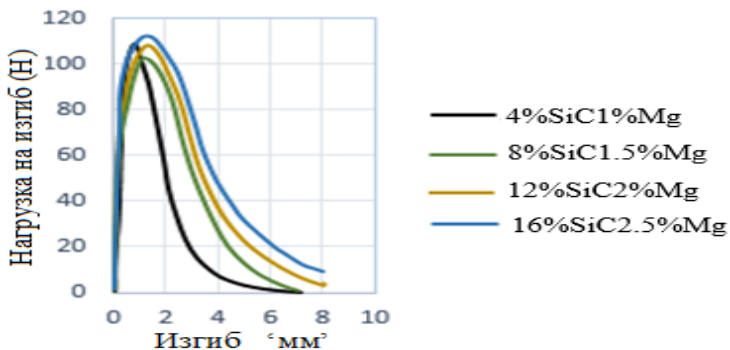


Рисунок 9 - Зависимость величины изгиба от прилагаемой нагрузки на образцы алюмо-матричного сплава

Для алюмо-матричных пластин, содержащих 20% SiC и 3% Mg, твердость имеет самые низкие показатели. При испытании была получена большая вариация значений по твердости в различных точках пластины, что указывает на высокую степень ликвации карбидокремниевых частиц в алюминиевой матрице для некоторых составов. Также эти значения указывают на наличие пористости, которая является результатом соотношения твердой и хрупкой фаз частиц в объеме матрицы. Данные полученных испытаний приведены на рисунке 10.

Результат показал, что значения плотности лигатуры Al-Mg-SiC находятся при пределах содержания частиц SiC от 8 до 12 мас.%. При более высоких значениях содержания армированных частиц значения плотности имеют более низкий уровень, что указывает на наличие прослоек на поверхности раздела между матрицей и частицами, которые могут иметь высокий уровень, особенно с армированным материалом матриц неправильной формы.

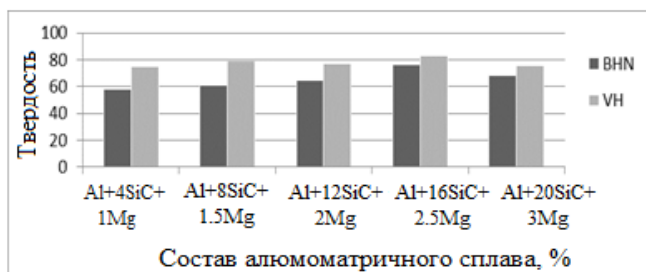


Рисунок 10 - Результаты испытаний на микротвердость для различных химических составов сплава

Несмотря на положительный эффект ввода карбидокремневых частиц, покрытых магнием в комбинации с флюсовой композицией, входящей в состав пропитанной боковой футеровки алюминиевых ванн, во время проведения экспериментов выявлено, что избыточные концентрации вызывают большое количество дефектов во время литья сплава. Поскольку содержание твердых частиц не может быть выше 20 мас.% SiC и 2.5 мас.% Mg, то уровень пористости определяется уровнем смачиваемости между матрицей и частицами карбида кремния. Установлено, что оптимальное содержание SiC и Mg добавок к алюминию составляет 10-16 мас.% SiC и 1,8-2.4 мас.% магния, при которых алюмо-матричный сплав имеет высокие механические свойства.

Экономические показатели технологии

Технико-экономические расчеты показали целесообразность и преимущества использования отходов карбидо-кремневой футеровки в качестве армирующего материала в алюминиевых сплавах для производства ответственных деталей в автомобильной промышленности и машиностроении. Себестоимость изготовления композиционных лигатур такого типа снижается на 20-25%, так как цена на чистые порошки карбида кремния размером 320 мкм и чистотой 98% составляет 600-700\$ за тонну, против 100\$ за тонну отработанной карбидокремневой футеровки электролизёра. Кроме этого, экономия достигается за счет отсутствия необходимости ввода флюсовых дорогостоящих добавок при операциях рафинирования, за счет того, что в составе пропитанной футеровки имеются

фтористые соли Na, Ca, Al и Mg, что приводит к снижению температуры ликвидуса, и обеспечиваются условия для равномерного распределения частиц в микрообъеме лигатуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплекс исследований, связанных с разработкой технических решений для создания технологии получения алюмоматричных сплавов Al–Mg–SiC позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Предварительное смешение SiC частиц в потоке магниевого расплава в виде промежуточной лигатуры создает устойчивое покрытие поверхности частиц (75-85%), и определяет условия для равномерного распределения в алюминиевом сплаве без оксидов.

