

На правах рукописи

Алаттар Абоелкхаир Лоан Абоелкхаир



**ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЫШЕННЫХ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ
СИСТЕМЫ Al-Cu**

*Специальность 05.16.02 – Metallургия чёрных,
цветных и редких металлов*

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

Санкт-Петербург – 2022

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Бажин Владимир Юрьевич

Официальные оппоненты:

Беляев Сергей Владимирович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», кафедра литейного производства, заведующий кафедрой;

Ибрагимов Владислав Эдуардович

кандидат технических наук, акционерное общество «Центральное конструкторское бюро машиностроения», начальник заготовительного цеха;

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

Защита диссертации состоится 22 июня 2022 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.03 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.
Автореферат разослан 22 апреля 2022 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



БОДУЭН
Анна Ярославовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В последнее время сохраняется устойчивая тенденция использования композиционных алюмоматричных сплавов и лигатур, и изделий, которые имеют уникальные механические свойства и высокие эксплуатационные характеристики для использования в различных отраслях промышленности, не уступающие подобным по форме и конструкции стальным заготовкам. Известны исследования композиционных материалов КМ на основе алюминиевых сплавов, армированных частицами SiC, Al₂O₃, которые показывают возможность разработки новых сплавов с более высоким комплексом свойств. Также, существуют технологии ввода в расплав таких соединений, как SiO₂, BN, Si₃N₄, которые имеют более низкий коэффициент термического расширения КТР, чем кремний (менее $4,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), высокоразвитую поверхность и плотность, что позволяет использовать их в качестве армирующих частиц.

При модифицировании алюминиевых сплавов керамическими материалами (оксидами, карбидами и нитридами) могут проявляться недостатки, выраженные в дефектах структуры, и такими отклонениями, как водородная пористость, нестабильность структуры и ее неоднородность. Причиной негативных явлений принято считать низкую смачиваемость частиц расплавом, различное значение плотности частиц, и их ликвацию в матрице. Для стабилизации характеристик и свойств композитных сплавов, требуются разработки новых технологий и технических решений, способствующих повышению качества сплавов и высокому выходу годной продукции, для поиска принципиально новых конструкционных материалов со специальными свойствами.

Объектом исследования является технология производства высокопрочных алюминиевых сплавов легированных медью Al-Cu при вводе частиц карбида бора, а предметом исследования - заготовки из композиционного материала системы Al-Cu-B₄C. Перспективны для внедрения в массовое производство технологии композиционных сплавов на основе жаропрочной и

теплопроводной матрицы с внедрением в нее армирующих частиц, имеющих более низкое термическое расширение (КТР) и плотность по сравнению с материалом матрицы.

Актуальной является разработка экономически эффективной технологии производства алюминиевых сплавов системы Al-Cu-В₄C с равномерной структурой и высокими механическими свойствами для эксплуатации изделий в экстремальных условиях и химически агрессивных средах.

Степень разработанности темы исследования.

Известны разработки АО ВИЛС, АО ВАМИ, НИТУ МИСИС, ФГУП ВИАМ, Института твердого тела УрО РАН, Института силикатов Санкт-Петербургского отделения РАН, и зарубежных компаний Rio Tinto Alcan, Moltech, Hydro Aluminium и др.

Значительный вклад в развитие теории и практики разработки технологий получения матричных композиционных сплавов на основе алюминия внесли российские специалисты и ученые: Напалков В.И., Александровский С.В., Сандлер Р.А., Добаткин Л.Н., Сизяков В.М., Бажин В.Ю., Ворожцов А.Б., Белов Н.А., Алабин А.А., Панфилов А.В., Амосов А.П., Кечин В.А., Солнцев Ю.П., Жуков А.А., а также зарубежные ученые Flemings M. Dmschusterrp R., Weisinger M.D., McDanels, R.W. Jech, Weeton J.W., Eshelby J.D.

Выполненное исследование соответствует Стратегии развития минерально-сырьевой базы РФ до 2035 года, где приоритетным является решение вопросов по созданию и применению новых типов материалов на стыке различных направлений наук. Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности по пунктам: п 2. «Твердое и жидкое состояние металлических, оксидных, сульфидных, хлоридных систем», п 5. «Металлургические системы и коллективное поведение в них различных элементов», п 7. «Тепло- и массоперенос в низко- и высокотемпературных процессах», п 8. «Кристаллизация расплавов».

Цель работы. Разработка технологии производства заготовок с высокими теплофизическими и механическими

характеристиками из композиционных алюминиевых сплавов системы Al-Cu при вводе частиц карбида бора.

Для достижения цели работы были поставлены и последовательно решены следующие **задачи**:

- Аналитическое исследование особенностей модифицирования алюминиевых сплавов керамическими частицами различного типа и состава. Научное обоснование выбора карбида бора в качестве основных армирующих частиц для алюминиевого сплава Al-Cu;

- Патентное исследование технологии производств композиционных материалов при вводе керамических частиц различного количества и состава;

- Выбор условий предварительной подготовки и нагрева частиц карбида бора B_4C , и обоснование скорости перемешивания и температурного режима при их вводе в расплав;

- Изучение закономерностей формирования структуры композиционного сплава при вводе карбида бора с содержанием частиц в расплаве в интервале 2-7%;

- Исследование микроструктурных изменений алюмо-матричных композитных заготовок, полученных совмещенным способом литья и штамповки, при их последующей термической обработке заготовки;

- Изучение механических свойств заготовок (предел прочности на разрыв, относительное удлинение, микротвердость по Виккерсу), полученных при различных технологических режимах.

Научная новизна работы.

Научно обоснован выбор ввода частиц карбида бора в матрицу алюминиевого сплава Al-5%Cu при различных параметрах литья:

- При изучении влияния различных скоростей перемешивания расплава на показатель пористости и уровень ликвации обнаружено, что при скорости вращения мешалки от 360 до 410 оборотов в минуту, обеспечивается наиболее равномерное распределение частиц в расплаве.

- Изучены закономерности влияния технологических параметров при вводе керамических частиц B_4C в алюминиевый

сплав на микроструктуру, тепловое расширение, и механические свойства сплава Al-5%Cu, полученных предварительным механическим перемешиванием частиц, литьем и последующей кристаллизацией под давлением при штамповке в состоянии жидко-твердой фазы;

- Доказано, что кристаллизация под давлением (совмещенный способ литья и штамповки) после механического перемешивания частиц В₄С приводит к значительному снижению водородной пористости, низкой ликвации, и образованию интерметаллических фаз со смачиваемостью 80-90% на границе раздела «матрица-частица».

- При микроструктурном исследовании установлено, что во время кристаллизации расплава в жидко-твердом состоянии, образующиеся и растущие дендриты смещают частицы карбида бора в глубину матрицы по краям эвтектик.

- Установлено, что предварительная термическая обработка карбида бора в температурном интервале 220-250 оС обеспечивает равномерное распределение армирующих частиц в микрообъеме матрицы, что приводит к однородности микроструктуры, и улучшению механических свойств.

- Образцы сплава, полученные методом совмещенного литья и штамповки, на основе матрицы Al-5% Cu при вводе частиц В₄С до 5%, имеют более высокие (по сравнению со сплавом, взятым за основу) показатели микротвердости (113-115 НV), и значения предела прочности на растяжение (~180 МПа).

