

На правах рукописи



**Башев Василий Сергеевич**

**ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИЛУМИНА  
МАРКИ АК12 НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ  
УЛЬТРАДИСПЕРСНЫМИ ПОРОШКАМИ ВОЛЬФРАМА И  
МЕДИ**

Специальность

2.6.1. – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новокузнецк 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

**Научный руководитель:** **Мартюшев Никита Владимирович**  
кандидат технических наук, доцент  
отделения материаловедения ФГБОУ ВО  
«Национальный Исследовательский Томский  
политехнический университет»

**Официальные оппоненты:** **Белов Николай Александрович**  
доктор технических наук, профессор кафедры  
обработки металлов давлением ФГБОУ ВО  
«Национальный исследовательский  
технологический университет МИСиС»

**Ерошенко Анна Юрьевна**  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
ФБГУН «ИФПМ СО РАН»

**Ведущая организация:** ФБГУН «ИМАШ УрО РАН», г. Екатеринбург

Защита состоится 31 мая 2022 года в 10-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.401.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» по адресу: 654007, Кемеровская область - Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный р-н, ул. Кирова, зд. 42, СибГИУ. Факс (3843) 46-57-92, E-mail: ds21225201@sibsiu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», <http://www.sibsiu.ru>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.2.401.01, д.т.н., доцент



Рыбенко Инна Анатольевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Силумины, сплавы алюминия с кремнием в количестве 4–22 %, составляют основную группу литейных алюминиевых сплавов; на их долю приходится более 90 % производства всех отливок. Это связано с их технологичностью практически во всех видах литья. Согласно отчету компании «РУСАЛ», производство алюминия в мире в 2019 году составило 63,7 млн тонн. По оценкам из-за кризиса в 2020 году падение производства алюминия составит приблизительно 6–10 %. Ограниченное распространение силуминов в промышленности связано в основном с их низкими прочностными характеристиками и пластичностью. Связано это как с грубыми хрупкими включениями кремния и интерметаллических фаз, так и с присутствием в сплавах  $\alpha$ -Al твердого раствора и скоплением эвтектических фаз. И если хрупкие включения кремния и интерметаллические фазы в большей степени можно удалить путем рафинирования и отфильтровки, то снизить влияние  $\alpha$  твердого раствора и эвтектических фаз значительно сложнее. В связи с постоянным повышением требований к качеству литых изделий, экологии и экономичности технологических процессов, как никогда становится актуальным поиск совершенствования уже имеющихся сплавов. Широко распространённым методом, оказывающим влияние на равномерное формирование микроструктуры и повышение прочностных свойств Al-Si сплавов, является модифицирование ультра- и нанодисперсными частицами различного химического состава. Имеющиеся исследования в основном посвящены влиянию добавок порошков оксидов и карбидов металлов на структуру и свойства силуминов.

В качестве модифицирующих добавок, которые позволяют измельчить структуру отливок и повысить их механические свойства используются соли различных металлов, оксиды, карбиды, редкоземельные металлы, а также алюминиды различных металлов, таких как  $\text{TiAl}_3$  и  $\text{ZrAl}_3$ .

В настоящее время накоплен достаточно большой объем экспериментальных данных по использованию оксидов металлов ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{SrO}$ ), редкоземельных элементов (Sr, Cr, Sm, Eu), карбидов ( $\text{TiCN}$ ), боридов (Nb-B, Ti-B), а также углеродосодержащих материалов ( $\text{BaCO}_3$ , C). Был получен положительный эффект при модифицировании алюминиевого сплава A356Al (маркировка США) карбидом вольфрама WC. Такие частицы не растворяются в расплаве и служат центрами кристаллизации. Аналогичным образом будут работать и частицы тугоплавких элементов (W, Ti, Mo и др.). Тем не менее действие частиц химических соединений несколько отличаются от действия чистых металлов, поэтому актуальным является исследование в области модифицирования алюминиевых сплавов чистыми тугоплавкими элементами. Одним из наиболее распространенных тугоплавких материалов, который используется для модифицирования других сплавов, является ультрадисперсный порошок вольфрама. Однако для практического применения вольфрама в качестве модифицирующей добавки необходимо изучение, так как влияние данного модификатора на силумины не изучено.

Данная диссертационная работа была выполнена в рамках повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров,

а также при поддержке и финансировании РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-60146 мол\_а\_дк.

### **Степень разработанности темы исследования**

На сегодняшний день исследованию проблематики модифицирования алюминиевых сплавов посвящены работы зарубежных и российских ученых, таких как: Цинлин Ли, Лу Фан, Тяньдун Ся, Эль-Махаллави И.С., А. Амер, А. Йехаи Саш, Молина С.М., Вальдес А.Ф., Торрес Ю.Т., Эстрада Р.Г., Виттхая Э., Чен Чонг, Лю Чжун Ся, Эн Бо, Ван Минь Син, П. Шумахер, Р. Юаньшэн, У.Д. Дин, М. Новак, Л. Больцони, П.С. Моханти, Ю.Е. Грузлеск, В.И. Никитин, К.В. Никитин, С.А. Акшин, А.Т. Волочко, Н.А. Белов, В.С. Золоторевский, С.В. Савченко, Крушенко Г.Г., Стеценко В.Ю., Марукович Е.И и др.

Работ, посвященных модифицированию частицами чистых металлов мало и зачастую они посвящены исследованию влияния редкоземельных элементов. Использование редкоземельных металлов в качестве модификаторов возможно, но экономически не всегда выгодно и вызывает много вопросов, так как основные месторождения данных элементов находятся за пределами России. Применение в качестве модификаторов нанопорошков карбидов описываемое в работе Крушенко Г.Г. и др., в частности карбида бора ( $B_4C$ ), так же вызывает много вопросов, ведь само получение данного соединения энерго и экономически затратно, так и сам процесс модифицирования технологически трудоемок. В настоящее время при разработке комплексных модификаторов огромный интерес исследователей со всего мира вызывают наноразмерные порошки оксидов, боридов нитридов и тугоплавких химических соединений. Модифицирующий эффект данных соединений базируется на том, что, при малых размерах частиц нанопорошка он обладает большим энергетическим потенциалом и огромной удельной площадью поверхности. Тем не менее получение наноразмерных соединений несколько затратней и технологически сложнее, поэтому стоит рассмотреть в качестве модификатора однокомпонентных нанопорошков.

**Цель работы:** разработка технологии модифицирования силумина марки АК12 ультрадисперсными порошками вольфрама и меди с целью повышения его механических свойств.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Установить зависимости влияния различных концентраций модифицирующих добавок УДП вольфрама, а также смеси вольфрама и меди на формирование структуры силумина марки АК12;
2. Исследовать влияние различных концентраций УДП вольфрама, а также смеси вольфрама и меди на механические свойства отливок силумина марки АК12;
3. Исследовать влияние времени выдержки расплава с модификатором в печи, во время его приготовления, на структуру и свойства получаемых отливок из силумина марки АК12;
4. Исследовать влияние параметров механической активации смеси порошков вольфрама и меди на структуру модификатора и его усваиваемость расплавом силумина марки АК12;

5. Разработать технологию предварительной механической активации УДП вольфрама в смеси с УДП порошком меди;

6. Разработать технологию получения отливок из силумина АК12 за счет модифицирования смесью УДП вольфрама и меди с повышенными механическими характеристиками;

#### **Научная новизна:**

1. Установлены закономерности влияния малых добавок в количестве 0,01–0,5 мас. % смеси ультрадисперсных порошков вольфрама и меди на структуру и свойства отливок силумина марки АК12. Доказано, что внедрение малых добавок в количестве 0,01–0,5 мас. % оказывает существенное влияние на структуру и свойства отливок силумина.