2. Флюсовая композиция (AlF₃, NaF, CaF₂, MgF₂), входящая в состав отходов боковой футеровки алюминиевых электролизеров в количестве 8-12% обеспечивает эффективный отвод через шлакообразование оксидов и неметаллических включений в процессе сплавления промежуточной лигатуры Mg-SiC с алюминием.

3. Доказано, что смачиваемость между расплавом Al и магнием с частицами SiC снижается за счет изменения поверхностного натяжения алюминиевой матрице.

4. Экспериментальные исследования механических свойств показали, что пластичность образцов при изменении содержания магния и карбида кремния обратно пропорциональна прочности материала. Рациональное содержание армированных частиц в алюмоматричном сплаве составляет 10-12% SiC, и не более 2.5% Mg.

5. Микроструктурные характеристики лигатур указывают на равномерное распределение частиц SiC-Mg и хорошую межфазную связь армированных частиц с алюминиевой матрицей, которые являются наиболее важным фактором для получения высоких механических свойств алюмоматричных сплавов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих печатных работах:

1. Gutema E.M. Review on nano particle reinforced aluminum metal matrix composites / E.M. Gutema, V.Yu. Bazhin, S.A. Savchenkov // *Research Journal of Applied Sciences*. 2016, Vol. 11, №.5. P. 188-196.

2. Гутема Е.М. Особенности технологии производства алюмоматричных сплавов с карбидокремниевым каркасом / В.Ю. Бажин, Е.М. Гутема, С.А. Савченков // *Металлург*, 2016. № 12. С.45-52.

3. Gutema E.M. Hardness of aluminum metal matrix composite reinforced with magnesium coated particles of silicon carbide-squeeze casting / E.M. Gutema, V.Yu. Bazhin // *Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects*. By edition V.S. Litvinenko. CRC Press, Taylor & Francis Group. 2018. P. 383-391.

4. Гутема Е.М. Влияние уровня смачиваемости карбидокремниевых частиц магнием в алюминиевых композиционных лигатурах на их механические свойства / Е.М. Гутема, В.Ю. Бажин // *Вестник ИРГТУ, Иркутск: №1.2019. С. 211-221.*

5. Гутема Е.М. Формирование структуры и свойств алюминиевых сплавов армированных карбидокремниевый наночастицами / Е.М. Гутема, С.А. Савченков, В.Ю. Бажин // *Сборник тезисов VI научно технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Неделя науки – 2016»*. Санкт-Петербург. 2016, С. 249.

6. Gutema E.M. Properties of aluminum metal matrix composites reinforced by particles of silicon carbide using powder metallurgy / E.M. Gutema, V.Yu. Bazhin // *Metallurgical and mining industry. Scientific and Technical Agency*. 2017. Vol. 2. P.46-51.

7. Гутема Е.М. Армирование алюминия наночастицами карбида кремния / Е.М. Гутема, В.Ю. Бажин // *VII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, посвященная 55-летию кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутск, 19-20 апреля 2017 г С. 56-57.*

8. Fedorov S.N. Complex treatment to solve the problems of utilization and prolongation of the aluminum pot lining life cycle / S.N. Fedorov, E.M. Gutema, V.Yu. Bazhin and E.S. Gorlanov // *VI International Conference on Industrial & Hazardous Waste Management*, 2018. P. 1-8.

9. Gutema E. M. Wettability enhancement of aluminum metal matrix composite reinforced with magnesium coated silicon carbide particles / E. M Gutema, V. Yu. Bazhin, S. N. Fedorov // *Conference MEACS 2018*, С. 67-75.