Теоретическая и практическая значимость работы

Разработана и научно-обоснована технология производства высокопрочных алюминиевых сплавов с заданным уровнем свойств (Патент РФ № 2750658), модифицированных частицами карбида бора. Разработанный способ получения композиционного сплава позволяет получить образцы, которые имеют более высокий предел текучести, чем у изделий из стандартного поршневого силумина АК12ММгН ($\sigma_{0,2} = 221$ МПа), что дает возможность замены некоторых деталей из силумина в машиностроительной и автомобильной отрасли Египта, на детали и узлы из новых полученных материалов, произведенных в компании Egypt Aluminum Company (Египетская алюминиевая компания).

Получен акт о внедрении результатов диссертационного исследования, который выдан в 28.01.2022, и подтверждает их использование в учебном процессе кафедры металлургии при изучении дисциплины «Металлургия легких металлов» и «Металлургические технологии производства и обработки металлов», читаемых студентам по направлению подготовки 22.03.02 «Металлургия».

Методология и методы исследований.

Теоретические исследования основаны на физико-химических закономерностях взаимодействия алюминия и композиционных материалов в различных термодинамических условиях. Экспериментальные исследования проводились на специальном лабораторном стенде в различных технологических условиях в Центре переработки минерального сырья и в лабораториях компании *Egypt Aluminum Company*. Предварительный нагрев керамических частиц осуществляли в муфельной печи Moltech. Плавку, литье, и штамповку производили на литейном комплексе Hazellet. Полученные образцы сплавов при различном содержании карбида бора В₄С, подвергали механической обработке и травлению для проведения микроструктурного анализа на сканирующем электронном микроскопе LECO LX 31.), который соединен с камерой (Рах cam) с программным обеспечением для анализа изображений. В ходе исследования проводили механические испытания на растяжение для 4-х образцов размерами 30х60 мм, которые выполняли на разрывных машинах компании «АНАЛИТ» марки «Shimadzu» в соответствии со стандартами ASTM для разного состава композитного сплава. Для микроструктурного анализа использовались СЭМ устройства модели FEI INSPECT S50 и испытания на износ при скольжении, которые производили для различного количества образцов с помощью штифтовой дисковой машины (Wear & Friction Monitor TR-20), компании DUCOM в лаборатории Таббинского института металлургических исследований (Египет).

Основные защищаемые положения.

1. При вводе в алюминиевый сплав Al-Cu (в интервале температур 850-920°С) предварительно подогретых до 250°С частиц карбида бора 5 мас. %, обеспечивается

минимальная водородная пористость 4-6 %, и максимальная смачиваемость частиц композита до 80-90% при сохранении высоких показателей теплопроводности полученных заготовок.

2. В условиях совмещенного литья и штамповки алюмоматричного сплава системы Al-Cu-B₄C, и последующей термообработки заготовки при 270 °С, с выдержкой образцов в течение 9 часов, достигается равномерная мелкозернистая структура заготовок и высокие механические характеристики (предел прочности на разрыв равен 170 МПа, микротвердость 115-120 HV, относительное удлинение 20-25%).

Степень достоверности результатов исследования обусловлена их соответствием известным тенденциям развития производства алюминиевых сплавов, ранее полученным результатам и разработкам, а также доказывается применением высокотехнологичных методов физико-химического анализа и обработки данных.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: Первая международная конференция по материаловедению и применению (ICMSA 2019) Египет, Шарм Эль Шейх 2019; Конференция IOP, Международный семинар - (MIP: Engineering -2019) Красноярск, Россия, 4-6 апрель 2019 г; Конференция The XVI International Forum-Contest of Students and Young Researchers "Topical Issues of Rational Use of Natural Resources", Международный семинар, Санкт-Петербургский Горный Университет, Санкт-Петербург, Россия, 17-19 июня 2020; Конференция II Международный форум «Ключевые тренды в композитах: наука и технологии»; Международный симпозиум "Нанозифика и наноматериалы" Санкт-Петербург, Россия 24-25 ноября 2021.

Личный вклад автора заключается в: построении задач и создании плана исследований, подготовленном литературном обзоре в области направления исследования, проработке методологий, экспериментального лабораторного исследования, обработке полученных данных, предложении нового научно-технического решения по разработке композиционных сплавов системы Al-Cu-B₄C, обосновании целевых свойств заготовок и

подготовке материалов к публикации в российских и зарубежных изданиях.

Публикации по работе. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 7 печатных работах, в том числе в 1 статьях - в издании из перечня рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 151 наименование. Диссертация изложена на 110 страницах машинописного текста, содержит 40 рисунков и 18 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлен краткий аналитический обзор способов производства алюмо-матричных композиционных сплавов и обсуждается влияние на них армирующих добавок (оксиды, нитриды и карбиды); определены цель и задачи, актуальность, научная новизна и практическая значимость исследований, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дано подробное описание различных систем алюминиевых сплавов, их классификация, а также способы формирования металлической или легированной керамическими частицами матрицы, и ее наиболее важные особенности изменения физико-химических свойств. Проведено патентное исследование и научно обоснован выбор частиц карбида бора в качестве основного модификатора матричного сплава.

Во второй главе представлена схема экспериментальной установки, разработаны методики проведения лабораторных и промышленных экспериментов. Составлен план экспериментов. Представлены методики расчета обработки результатов опытов, и

определены особенности и порядок микроструктурного исследования и этапы проведения механических испытаний.

В третьей главе представлены результаты исследований по получению композитных сплавов при вводе карбида бора в сплав Al-Cu. Разработана и научно обоснована технологическая схема процесса получения матрицы из алюминиевого сплава с карбидом бора. Изучены условия ввода частиц карбида бора в расплав, и установлены зависимости и рациональные значения скорости перемешивания, температурных режимов и рационального содержания частиц в алюминиевой матрице.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований по изучению механических свойств заготовок из полученного алюминиевого сплава при вводе частиц карбида бора с различным содержанием 2-7% в расплаве. Определены и обоснованы условия литья и штамповки с последующей термообработкой старением, полученных композитов.

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

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. При вводе в алюминиевый сплав Al-Cu (в интервале температур 850-920°C) предварительно подогретых до 250°C частиц карбида бора 5 мас. %, обеспечивается минимальная водородная пористость 4-6 %, и максимальная смачиваемость частиц композита до 80-90% при сохранении высоких показателей теплопроводности полученных заготовок.

При выполнении данного исследования была использована стандартная методика производства композиционных сплавов на основе Al, где в качестве матричного сплава использовали сплав Al-5%Cu. Карбид бора B₄C со средним размером частиц от 5 - 20 мкм использовался в качестве каркаса матрицы для получения композиционных сплавов с равномерно распределенными центрами кристаллизации. Карбид бора B₄C был выбран благодаря его преимуществам в свойствах, таких, как высокая прочность, низкая плотность (2,52 г/см³), твердость (9,5+ по

шкале Мооса), хорошая химическая стабильность и термостойкость, и смачиваемость при высокоразвитой поверхности частиц, а также абразивную способность. Из-за своей высокой твердости B_4C используется в качестве упрочняющей фазы в композите с алюминиевой матрицей, для которых основным требованием является хорошая износостойкость. Процессы диффузии при участии B_4C протекают медленно, что препятствует свободному спеканию и уплотнению создаваемого сплава. Технологическая схема опытов представлена на рисунке 1.