2. Получены закономерности влияния времени выдержки расплава с модификатором в печи на структуру и свойства отливок силумина марки АК12. Установлено, что выдержка расплава с модификатором в печи в течение 10 мин при температуре  $840 \pm 5$  °С позволяет повысить механические характеристики отливок и снижает процент модификатора, выпадающего в осадок.

3. Установлено влияние времени механической активации и состава активируемой смеси порошков вольфрама и меди в планетарно шаровой мельнице на структуру и свойства модифицированных отливок силумина марки АК12.

4. Раскрыт механизм формирования структуры отливок и влияние модификатора вольфрама на свойства модифицированных отливок из силумина марки АК12.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. В связи с тем, что, при определенных в условиях кристаллизации эвтектических силуминовых сплавов, к которому относится силумин марки АК12, возможно проявление доэвтектических и заэвтектических структурных составляющих теоретически возможно экстраполировать полученные результаты данной работы на эти сплавы.

2. Установленные и доказанные количественные значения содержания модификатора вольфрама и меди в расплаве и время выдержки в расплаве на формирование микроструктуры и повышение механических свойств отливок из силумина марки АК12.

3. Разработана технология предварительной активации смеси порошков вольфрама и меди в планетарно шаровой мельнице.

4. Разработана и внедрена технология модифицирования литейного силумина марки АК12 путем внедрения модификатора на основе смеси УДП порошков вольфрама и меди.

#### **Реализация результатов**

Отливки, изготовленные из силумина марки АК12, технология модификации которых описана в данной диссертационной работе, были апробированы и внедрены на предприятии ОАО «Томский электромеханический завод им. В.В. Вахрушева». Результаты промышленного внедрения экспериментальных данных подтверждены актом.

#### **Методы исследования**

Исследования проводились в лабораторных условиях, в ходе проведения

экспериментов использовалась анализ микроструктуры отливок при помощи компьютерных программ, рентгеноструктурный анализ, растровая электронная микроскопия, рентгеноспектральный микроанализ, оптической металлографии. Механические свойства оценивались по испытаниям на ударную вязкость, растяжение, твердость.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Предварительная активация и перемешивание порошков вольфрама и меди перед внедрением в расплав при помощи шаровой планетарной мельницы повышает усваиваемость расплавом силумина АК12 частиц порошка вольфрама до 94–97 % от изначально помещенного в расплав и приводит к равномерному распределению частиц модификатора по объему отливки, что в свою очередь увеличивает эффект от модифицирования.

2. Внедрение малых добавок (0,01–0,25 мас. %) ультрадисперсного порошка вольфрама в расплав силумина АК12 приводит к равномерному распределению эвтектики ( $\alpha$ -Al + Si), уменьшению пластин эвтектического кремния в 1,5 раза, изменению формы грубых пластин на тонкую волокнистую форму и повышению ударной вязкости на 16 %, временного сопротивления на 24 %, относительного удлинения на 32 %.

3. Соотношение порошков 1:1 и время обработки 5 мин в планетарно шаровой мельнице при смешивании порошков вольфрама и меди при дальнейшем модифицировании позволяет получить максимальный прирост временного сопротивления в размере 23,3 %, ударной вязкости в размере 18 % и относительного удлинения в размере 46,4 % по сравнению с не модифицированными образцами и 3–20 % в сравнении с отливками, модифицированными чистым УДП вольфрама.

4. Время выдержки расплава с модификатором в печи позволяющее получить наиболее однородную и мелкодисперсную структуру отливок из силумина марки АК12, составляет 10 мин.

#### **Соответствие темы диссертации паспорту научной специальности**

Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует паспорту специальности 2.6.1. по пунктам: 1. Изучение взаимосвязи химического и фазового составов (характеризуемых различными типами диаграмм), в том числе диаграммами состояния с физическими, механическими, химическими и другими свойствами сплавов; 3. Теоретические и экспериментальные исследования влияния структуры (типа, количества и характера распределения дефектов кристаллического строения) на физические, химические, механические, технологические и эксплуатационные свойства металлов и сплавов.

#### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность полученных результатов обеспечивается большим объемом проведенных экспериментов, их статистической обработкой, проведением измерений на сертифицированном оборудовании Томского политехнического института и Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, а также воспроизводимостью результатов, согласованностью полученных данных с результатами исследований авторов в

смежных направлениях. Результаты данной диссертационной работы были доложены и обсуждались на следующих конференциях: Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2016); Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения» (Новокузнецк, 2017); VIII Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении-2017» (Новосибирск, 2017); IV Всероссийской (национальной) научной конференции «Фундаментальные и прикладные исследования» (Новосибирск, 2018); V Всероссийской (национальной) научной конференции «Фундаментальные и прикладные исследования» (Новосибирск, 2019); XXI Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество «Металлургия – 2019» (Новокузнецк, 2019); Международной молодежной научной конференции «XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых)» (Казань, 2019); II Всероссийская научно-методическая конференция «Современные технологии, экономика и образование» (Томск, 2020).

### **Личный вклад автора**

Заключается в постановке задач исследования, анализе литературных источников, проведении серии экспериментов по внедрению УДП вольфрама, а также смеси вольфрама и меди в расплав силумина марки АК12; дополнительной обработке УДП вольфрама и последующем анализе полученной смеси; изготовлении и анализе образцов из модифицированных отливок; анализе полученных статистических данных, обобщении и систематизации полученных результатов, формировании выводов и положений выносимых на защиту, а также написанию статей по теме диссертации.

### **Публикации**

Материалы, полученные в ходе подготовки данной диссертационной работы, были изложены и опубликованы в 12 научных статьях и докладах конференций, в том числе в двух изданиях, рекомендованных ВАК, в одной работе индексируемой в базе данных Scopus.

### **Структура и объем работы**

Данная диссертационная работа изложена на 131 страницах, включает 30 рисунок и 7 таблиц. Состоит из введения, пяти разделов, выводов по данной работе, списка используемой литературы, состоящего из 137 источников и приложения на 2 страницах.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** была описана актуальность темы, изложена научная новизна, а также практическая ценность проделанной работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** работы посвящена анализу литературных источников, которые описывают проблематику, а также пути её решения. Анализ публикаций российских и зарубежных ученых по проблеме. Сформулированы задачи исследования.