На рисунке 2 показана зависимость изменения плотности полученного сплава при вводе различных навесок B_4C через питатель. Видно, что плотность расплава постепенно уменьшается, пока не достигает минимального значения при размере частиц карбида бора B_4C 25 мкм, которая в итоге составляет 2,624 г / см³. Поэтому, на основании полученных результатов, для обеспечения равномерной плотности расплава и заготовок, был определен рациональный размер частиц карбида бора 5-15 мкм, поскольку именно в этом интервале наилучшие значения плотности.

Поскольку плотность карбида бора (2,5 г/см³) меньше плотности самого сплава Al-5% Cu (2,651г / см³), общая плотность композитов Al-Cu- B_4C может несколько снижаться. Было изучено по изменению плотности расплава в зависимости от процентного содержания частиц карбида бора в расплаве. Определено, что устойчивые значения плотности расплава достигаются в интервале от 1,8 до 5,5% (рисунок 3). При более низком содержании карбида бора наблюдается высокий уровень ликвации частиц в расплаве Al-Cu, а при повышении содержания частиц в расплаве до 6% происходит образование осадков на дне тигля.

При предварительном нагреве частиц карбида бора для удаления адсорбированной влаги, как показано на рисунке 4, можно обнаружить, что пористость заготовок постепенно снижается, начиная от температуры 250 °С. Этот фактор явился основанием выбора необходимого интервала температур 250-300 °С и заданного времени нагрева, которое составляло 30 минут, чтобы уменьшить водородную пористость до оптимального

значения. В ходе проведенных опытов установлено, что водородная пористость отливки снижается при концентрации частиц карбида бора B_4C равной 5%, а наибольшее ее значение наблюдается при концентрации частиц B_4C – 7-8%.

Доказано в ходе опытов, что большая разница между размерами частиц B_4C (общей площадью их поверхности) и зерном матричного Al, может вызвать агломерацию в зазоре между частицами в течение всего периода смешивания порошка и расплава, как показано на рисунке 5а. При этом при наличии поверхностной влаги снижается контактная поверхность частиц бора в алюминиевой матрице, и возникают участки пор и полости. После оптимизации технологии, режима и скорости перемешивания и сушки, учитывая заданный размер частиц и принцип наполнения Хорсфилда, установлено, что частицы располагаются равномерно, как показано на рисунке 5б, что указывает на то, что тенденция к агломерации при снижении общего уровня пористости может снижаться после горячей штамповки расплава в состоянии ЖТФ.

В нашем случае, когда получают расплавленную алюминиевую матрицу, уровень (угол) смачиваемости с дисперсной частицей значительно снижается. Таким образом, характер взаимодействия матрицы и ограниченной поверхности частицы карбида бора определяется углом смачивания более 90° , как показано на модели (рисунок б). В результате определено, что для эффективности процесса кристаллизации и полноты реакций взаимодействия при устойчивой адгезии частиц с матрицей, наилучшие условия обеспечиваются в случае твердого состояния расплава ЖТС.

При изучении влияния различных скоростей вращения (скорости перемешивания расплава) на уровень пористости и ликвации было обнаружено, что лучшие значения скорости вращения находятся в интервале от 360 до 410 об/мин, поскольку частицы, в этом случае, распределены равномерно. Установлено, что в этом интервале перемешивания во всех частях расплава лучшим результатом после серии опытов, для образцов (рисунок 7), полученных с более низкой степенью пористости, были образцы отливок с содержанием частиц карбида бора 5% B_4C .

Анализ результатов показал, что распределение частиц по матрице было достаточно равномерным, но есть участки агломератов, которые образовались при столкновении частиц карбида бора. Количество агломератов повышается с увеличением содержания частиц от 2 до 7%. Кроме того, микроструктурный анализ показал, что в большинстве случаев армирующие частицы окружены эвтектиками. Установлено, что во время кристаллизации расплава в жидко-твердом состоянии образующиеся и растущие дендриты выталкивают зерна карбида бора в расплав, а затем остатки в кристаллизуются в виде эвтектики, в которой также локализируются зерна карбида бора на рисунке 8.

На рисунке 9 представлены гистограммы КТР в зависимости от содержания карбида бора в композиционном сплаве. При кристаллизации под давлением сохраняются низкие значения КТР, что является существенным отличием от подготовки расплава при обычных условиях перемешивания для получения сплава Al-Cu-B₄C, что объясняется уменьшением пористости и увеличением взаимодействия матрицы с частицами карбида бора. Можно отметить, что из всех вариантов опытов при различном содержании частиц отливки алюминиевого сплава системы Al-5%Cu, армированный частицами карбида бора 5 мас.% со средним размером 5-15 мкм, имеет наименьший КТР равный (19-20) 10⁻⁶ °C⁻¹, даже в интервале температур 20-200 °C, обеспечивая равномерное распределение частиц и минимальном уровне водородной пористости.

2. В условиях совмещенного литья и штамповки алюмоматричного сплава системы Al-Cu-B₄C, и последующей термообработки заготовки при 270 °C, с выдержкой образцов в течение 9 часов, достигается равномерная мелкозернистая структура заготовок и высокие механические характеристики (предел прочности на разрыв равен 170 МПа, микротвердость 115-120 НV, относительное удлинение 20-25%).

В ходе исследования механических характеристик композиционных материалов на предел прочности на растяжение и относительное удлинение были испытаны 4 образца. По результатам установлено, что значение нагрузки на растяжение и

значение относительного удлинения постепенно повышается с увеличением количества В₄С в алюминиевом сплаве. В ходе испытаний определено, что свойства заготовок в целом зависят, и, от пластичности (от значений относительного удлинения), и соотносятся со результатами испытаний на прочность (таблица 1).

Установлено, что с увеличением нагрузки прочность заготовок из сплава Al-5% Cu с добавлением 2% В₄С ниже, чем прочность Al-5% Cu с содержанием 5% мас. В₄С. Изменение величины прочности на растяжение соответствует прогнозируемым структурным изменениям, которые в итоге подтверждаются результатами микроструктурного анализа. Отмечается, что для всех испытываемых образцов сохраняется устойчивый тренд повышения величины показателя прочности на растяжение. При определении твердости образцов было установлено, что при отсутствии карбида бора образцы имели показатели твердости по Виккерсу 104-106 HV, а уже при содержании 5% В₄С-этот показатель был равен 113-115 HV, как показано на рисунке 10.

Таблица 1 - Результаты испытаний образцов композиционного сплава на относительное удлинение

Состав расплава Al-5%Cu	Относительное удлинение (мм)				
	0,15	0,25	0,35	0,45	0,55
	Предел прочности на растяжение, МПа				
Al-5%Cu	115	145	149	165	145
Al- 5% Cu -2%В ₄ С	124	149	167	175	179
Al-5% Cu -5%В ₄ С	145	153	164	170	175
Al-5% Cu-7%В ₄ С	124	138	167	183	195

В муфельной печи проводили термообработку образцов и выдерживали их при 200-210 °С в течение 6-7 ч. После обработки полученных результатов установлено, что значение предела текучести при комнатной температуре возрастает от 146 МПа (для чистой основы сплава) до 187 МПа (при Al-5%Cu-7%В₄С) при незначительном снижении уровня пластичности с 51 до 34%.

Испытания образцов на сжатие при температуре 250 °С указывают на более высокие значения предела текучести после

термообработки. Анализ результатов проведенных механических испытаний заготовок (таблица 2) показал что, с увеличением содержания карбидных частиц в композите (после ТО при 250 °С), предел текучести при комнатной температуре возрастает с 170 МПа (для основного сплава) до 256 МПа (для состава композиционного сплава Al-5%Cu-7%B₄C).

В этом случае, значение пластичности снижается почти в 2 раза, и относительное удлинение составляет 24%. Кроме этого, отмечается, что образцы расплава с B₄C, имеют более высокий предел текучести, чем у подобных изделий из стандартного поршневого силумина АК12ММгН ($\sigma_{0,2} = 221$ МПа). Также, испытания образцов на сжатие при 200-210 °С указывают на более высокие значения предела текучести $\sigma_{0,2}$ и предела прочности на разрыв σ_b по сравнению со стандартными силуминами.

Таблица 2 - Механические испытания образцов при комнатной и повышенной температурах при 250 °С в течение 3,5 ч

Сплавы	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение ρ , %
	Температура 20 °С	
Al-5%Cu	146	51
Al-5%Cu-2%B ₄ C	172	45
Al-5%Cu-5%B ₄ C	182	42
Al-5%Cu-7%B ₄ C	185	38
Температура термообработки 250 °С		
Al-5%Cu	119	83
Al-5%Cu-2%B ₄ C	122	62
Al-5%Cu-5%B ₄ C	133	65
Al-5%Cu-7%B ₄ C	146	71
АК12ММгН ¹	166	42

¹Термообработка при 200 °С в течение 10 часов.

На рисунках 11а и 11б представлены кинетические зависимости изменения показателя твердости от условий термообработки при различном содержании добавок карбида бора в сплаве. Увеличение показателя микротвердости по Виккерсу связано с тем, что частицы карбида попадая в расплав

ускоряют процесс формирования каркаса матрицы, и при 225 °С максимальная твердость достигает 105 HV уже через 9 часов, в то время как при составе композита Al-5% Cu-7% B₄C максимальный уровень твердости достигается уже через 7 часов выдержки, и составляет 139 HV. Идентичная ситуация сохраняется после выдержки образцов при температуре 250 270°С, когда максимальная твердость композитов достигается уже через 4,5-5,5 часов. Подобный эффект был получен при изучении кинетики термообработки композитов во время старения заготовки, что объясняется общим повышением плотности дислокаций, и в первую очередь из-за присутствия твердых частиц с низким коэффициентом теплового расширения.

При исследовании микроструктуры различных образцов образцы из сплава Al -5% Cu с различным содержанием в сплаве добавок B₄C 2, 5, 7 мас.%. использовали метод электронной микроскопии (СЭМ - анализ). Изучали микроструктуры после ввода 2 мас.% частиц карбида бора, которые показаны на рисунке. 12. Видно, что микроструктура отличается своей неоднородностью к в дендритном строении, так и зернёной структуре. Также можно отметить, что в структуре, в основном, присутствуют дендритные включения α-твердого раствора на основе алюминия и эвтектик τ и θ. Хорошо видны частицы карбида бора размером 15-20 мкм в самой эвтектике, которые являются опорными узлами формирующегося каркаса, но, с другой стороны, такой характер распределения подтверждает гипотезу сохранения структурных особенностей самими армирующими частицами из-за высокоразвитой поверхности. Имеются дефектные участки горячих трещин и фрагменты усадочной пористости, которые по всей видимости связаны с локализацией участков с водородной пористостью.

На рисунке 13 представлены микроструктуры сплава Al-5%Cu-5%B₄C. Согласно полученным данным, можно отметить устойчивое однородное распределение армирующих частиц в матрице без явных признаков ликвации карбида бора. Однако, вероятность возникновения неоднородности повышается при большем содержании карбидов, что трактуется образованием газовой пористости. На рисунке 14 показаны микроструктуры алюминиевого сплава с содержанием 7% B₄C. но, с другой

стороны, в расплаве, появляется склонность к агломерации, по причине слипания некоторых частиц карбида бора. Видно некоторое смещение карбидов бора к центральной части расплава растущими дендритами, где первичная кристаллизация и затвердевание и происходит в последнюю очередь, а оставшийся расплав кристаллизуется в виде эвтектики, в которой локализуются и частицы B_4C .

Микроструктуры композиционного расплава (СЭМ - анализ) приведены на рисунках 15, 16, 17. На рисунке, 15 установлено, что включения с ярким фоном содержат включения промежуточной фазы кристаллизации в виде интерметаллида Al_2Cu , и равномерно распределенных на темном фоне частиц B_4C . На рисунке 17 видно, в дополнение к твердому раствору алюминия микроструктуры имеют включения на светлом фоне в виде промежуточных фаз кристаллизации Al_2Cu . Видно, из изображений микроструктур, что существует устойчивая связь между отдельными частицами карбида бора и самой алюминиевой матрицей через сформированные эвтектики, где матрица наиболее плотно прилегает к поверхности частиц без образования пор и микротрещин на границе раздела. Эти связи, в итоге, создают и определяют формирование устойчивого каркаса в заданном объеме расплава.

Технико-экономические показатели технологии

Проведенные исследования открывают перспективы широкого промышленного внедрения, в том числе и для машиностроительной и автомобильной отрасли Египта, и дают возможность использования композиционных материалов с высокими механическими характеристиками для последующего их широкого использования. Себестоимость изготовления изученных композиционных сплавов снижается на 20-25% за счет снижения энергозатрат, времени обработки и относительно простой технологической схемы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно - квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи - Разработка алюминиево-матричного сплава $Al-5Cu$ с низким коэффициентом теплового

расширения и уникальными механическими свойствами, с усилением керамическими частицами карбида бора B_4C и их использовать в особо ответственных узлах автомобильной техники.

В результате проведенных исследований в рамках диссертационной работы разработаны и научно обоснованы технические решения для получения высокопрочных алюминиевых сплавов при вводе керамических частиц различного количества и состава, которые заключаются в основных выводах:

1. При изучении свойств композиционного сплава при вводе частиц карбида бора с различными размерами от 1-25 мкм, определено, что для обеспечения равномерной плотности и ее наилучших значений, размер частиц карбида бора B_4C должен находиться в пределах от 5 до 15 мкм.

2. Изменение плотности расплава в зависимости от содержания частиц карбида бора в расплаве указывает на то, что устойчивые ее значения достигаются в интервале от 1,8 до 5,5%. При более низком содержании наблюдается высокий уровень ликвации частиц в расплаве Al-Cu, а при повышении более 6% происходит образование осадков из агломератов на дне тигля.