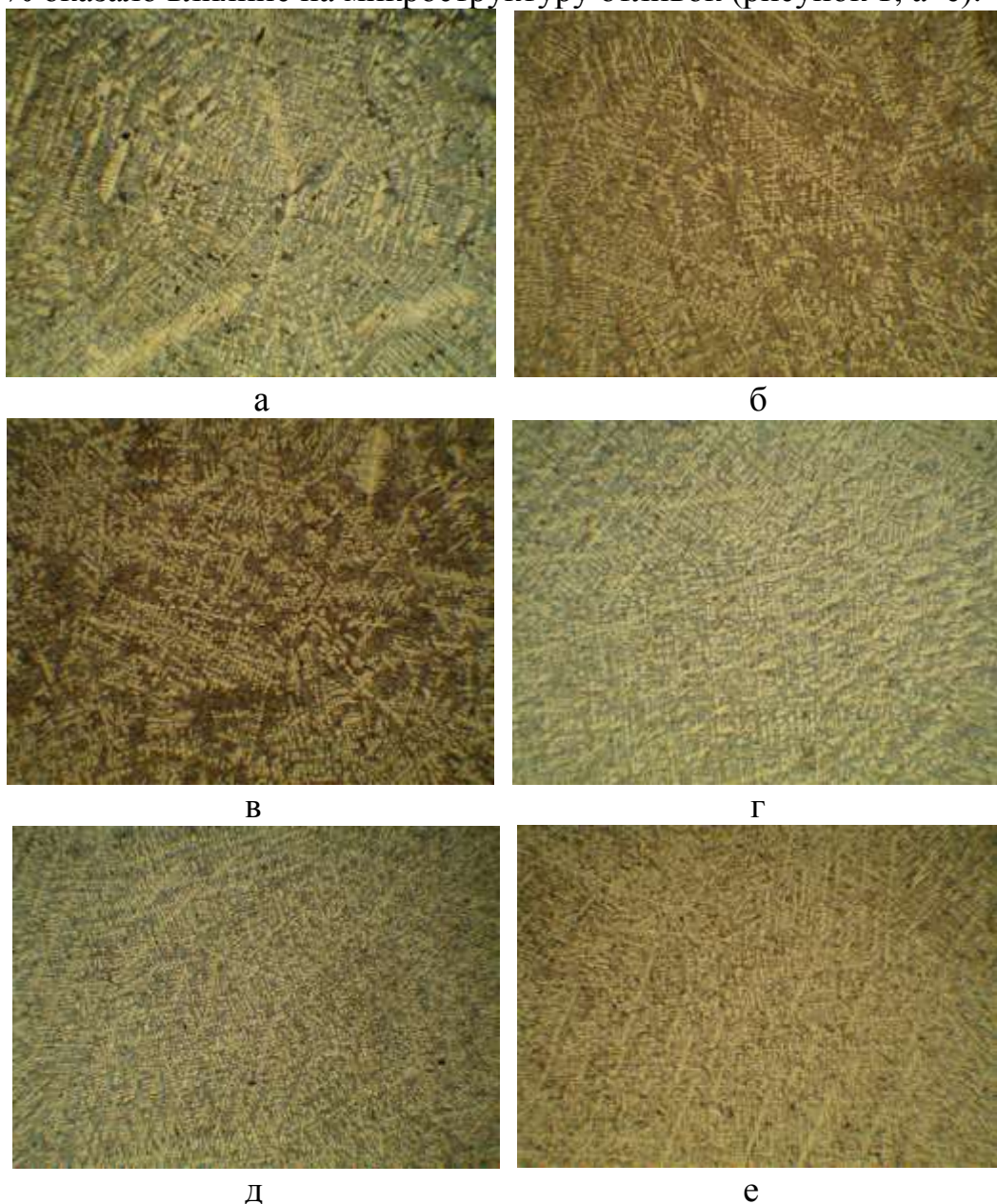
**Вторая глава** посвящена обоснованию выбора материалов для исследования, описанию и обоснованию необходимости дополнительной



обработки порошка вольфрама в планетарно шаровой мельнице, а также результатом обработки порошка вольфрама в планетарно шаровой мельнице. Описана методика проведения эксперимента, используемое оборудование, а также методики анализа структуры полученных модифицированных отливок. Указаны методики определения механических характеристик.

**В третьем разделе** представлены результаты, полученные в ходе модифицирования силумина марки АК12 чистым ультрадисперсным порошком вольфрама.

В ходе проведенных экспериментов было установлено, что введение в расплав силумина марки АК12 нанодисперсного порошка вольфрама в количестве 0,01 – 0,5 % оказало влияние на микроструктуру отливок (рисунок 1, а–е).



Содержание вольфрама, %: а – 0; б – 0,01; в – 0,05; г – 0,1; д – 0,25; е – 0,5

Рисунок 1– Микроструктура силумина марки АК12 с различным содержанием вольфрама, выдержка 10 мин  $\pm 30$  сек



Малые количества модификатора измельчили микроструктуру отливок, сократили длину осей первого порядка, расстояние между осями второго порядка, средний размер пластин кремния в эвтектике, а также изменили морфологию эвтектического кремния. Кроме того, модификатор позволяет измельчить и все компоненты структуры отливки, в частности эвтектики (таблица 1).

Таблица 1 – Показатели размеров компонентов микроструктуры отливок из силумина АК12 в зависимости от концентрации модификатора

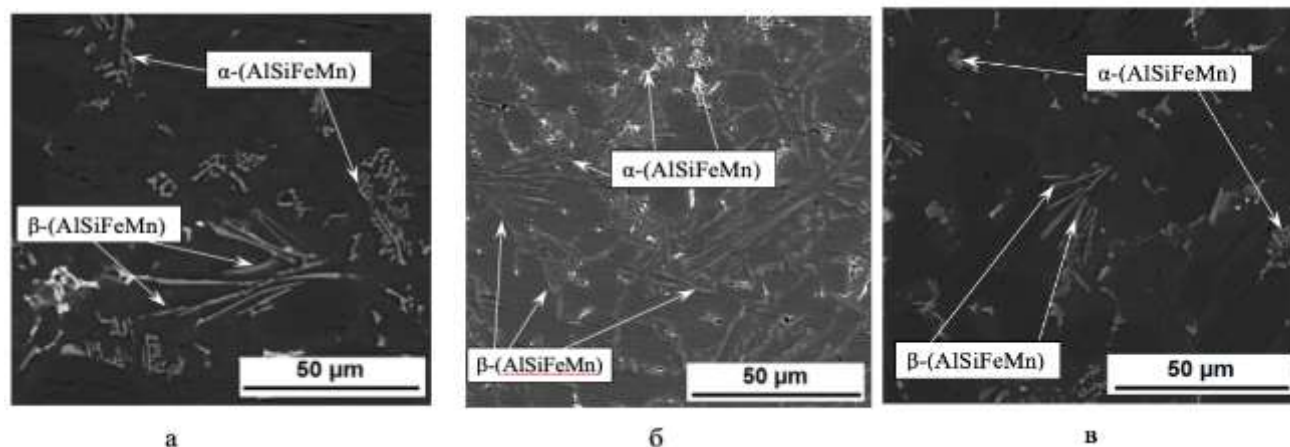
масс. % вольфрама	Оси третьего порядка	Расстояние между осями $\alpha$ -Al второго порядка, мкм	Длина осей первого порядка, мкм	Средний размер пластин кремния в эвтектике, мкм	Морфология эвтектического кремния
0	Присутствуют в значительной степени	~28 – 32	500 – 800 (Отдельные кристаллы ~2500 – 3000)	~12,3	Грубое игольчатое строение
0,01	Присутствуют в незначительной степени	~18 – 22	~500 – 600	~9,6	Грубодисперсные пластины
0,05	Присутствуют в незначительной степени	~18 – 22	~300 – 500	~6,5 – 8,2	Грубодисперсные пластины
0,1	Присутствуют в незначительной степени	~15 – 25	~200	~6 – 8	Тонкая, волокнистая
0,25	Присутствуют в незначительной степени	~15 – 25	~200 – 250	~6 – 8	Тонкая, волокнистая
0,5	Присутствуют в незначительной степени	~15 – 25	~220 – 270	~6 – 8	Тонкая, волокнистая

В связи с тем, что на сегодняшний день нет единого общепринятого объяснения действия модификатора на расплав, так как природа воздействий малых добавок на структуру неодинакова, более того, присутствует воздействие внешних факторов, автор придерживается одной из двух основных теорий модифицирования силуминов, которые на сегодняшний день существует. А именно то, что нанопорошок вольфрама послужил модификатором второй группы. К данному типу модификаторов относятся неограниченно растворимые вещества в жидкой фазе и достаточно малорастворимые в твердой фазе.