3. В ходе проведенных опытов установлено, что водородная пористость отливки имеет наиболее низкие показатели при концентрации частиц карбида бора B_4C в расплаве равной 5%.

4. Определено, что смачиваемость между расплавом Al-Cu с частицами B_4C снижается за счет изменения поверхностного натяжения расплава алюминиевого сплава. Этот показатель помогает достигнуть однородного распределения частиц в матрице и высокие значения межфазной прочности сцепления за счет уровня смачиваемости поверхности 80-90%.

5. При изучении влияния различных скоростей перемешивания расплава на уровень пористости и ликвации было обнаружено, что при скорости вращения мешалки от 360 до 410 оборотов в минуту, частицы равномерно распределяются в объеме алюминиевой матрицы, а значения водородной пористости минимальны.

6. Алюминиевый сплав системы Al-5%Cu, армированный 5% частицами карбида бора со средним размером 5 мкм, имеет более меньший КТР, по сравнению с подобными характеристиками алюминиевыми сплавами (силуминами), даже в диапазоне температур 20-200 °С.

7. Заготовки из композиционного сплава, полученные методом совмещенного литья и штамповки, на основе матрицы Al-5%Cu с вводом частиц В₄С до 5%, имеют более высокие (показатели твердости (113 НV), предела прочности на растяжение (~180 МПа), что подтверждается электронно-микроскопическим исследованием структуры исследуемых образцов композитов.

8. Исследования микроструктур образцов сплава системы Al-Cu-В₄С показали, что имеется дисперсия частиц микронного размера (10-15 мкм), которая более однородна и равномерна, но, с другой стороны, именно эти гибридные частицы приводят к агломерации частиц в микрообъеме.

9. Дальнейшая разработка данной темы и перспективы связаны с исследованием влияния добавок ряда других компонентов и оксидов (SiC, Al₂O₃, керамические частицы и т.д.), которые могут оказать положительное влияние на повышение физических и механических свойств алюминиево-матричного сплава Al-5Cu. Перспективным этапом развития данной тематики является решение вопросов по улучшению термических свойств алюминиевого сплава при различных режимах обработки с использованием современных методов литья в сочетании с порошковой металлургией.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикация в издании из Перечня ВАК:

1. Алаттар, А.Л.А. Повышение механических свойств композиционных алюминиевых сплавов при вводе карбида бора / А.Л.А. Алаттар, В.Ю. Бажин, А.А. Власов // Вестник Иркутского государственного технического университета. –2020. –№ 24 (3). – С. 663-671.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

2. Alattar, A.L., Al-Cu-B₄C Composite Materials for the Production of High-Strength Billets Alattar, A.L., Bazhin, V.Y. Metallurgist, 2020, 64(5-6), pp. 566–573

3. Bazhin, V.Yu. Development of technologies for the production of multi-component ligatures Al-Cu-B-C with high thermal characteristics / V.Yu. Bazhin, A.L. Alattar, I.V. Danilov // In IOP Conference Series. Materials Science and Engineering. – 2019, – Vol. 537, – No. 2. – P. 1-6.

4. Alattar, A.L. Development properties of aluminum matrix composites reinforced by particles of boron carbide / A.L. Alattar, V.Yu. Bazhin // In Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1990, –No. 1. – P. 012018.

Публикации в прочих изданиях:

5. Alattar, A.L. Structural Microstructure and Mechanical Properties of Al-5Cu/B₄C Composite alloy production By Casting for High Potential Application / A.L. Alattar, V.Yu. Bazhin // The first International Conference on Material Science and Application, ICMSA-Sharm El-Sheikh, Egypt. – 2019. – P. 014.

6. Alattar, A.L. Development properties of aluminum metal matrix composites reinforced by particles of boron carbide using powder metallurgy / A.L. Alattar, V.Yu. Bazhin // XVI International Forum-Contest of Students and Young Researchers “Topical Issues of Rational Use of Natural Resources”, Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia. June 17th-19th. – 2020. – P. 131.

7. Алаттар, А.Л.А. Разработка технологии производства многокомпонентных лигатур Al-Cu-B-C с высокими теплофизическими характеристиками / А.Л.А. Алаттар, В.Ю. Бажин // Международный симпозиум “Нанозифика и наноматериалы” Санкт-Петербург, Россия 24-25 ноября – 2021.

Патент:

8. Патент № 2750658 Российская Федерация, МПК С22С 1/10 (2006.01), С22С 21/12 (2006.01). Способ получения алюминиевого сплава, армированного карбидом бора № 2750658; заявл. 16.12.2020; опубли. 30.6.2021, Бюл. № 19. /Бажин В.Ю., Алаттар А.Л.А., Шариков Ф.Ю.– 7 с.