Модификатор второго рода должен обладать высокой температурой плавления и создавать твердые частицы, которые, в свою очередь, вызывают гетерогенные образования зародышей, или обладать способностью к образованию с компонентами расплава тугоплавких соединений, выступающих в той же роли. В момент охлаждения частицы вольфрама из-за своей более высокой температуры плавления служат многочисленными точками начала кристаллизации расплава,

что, в свою очередь, приводит к существенным изменениям структуры модифицированных отливок.

Исходя из данных оптической микроскопии видно, что в структуре АК12 обнаружены железомарганцовистые фазы скелетообразной и иглообразной формы, которые расположены в эвтектике ( $\alpha$ -Al + Si) и по границам зерен  $\alpha$ -Al (рисунок 2).



а – 0 % вольфрама; б – 0,01 % вольфрама; в – 0,1 % вольфрама

Рисунок 2 – РЭМ-изображения АК12 в режиме отраженных электронов

Размер фазы  $\alpha$ -(AlSiFeMn) составляет  $\sim 5 - 40$  мкм, фазы  $\beta$ -(AlSiFeMn)  $38 - 45$  мкм. После внедрения 0,01 % нанопорошка вольфрама наблюдается значительная трансформация морфологии фаз  $\alpha$ -(AlSiFeMn) и  $\beta$ -(AlSiFeMn). Железомарганцовистые фазы  $\alpha$ -(AlSiFeMn) и  $\beta$ -(AlSiFeMn) претерпевают изменения и становятся более компактной формы размером  $\sim 8 - 10$  мкм (рисунок 2, б). Присутствующие в структуре иероглифические компоненты уменьшились в размерах, стали менее выраженными и тонкими.

Проведенный DSC-анализ (рисунок 3) исходного расплава по ГОСТ и расплава с модификатором позволяет утверждать, что при внедрении нанопорошка вольфрама происходят изменения в процессах кристаллизации. Это подтверждает предположение, высказанное ранее при анализе данных, полученных при помощи, РЭМ, о том, что кристаллизация эвтектики ( $\alpha$ -Al + Si) в силумине марки АК12 без внедрения модификатора начинает протекать при температурах  $\sim 590$  °С. При внедрении модификатора в расплав наблюдается изменение температуры начала выделения эвтектики ( $\alpha$ -Al + Si) на  $\sim 9 - 10$  °С в область более высоких температурных значений и начинает соответствовать температурам  $\sim 598 - 600$  °С. Изменение температуры ликвидуса на  $\sim 8 - 9$  °С, а также смещение интервала кристаллизации на  $\sim 5$  °С привело к существенным изменениям в кристаллизации эвтектического кремния и железомарганцовистых фаз. Необходимо отметить, что описанные выше температурные смещения характерны для каждой концентрации вводимого модификатора.

При проведении плавок и заливок силумина с модификатором остается достаточно большой процент неусвоенного модификатора в количестве 25 до 30 % от исходно внедренного. Это связано с тем, что вольфрам обладает

большей атомной массой и плотностью по сравнению с алюминием, 183,84 г/моль и 19,25 г/см<sup>3</sup> против 26,98 г/моль и 2,69 г/см<sup>3</sup> соответственно.

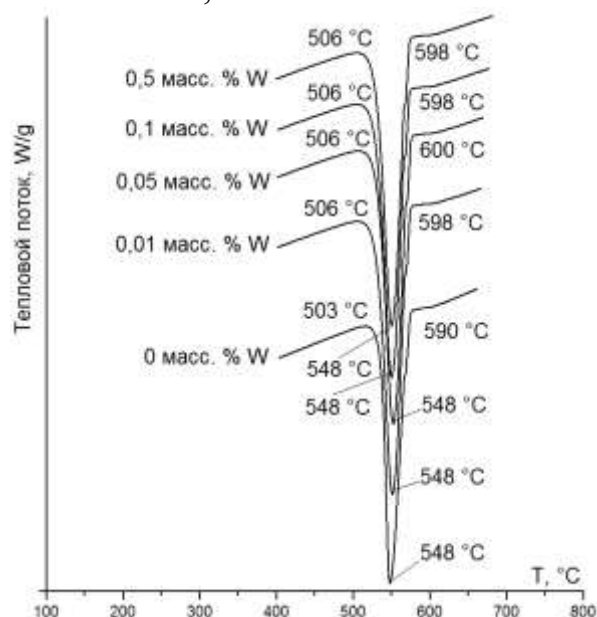
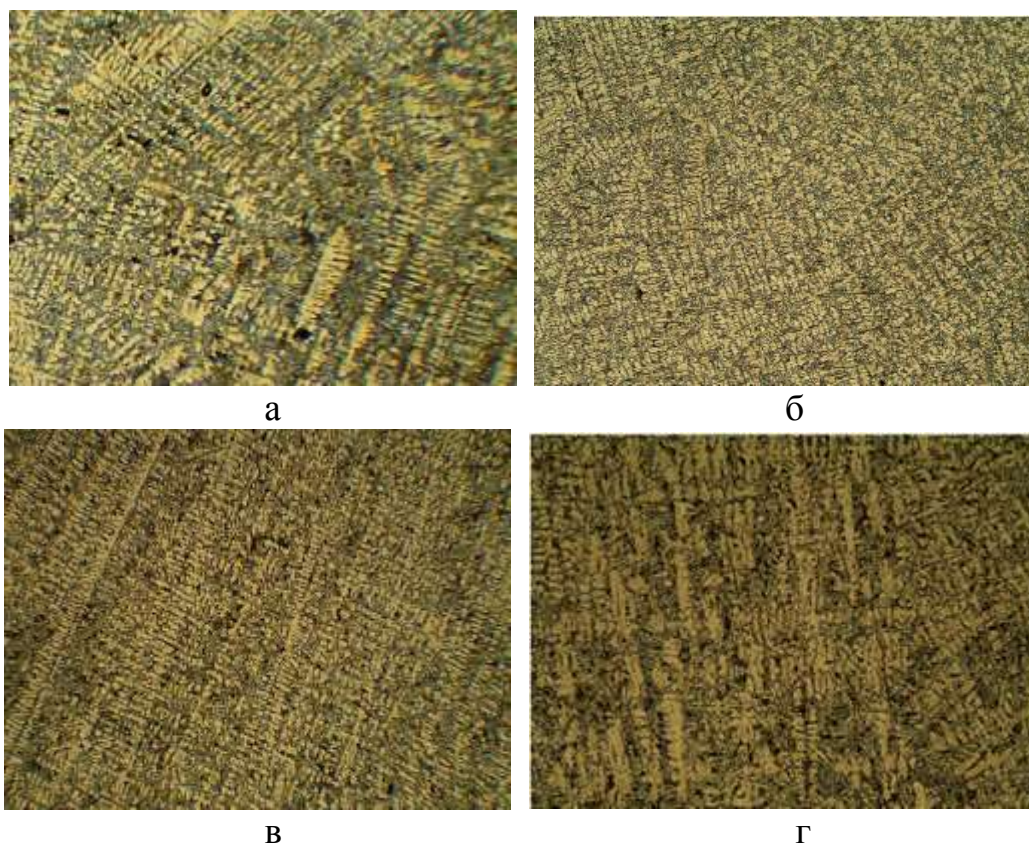


Рисунок 3 – DSC-анализ АК12 с различным содержанием вольфрама

Для того чтобы повысить усвояемость модификатора, увеличили время выдержки расплава с модификатором в печи с 10 мин  $\pm$  30 сек до 60 и 120 мин  $\pm$  30 сек соответственно. В образцах без модификатора оси первого порядка имеют длину в диапазоне от 500 до 800 мкм (рисунок 4, а). При выдержке расплава продолжительностью 10 мин  $\pm$  30 сек с модификатором в печи перед заливкой происходит существенное измельчение дендритов твердого раствора отливки. Кроме того, уменьшаются пластины Si, оси первого порядка сокращаются до  $\leq$  200 мкм, оси второго порядка – до  $\sim$ 35 мкм (рис. 4, б). Увеличение времени выдержки до 60 мин  $\pm$  30 сек приводит к формированию развитых дендритов твердого раствора кремния в алюминии (рис. 4, в). Оси первого порядка дендритов матрицы увеличиваются до 500 мкм, значительно увеличиваются оси второго порядка, а также расстояния между осями дендритов второго порядка с 18 – 22 мкм до  $\sim$ 34 мкм. Количество не усвоившегося модификатора сокращается до 10 – 15 %. При выдержке в течение 120 мин  $\pm$  30 сек усвояемость модификатора практически 100 %. Длина осей первого порядка сократилась до 300...400 мкм, уменьшились и оси второго порядка (рисунок 4, г), расстояние между осями дендритов второго порядка составило  $\sim$ 29 мкм. Значительное увеличение времени выдержки также приводит к изменениям в пластинах кремния – они уменьшаются в длине, но при этом их толщина возрастает.

Оптимальным с точки зрения оптической микроскопии является выдержка 10 мин  $\pm$  30 сек. При данной выдержке образцы обладают измельченной и не развитой дендритной структурой, а также короткими пластинами кремния. Улучшение качества микроструктуры отливок силумина марки АК12 при внедрении модификатора вольфрама приводит к изменению их механических характеристик. Данные по влиянию добавок нанопорошка вольфрама на механические свойства АК12 приведены на рисунке 5.



а – без модификатора; б – выдержка 10 мин  $\pm$  30 сек; в – выдержка 60 мин  $\pm$  30 сек; г – выдержка 120 мин  $\pm$  30 сек

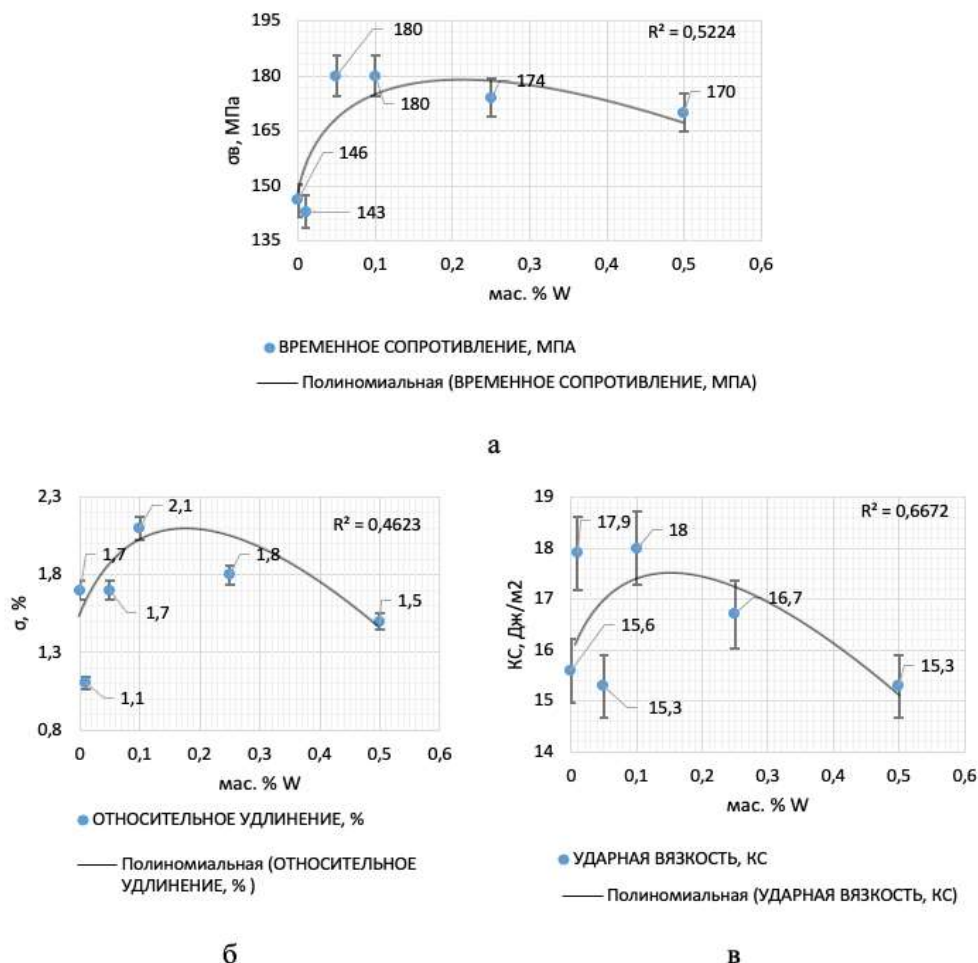
Рисунок 4 – Микроструктура силумина марки АК12 с различным временем выдержки вольфрама 0,1 %

Введение в расплав нанопорошка вольфрама в количестве 0,01 – 0,05 % оказывает неоднозначное влияние на механические свойства. При внедрении в расплав АК12 вольфрама в количестве 0,01 % наблюдается уменьшение относительного удлинения на 0,5 – 0,6 % и увеличение ударной вязкости на 15 – 16 %, изменение предела прочности лежит в пределах статистической погрешности измерений. При увеличении концентрации вольфрама до 0,05 % происходит скачок предела прочности на  $\sim 18 - 20$  %, но относительное удлинение и ударная вязкость остаются без изменений. Эти данные хорошо коррелируются и подтверждаются данными, полученными при анализе микроструктуры. При внедрении модификатора в такой концентрации микроструктура отливок претерпевает слабые изменения. Она по-прежнему характеризуется грубыми включениями эвтектического кремния, довольно большим размером пластин кремния, а также длинными осями первого порядка, хоть и не в такой степени как отливки без модификатора (таблица 1).

Напротив, показатели механических характеристик при концентрации 0,1 % возрастают, как видно из данных, приведенных на рисунке 5. Это хорошо согласуется с происходящими изменениями в микроструктуре (рисунок 1, 2, таблица 1). Модифицированная микроструктура имеет существенные отличия от немодифицированной – изменяется морфология хрупкого эвтектического кремния, он становится тонким и волокнистым. Сокращается и размер самих пластин



кремния в эвтектике; железомарганцовистые фазы, присутствующие в отливках, хоть и не исчезают, но претерпевают изменения в размерах и морфологии, а также более равномерно распределяются по сечению. В итоге мы получаем более мелкое и равномерное распределение кремниевых пластин и железомарганцовистых фаз. Эти фазы являются хрупкими включениями и негативно влияют на механические характеристики сплава. Тем самым полученные трансформации в микроструктуре влекут за собой повышение механических свойств полученного модифицированного сплава.