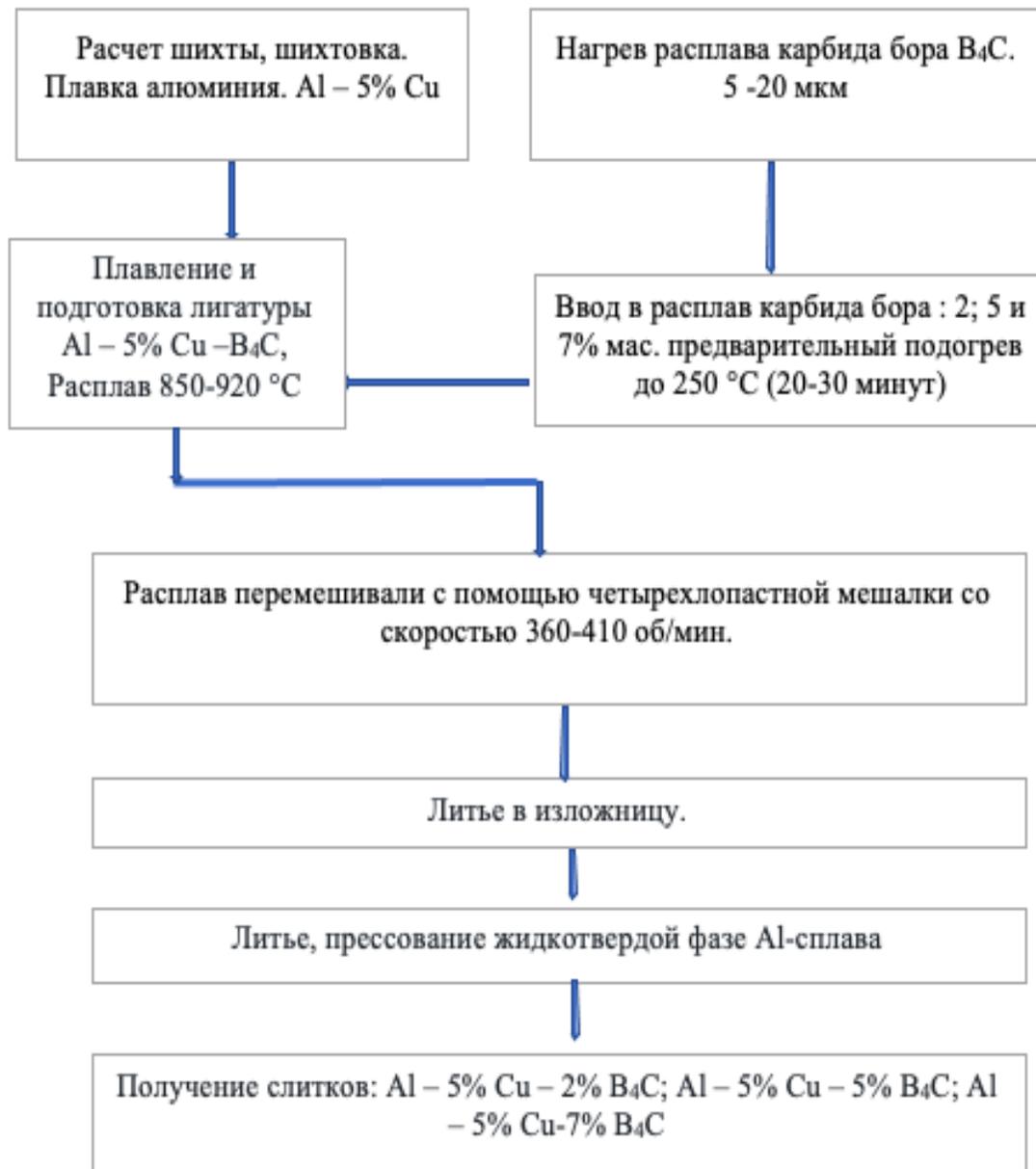


Рисунок 1 - Технологическая схема опытов.

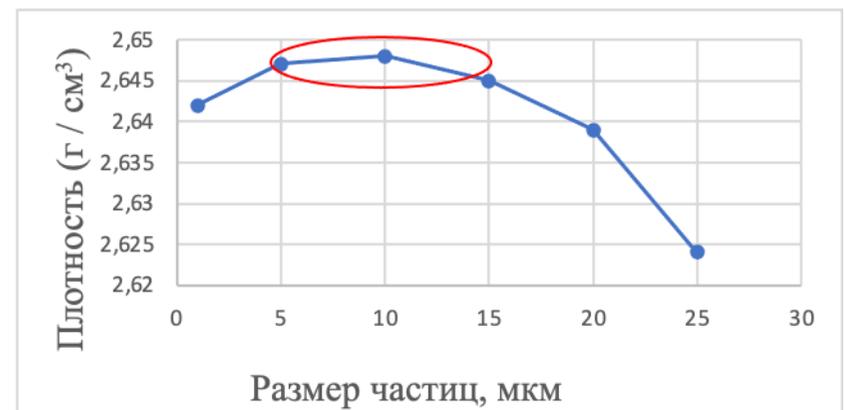


Рисунок 2 - Влияние размера частиц карбида бора на плотность Al-Cu сплава

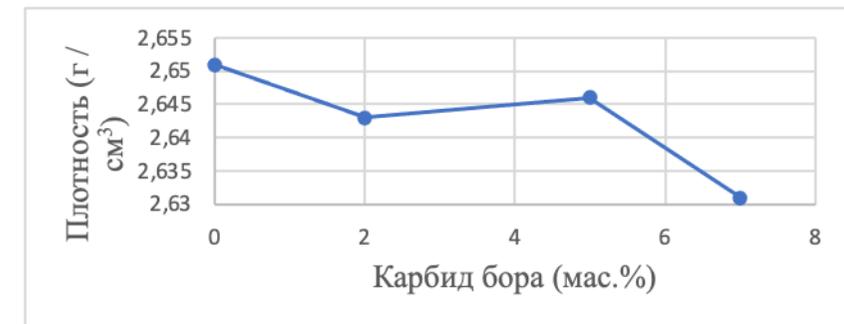


Рисунок 3 - Влияние количества карбида бора (мас.%) на плотность сплава

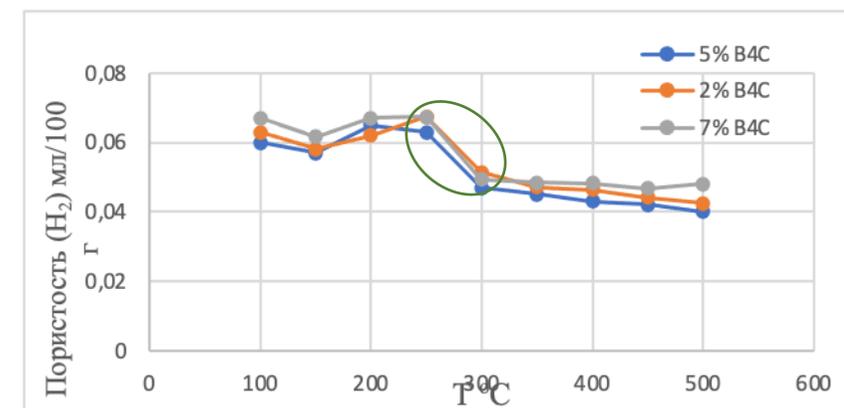


Рисунок 4 - Изменение водородной пористости в зависимости от температуры нагрева при различном содержании частиц B₄C в сплаве

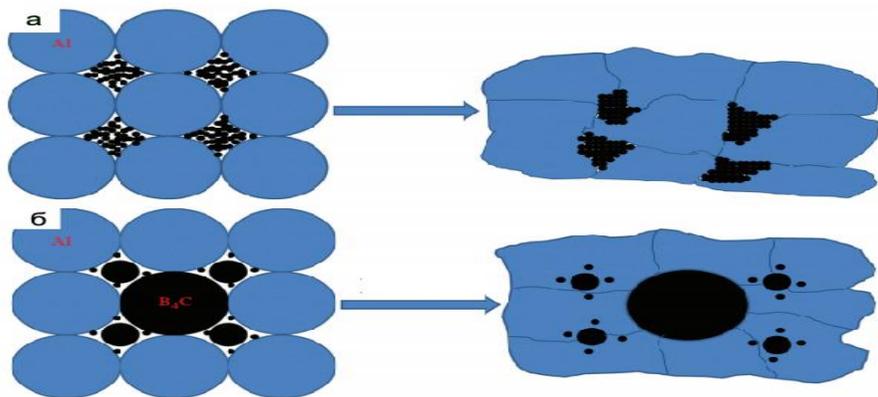


Рисунок 5 - Модель заполнения частицами: (а) при обычных условиях, (б) в соответствии с принципом заполнения Хорсфилда

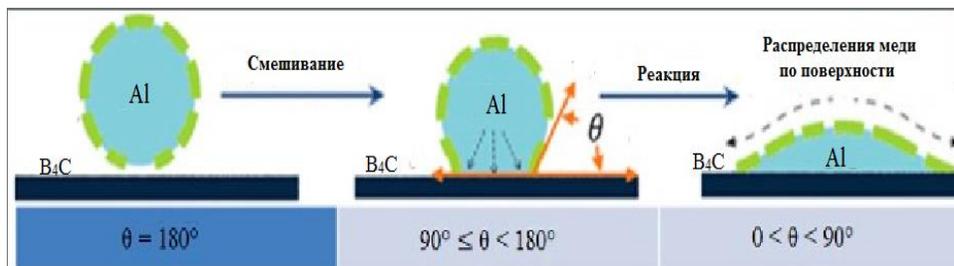


Рисунок 6 - Модель взаимодействия расплавленной части матрицы с частью поверхности карбида бора

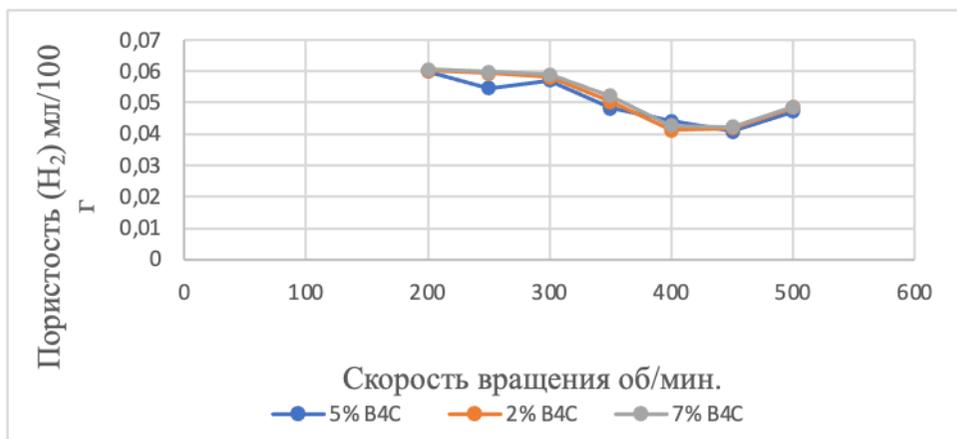


Рисунок 7 - Влияние скорости перемешивания на пористость литых образцов при различном содержании армирующих частиц карбида бора

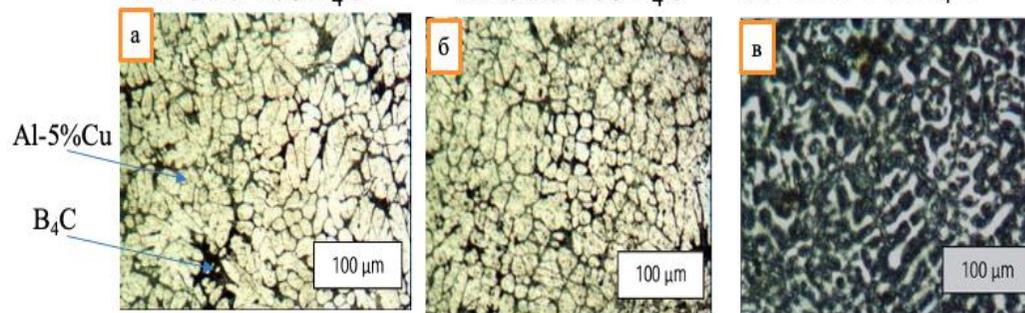
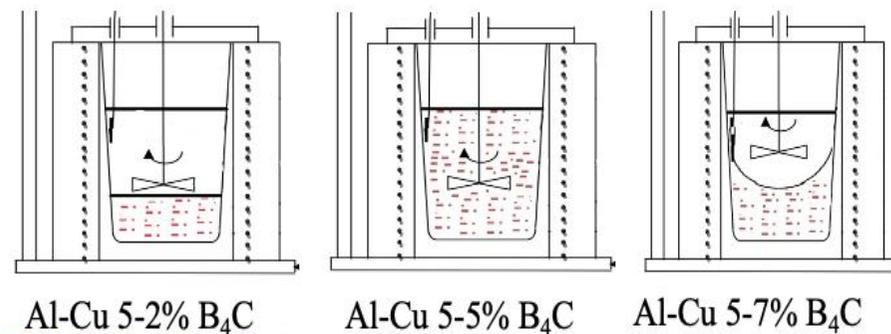


Рисунок 8 - Модель перемешивания и микроструктурный анализ алюминиевого сплава Al-5%Cu-2%B₄C, Al-5%Cu-5%B₄C, Al-5%Cu-7%B₄C композиционных заготовок после литья, при увеличении $\times 100$. Фотографии получены при использовании светового оптического микроскопа (LECO LX 31)

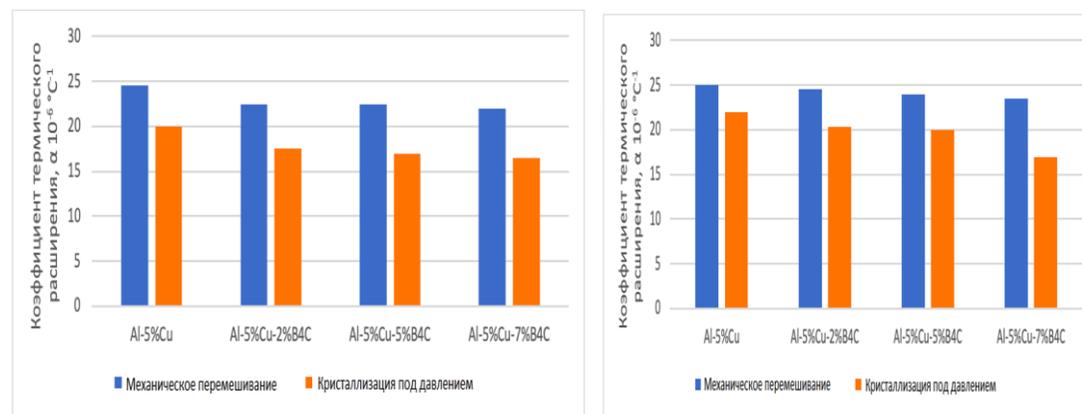


Рисунок 9 - Расчетный и полученный средний КТР в интервалах температур 20-100 °С (а) и 20-200 °С (б) в зависимости от содержания карбида бора и технологии