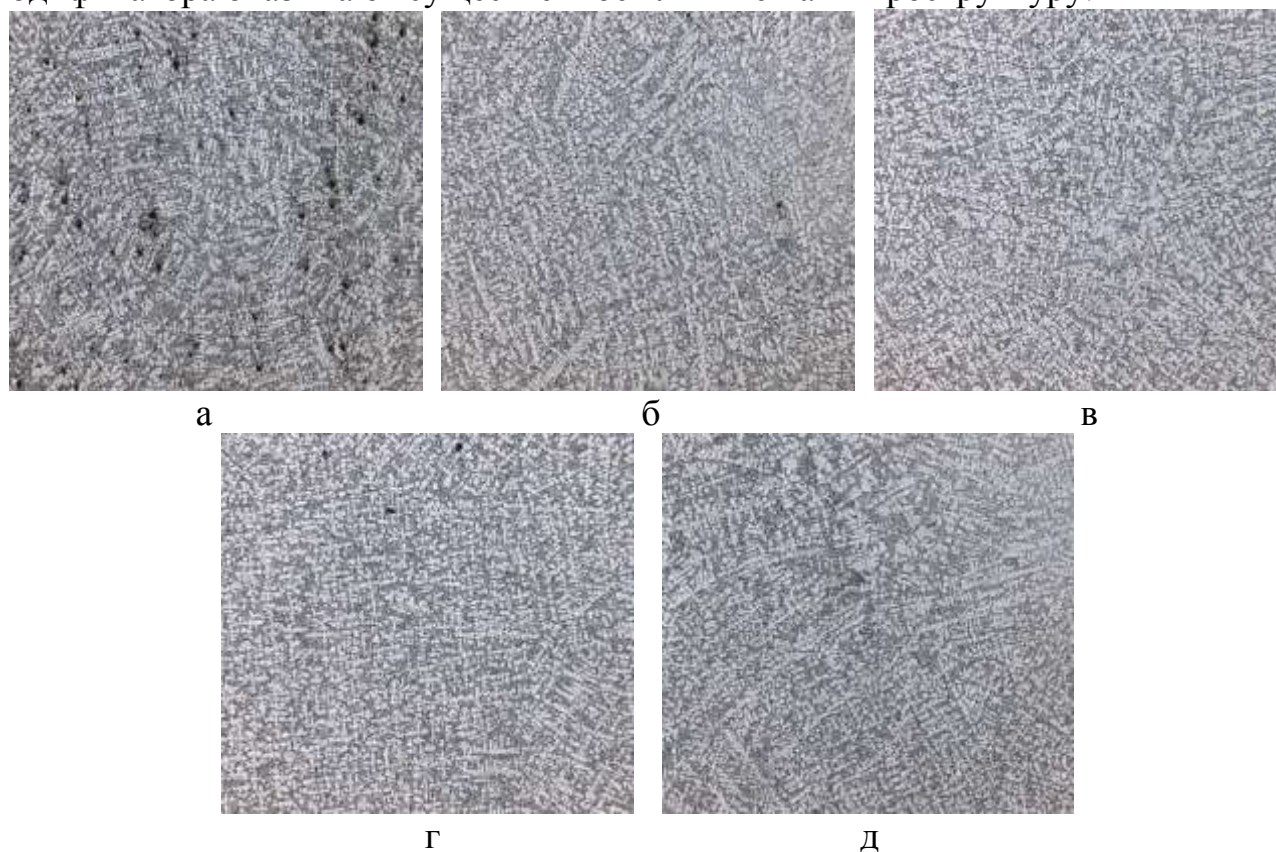
а – предел прочности, МПа; б – относительное удлинение, %; в – ударная вязкость КС

Рисунок 5 – Влияние нанопорошка вольфрама на свойства АК12

**В четвертой главе** представлены результаты использования модификатора на основе порошка вольфрама и УДП меди. Перед использованием порошка их подвергали механической активации в планетарно шаровой мельнице. Дополнительная обработка позволила плакировать частицы вольфрама частицами меди. Медь обладает хорошей растворимостью в силуминах и решает проблему плохой смачиваемости частиц порошка вольфрама. Механическая обработка позволяет также увеличить поверхностную энергию частиц за счёт образования линейных и точечных дефектов и создает положительный заряд на поверхности модификатора, что благоприятно сказывается на процессе модифицирования.

Введение предварительно активированного модификатора в расплав позволило снизить количество порошка, оставшегося на стенках тигля, с 25 – 30 %

до 6 – 11 %. Анализ микроструктуры модифицированных активированным порошком образцов (рисунок 6) показал, что даже малые добавки (0,01–0,5 %) модификатора оказывают существенное влияние на микроструктуру.



Вольфрам и медь %: а – 0,01; б – 0,05; в – 0,1; г – 0,25; д – 0,5

Рисунок 6 – Микроструктура силумина марки АК12 с различным содержанием вольфрама и меди

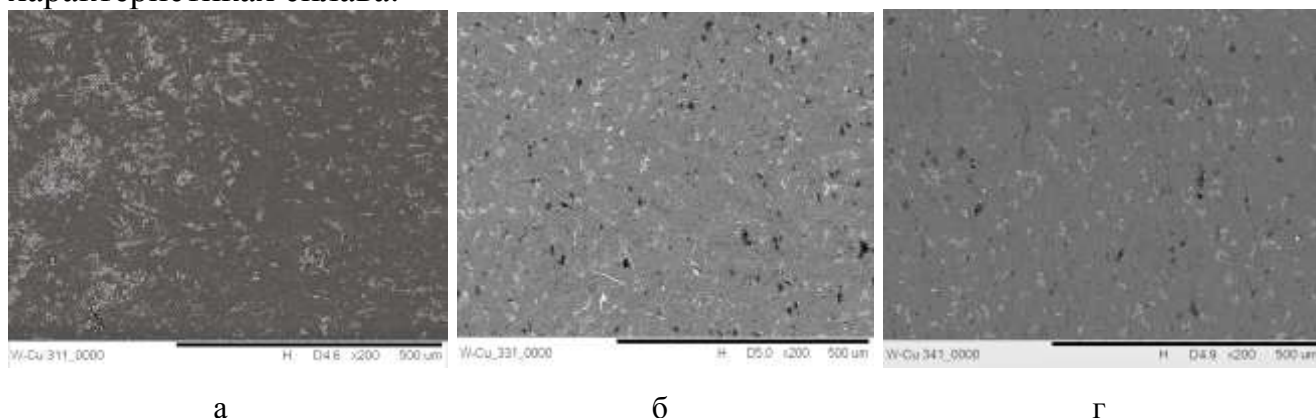
Исходя из данных оптической микроскопии видно, что введение в расплав 0,01 – 0,5 % порошка вольфрама и меди, предварительно обработанного в планетарно шаровой мельнице, оказывает влияние на микроструктуру получаемых отливок. Отливки с концентрацией модификатора вольфрама и меди 0,01 и 0,05 % имеют развитую дендритную структуру  $\alpha$ -Al с осями второго порядка. Расстояния между осями второго порядка составляет  $\sim 17 - 21$  мкм (рисунок 6а, б), то есть произошло смещение значений по сравнению со значениями при введении в расплав чистого порошка вольфрама. Оси третьего порядка практически отсутствуют. Имеются скопления эвтектики ( $\alpha$ -Al + Si) и пластины кремния с грубыми чертами. В границах этих пластин частицы Si с размерами  $\sim 0,8 - 1$  мкм. Средний размера пластин кремния в эвтектике при концентрации модификатора 0,01 % составил  $\sim 8,5$  мкм и  $\sim 5,9$  мкм при 0,05 %. Столь небольшие изменения при внедрении модификатора вольфрама и меди по сравнению с чистым вольфрамом (таблица 1) можно объяснить тем, что вольфрам внедрялся в соотношении 1/1 с порошком меди. В чистом виде нанопорошка вольфрама, который участвовал в модифицировании отливок, было  $\sim 0,005$  и 0,025 % соответственно.

При анализе данных, полученных при введении в расплав модификатора в концентрации 0,10; 0,25 и 0,50 %, можно утверждать, что происходят такие же

изменения, как и при внедрении чистого порошка вольфрама, эвтектический кремний приобретает более плавное очертание, становится волокнистым и тонким. При внедрении модификатора вольфрама в смеси с медью в количестве 0,1 % расстояний между осями второго порядка сокращается до  $\sim 13 - 16$  мкм, при концентрации 0,5 % до  $\sim 15 - 22$  мкм (рисунок 6, в–д). Размер пластин эвтектического кремния составляет  $\sim 5,7$ ;  $\sim 6$  и  $\sim 6,3$  мкм при концентрациях модификатора 0,10; 0,25 и 0,50 %.

Сокращение размеров происходит  $\sim$  на 5 – 30 %. Данное уменьшение размеров связано с более полным усвоением порошка в объеме отливки, а также в связи с тем, что медь лучше усваивается силуминами. Происходит более равномерное распределение частиц модификатора по сечению отливки и как следствие образование большего количества центров кристаллизации расплава. Наблюдаемая трансформация морфологии фаз, уменьшение в размерах, а также сокращение их количества и более равномерное распределение по сечению отливок подтверждается данными РЭМ (рисунок 7). Это более заметно при анализе и сравнении концентрации вольфрама и меди 0,01 % и концентрации модификатора вольфрама и меди 0,1 и 0,5 % (рисунок 7, а, б, г). Сокращение интерметаллидных соединений состава Al-Si-Fe-Mn сказывается благоприятным образом на механических характеристиках получаемых отливок из силумина марки АК12.

Данные включения, имеющие иглообразную и скелетообразную форму, достаточно хрупкие и могут послужить источниками трещин при дальнейших механических испытаниях, что неблагоприятно скажется на механических характеристиках сплава.

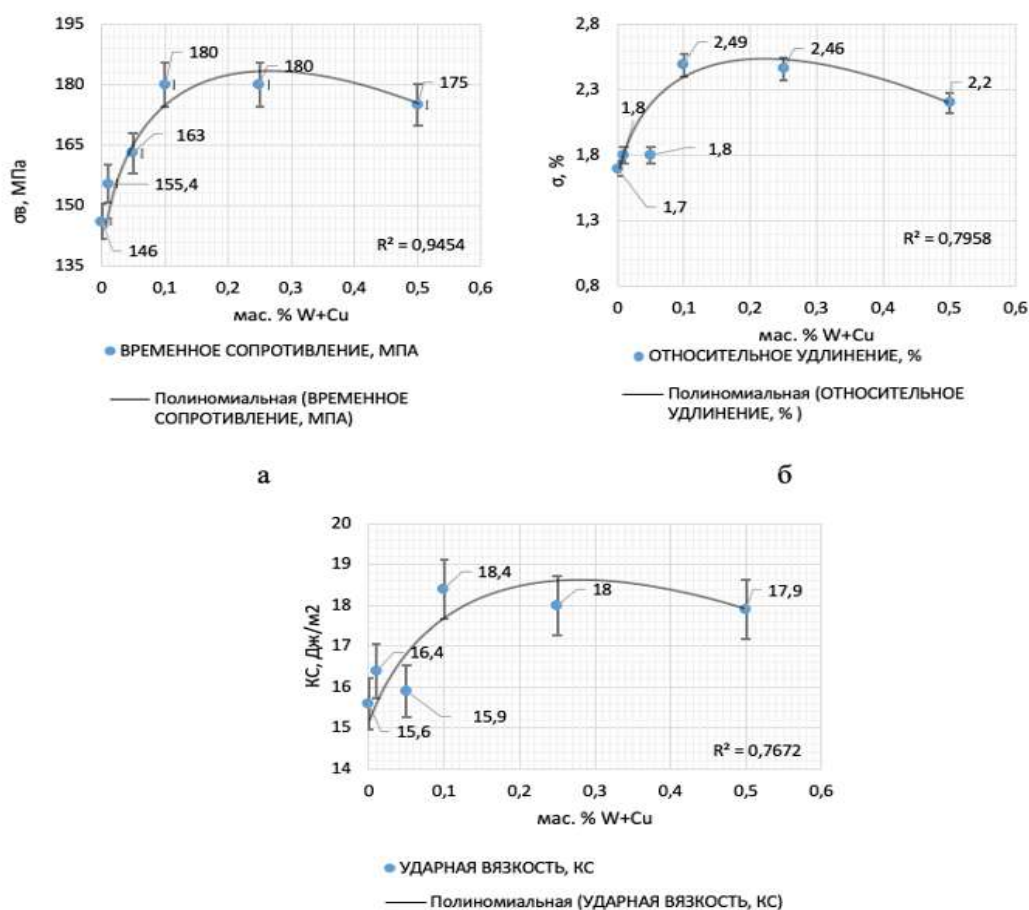


Вольфрам и медь %: а – 0,01; б – 0,1; г – 0,5

Рисунок 7 – РЭМ-изображения силумина марки АК12 с различным содержанием вольфрама и меди

Дополнительная обработка нанопорошка вольфрама в планетарной шаровой мельнице Активатор 2SL с ультрадисперсным порошком меди благоприятно влияет на микроструктуру отливок, увеличивает процент усваиваемости модификатора расплавом. Процент выпавшего в осадок порошка вольфрама снижается с 30 до 3 – 5,5 %. Также у отливок растут такие механические свойства, как предел прочности, относительное удлинение и ударная вязкость (рисунок 8).





а – предел прочности, МПа; б – относительное сопротивление, %; в – ударная вязкость КС  
Рисунок 8 – Влияние нанопорошка вольфрама и меди на свойства АК12

Анализ результатов механических испытаний (рисунок 8) показал, что наибольший прирост механических свойств дает добавка 0,1 % модификатора вольфрама и меди. Это верно и для неактивированного порошка чистого вольфрама, но при этом модифицирование чистым порошком дает выпадение его части в осадок. При модификации активированным порошком существенная часть порошка вольфрама заменяется медью, но в осадок почти ничего из модификатора не выпадает. В итоге в модификации участвует примерно равное количество порошка вольфрама. Но в случае с введением модификатора с добавкой УДП порошка меди показатели микроструктуры и механические характеристики несколько лучше. При внедрении 0,1 % такого модификатора предел прочности увеличивается на ~24 %, относительное удлинение выше показателей немодифицированных отливок на ~32 %, а ударная вязкость отличается от исходных показателей на 16 %.

**В пятой главе** приведены данные по промышленному испытанию и внедрению полученных результатов работы на предприятии ОАО «Томский электромеханический завод им. В.В. Вахрушева», г. Томск. В качестве практической реализации данной работы была поставлена задача решить проблему низкой стойкости ударных нагрузок и комплексное повышение качества отливок для корпусов гидроблоков.

При использовании технологии модифицирования отливок, основанной на результатах данной работы, зафиксировано повышение механических свойств отливок (ударной вязкости на  $\sim 22$  % предела прочности  $\sim 25$  %). Это связано с тем, что модификатор оказывает влияние на структуру и свойства силуминовых отливок.