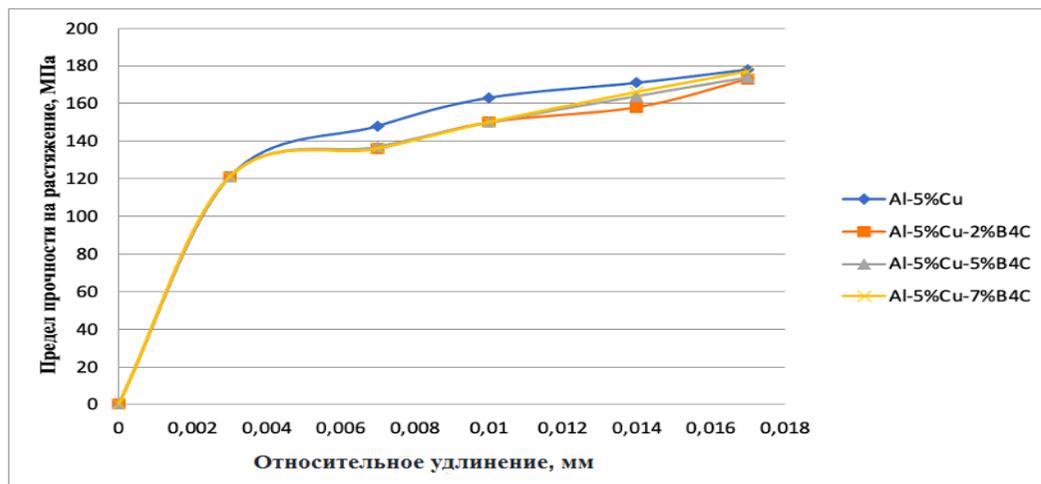
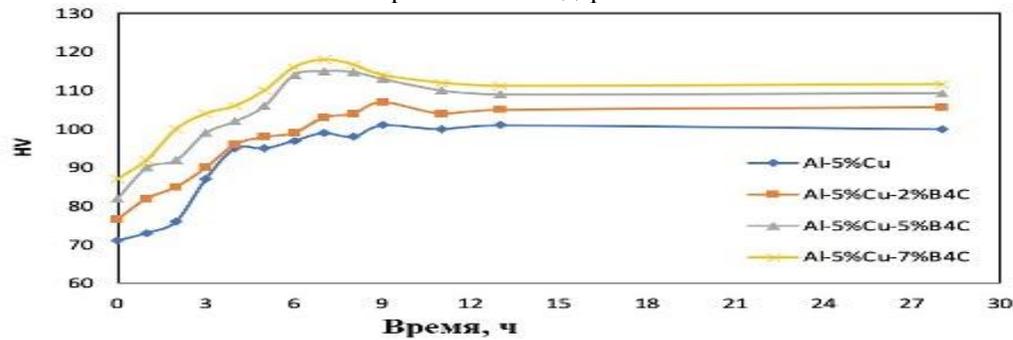
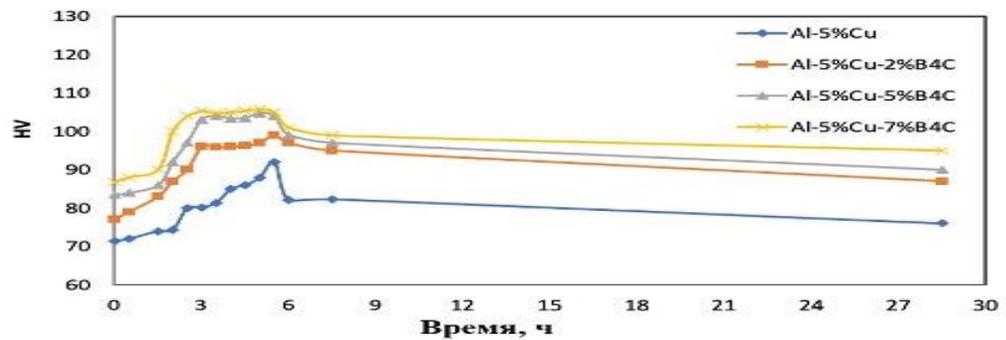


Рисунок 10 - Зависимости напряженного состояния от величины деформации на Al – 5% Cu с различным содержанием B₄C



а



б

Рисунок 11 - а) Эволюция показателя твердости во времени для сплава Al-Cu-B-C после термообработки старением при температуре 225°C; б) Изменение микротвердости во времени сплава Al-Cu-B-C, подвергнутого испытанию на старение при температуре 250°C

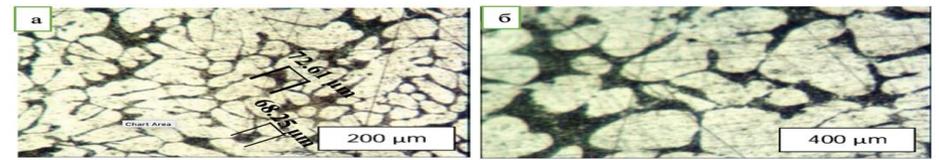


Рисунок 12 – Оптическая микроструктура алюминиевого сплава Al-5%Cu-2%B₄C –при увеличении ×200 (а) и ×400 (б)

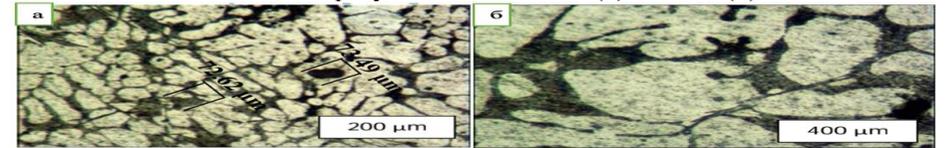


Рисунок 13 – Микроструктура алюминиевого сплава Al-5%Cu-5%B₄C –при увеличении ×200 (а) и ×400 (б)

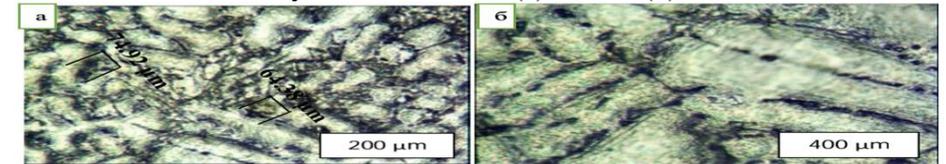


Рисунок 14 – Микроструктура алюминиевого сплава Al-5%Cu-7%B₄C при увеличении ×200 (а) и ×400 (б)

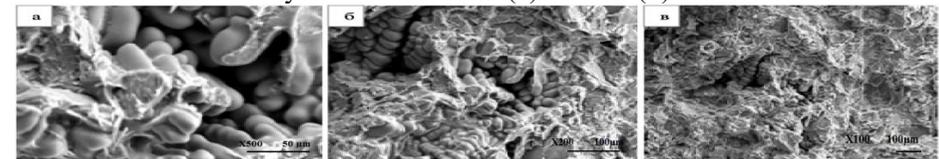


Рисунок 15 - Микроструктуры образца сплава Al – 5%Cu – 2%B₄C после механических испытаний на растяжение, при увеличении: а – x500; б – x200; в – x100

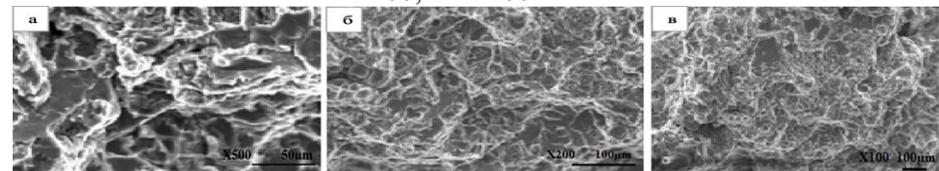


Рисунок 16 - Микроструктуры образца сплава Al – 5%Cu – 5%B₄C после механических испытаний на растяжение, при увеличении: а – x500; б – x200; в – x100

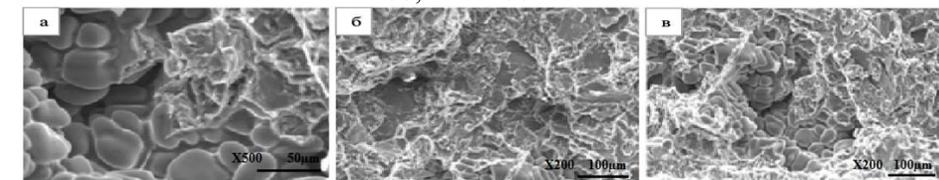


Рисунок 17 - Микроструктуры образца сплава Al – 5%Cu – 7%B₄C после механических испытаний на растяжение при увеличении: а – x500; б – x200; в – x100