Корпусные детали сложной конфигурации, изготавливаемые на предприятии ОАО «Томский электромеханический завод им. В.В. Вахрушева», обеспечили требуемые характеристики герметичности при гидроиспытаниях, а также повышенные механические свойства при механических испытаниях. При этом возможно уменьшение себестоимости деталей при использовании данной технологии, что окажет экономический эффект на предприятие.

**В приложении** приведен акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы на предприятии ОАО «Томский электромеханический завод им. В.В. Вахрушева».

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В ходе проведенных исследований были установлены качественные и количественные закономерности изменения структуры и свойств силумина в зависимости от количества модификатора нанопорошка вольфрама, его дополнительной обработки и времени выдержки расплава с модификатором в печи. Данные взаимосвязи изучались и анализировались на примере промышленной марки силумина АК12, тем не менее, качественно они могут быть распространены и на другие марки силумина.

На основании проведенных исследований можно сформулировать следующие основные выводы:

1. Установлено, что применение чистого нанопорошка вольфрама в качестве модифицирующей добавки возможно, но нецелесообразно. После модифицирования необработанным нанопорошком вольфрама до 30 % введенного порошка выпадает в осадок на дне и стенках тигля и непригодно для дальнейшего использования. Это обусловлено плохой смачиваемостью порошка расплавом. Увеличение времени выдержки расплава с порошком приводит к повышению усваиваемости порошка, но это отрицательно сказывается на микроструктуре и, как следствие, на механических свойствах получаемых отливок.
2. Выявлено, что введение нанопорошка в количестве, превышающем 0,1 %, снижает эффект модифицирования. При увеличении содержания нанопорошка структура начинала постепенно укрупняться, при этом агломерирование частиц порошка между собой также оказывало негативный эффект на механические характеристики модифицированных отливок. Эффект коагуляции снижал число центров кристаллизации, а также служил центрами концентраций напряжений.
3. Была апробирована технология активации нанопорошка вольфрама в смеси с ультрадисперсным порошком меди в планетарно шаровой мельнице, которая показала свою эффективность при достаточной простоте и низких энергетических затратах. Дополнительная обработка нанопорошка вольфрама приводит к увеличению усваиваемости модификатора расплавом и уменьшает остаточный процент модификатора в тигле с  $\sim 30$  до  $\sim 6-11$  %, а в пересчете на

чистый вольфрам с ~30 % (без дополнительной обработки) до ~3–5,5 %, что является экономически целесообразным ввиду высокой цены на нанопорошок вольфрама.

4. Доказано, что оптимальной концентрацией модификатора нанопорошка для получения высоких механических характеристик является 0,1 масс. %. При данном количестве модификатора нанопорошка вольфрама и меди идет измельчение структуры (уменьшение размера дендритов  $\alpha$ -Al твердого раствора), уменьшаются размеры игольчатых включений кремния, что благоприятно сказывается на свойствах полученных отливок. Установлено, что 0,1 масс. % вольфрама и меди является оптимальной добавкой, так как приводит к равномерному распределению эвтектики ( $\alpha$ -Al+Si), уменьшению пластин эвтектического кремния в 1,5 раза и изменению формы грубых пластин на тонкую волокнистую форму. При данной концентрации предел прочности увеличивается на ~24 %, относительное удлинение выше на ~46 %, ударная вязкость возрастает на 18 %.

## **ОСНОВНЫЕ ТРУДЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Мартюшев, Н. В. Модифицирование сплава марки АК12 частицами ультрадисперсного порошка вольфрама / Н. В. Мартюшев, А. П. Зыкова, В. С. Башев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. – № 3 (76). – С. 51–58. DOI: 10.17212/1994-6309-2017-3-51-58.

2. Мартюшев, Н. В. О модифицировании силумина АК12 ультрадисперсным порошком вольфрама / Н. В. Мартюшев, В. С. Башев // Литейное производство. – 2020. – № 4. – С. 11–14.

*Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Scopus:*

3. Martyushev, N. V. Influence of soaking time of modifier in melt on microstructure of Al-12%Si alloys / N. V. Martyushev, V. S. Bashev, A. P. Zyкова // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – V. 177: Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS 2016). – 012118, 5 p. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012118

*Статьи в других изданиях, труды научно-практических конференций:*

4. Башев, В. С. Модифицирование силумина ультрадисперсным порошком вольфрама / В. С. Башев, Н. В. Мартюшев, А. П. Зыкова // Проблемы и перспективы студенческой науки. – 2017. – № 1. – С. 35–36.

5. Башев, В. С. Влияние нанопорошка W на структурно-фазовое состояние и механические свойства сплава АК12 / В. С. Башев., науч. рук. Мартюшев Н. В. // Наука. технологии. инновации // Сборник научных трудов в 9 ч. / под ред. ст. преп. Ю.В. Ванаг. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Часть 3. – С. 11–13.

6. Башев, В. С. Исследование влияния нанопорошка Ti на микроструктуру и механические свойства сплава АК12 / В. С. Башев, А. В. Чумаевский, А. П. Зыкова, науч. рук. Мартюшев Н. В. // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общ. ред. М.В. Темлянцева. – Новокузнецк :

Изд. центр СибГИУ, 2017. – Вып. 21. – Ч. II Естественные и технические науки. – С. 146–148.

7. Башев, В. С. Исследование влияния нанопорошка Ti и TiO<sub>2</sub> на микроструктуру и механические свойства сплава АК12 / В.С. Башев, Н. В. Чумаевский, А. П. Зыкова / науч. рук. Н. В. Мартюшев // Инновации в машиностроении: сборник трудов VIII Международной научно-практической конференции / под ред. Х. М. Рахимянова. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. – С. 371–374.

8. Башев В.С. Исследование влияния модифицирования вольфрамом сплава АК12 // Фундаментальные и прикладные исследования: сборник научных трудов IV Всероссийской (национальной) конференции молодых ученых / под ред. Е.Г. Гуровой, С.В. Макарова. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – С. 6–7.

9. Башев, В. С. Исследование влияния модифицирования сплава АК12 порошком W+Cu // Фундаментальные и прикладные исследования: сборник научных трудов V Всероссийской (национальной) конференции молодых ученых / под ред. Е. Г. Гуровой, С. В. Макарова. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2019. – С. 3–4.

10. Башев, В. С. Влияние внедрения нанопорошка W на структуру и механические свойства литейного сплава марки АК12 // Труды XXI Международной научно-практической конференции: в 2-х ч. Ч. 2 / под ред. Е. В. Протопопова / Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2019. – С. 79–85.

11. Башев, В. С. Исследование влияния ультрадисперсного порошка W на структуру и свойства литейного сплава системы Al-Si // XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых): Международная молодёжная научная конференция, 7–8 ноября 2019 г.: Материалы конференции. Сборник докладов. – В 6 т.; Т. 1. – Казань : Изд-во ИП Сагиева А.Р., 2019. – С. 231–235.

12. Модифицирование силумина АК12 УДП вольфрама / Н. В. Мартюшев, В. С. Башев // Современные технологии, экономика и образование сборник материалов II Всероссийской научно-методической конференции, г. Томск, 2-4 сентября 2020 г.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет ; под ред. А. Г. Фефеловой, Е. А. Покровской, И. О. Болотиной [и др.]. — Томск : Изд-во ТПУ , 2020 . — [С. 101-104]