

*На правах рукописи*



**КУР Александр Александрович**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИК КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ  
МИКРОСТРУКТУРЫ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ  
СВОЙСТВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ДОЭВТЕКТИЧЕСКИХ СИЛУМИНОВ**

Специальность: 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка  
металлов и сплавов

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор

**Казakov Александр Анатольевич**, профессор кафедры металлургических и литейных технологий ФГАОУ ВО «СПбПУ»

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор **Белов Николай Александрович**, главный научный сотрудник кафедры обработки металлов давлением ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”» (г. Москва)

доктор технических наук, доцент **Батышев Константин Александрович**, главный научный сотрудник ГНЦ РФ АО «НПО «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения» (г. Москва)

**Ведущая организация:**

**ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»** (г. Самара)

Защита состоится «07» декабря 2017г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.03 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, главный корпус, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «СПбПУ» и на сайте [www.spbstu.ru](http://www.spbstu.ru).

Автореферат разослан "        " октября 2017г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.229.03

кандидат технических наук



Климова О.Г.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы**

В промышленности механические свойства металлических материалов являются основной сдаточной характеристикой, на которой строится вся система их качества. Это понятно, так как расчёты конструкторов при оценке работоспособности и ресурса деталей основаны на характеристиках механических свойств сплавов, которые могут быть измерены количественно при испытаниях соответствующих образцов. Однако микроструктура, например, литых образцов, на которых определены свойства, и микроструктура сплавов в готовой отливке, как правило, различны. Более того, литая деталь разнотолщинная, а, следовательно, скорости затвердевания в её малых и больших сечениях, как и в одном сечении, но у поверхности и в центре, будут значительно различаться. По этой причине структура сплава в готовых отливках будет различной в разных локальных объёмах, затвердевающих с разной скоростью.

Современное программное обеспечение позволяет производить прочностные расчёты вплоть до разрушения сложных изделий или целых конструкций. Однако особенности микроструктуры в разных локальных точках сложных фасонных отливок и связанное с этим изменение механических свойств до настоящего времени не учитываются.

Все вышесказанное справедливо и для силуминов – литейных сплавов на основе системы Al-Si, широко применяющихся для фасонного литья в авто-, мото- и авиастроении и других отраслях промышленности.

Разработка количественных методов оценки микроструктуры силуминов позволит не только объективно проводить приёмо-сдаточные испытания, но и построить систему качества производства таких сплавов в целом. Установленные взаимосвязи «структура-свойство» значительно повысят точность и достоверность прочностных расчётов, а также оценок ресурса изготовленных из этих сплавов деталей и конструкций.

### **Степень разработанности**

В настоящее время система качества для алюминиевых сплавов построена в основном на измерении их механических свойств, а для оценки структуры используют стандартные шкалы, например, дисперсности эвтектики (шкала

микроструктур силуминов Американского общества литейщиков) или пористости (ГОСТ 1583-93), либо атласы микроструктур, в том числе с описанием браковочных признаков, например, пережога. Методики автоматического количественного анализа структуры алюминиевых сплавов отсутствуют.

**Цель работы:** Разработка методической основы системы качества промышленных доэвтектических силуминов на базе количественной оценки их микроструктуры методами оптической металлографии.

Для достижения этой цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Выявлены фазовые и структурные составляющие медистых силуминов, определяющие их механические свойства.
2. Разработаны методики количественного описания структуры силуминов, основанные на анализе панорамных изображений.
3. Выполнен критический количественный анализ отдельных структурных параметров силуминов на предмет их взаимозависимости и значимости влияния на механические свойства сплавов.
4. Установлены количественные закономерности «структура-свойство» для промышленных медистых силуминов и определены критические значения параметров структуры, обеспечивающие механические свойства сплавов, соответствующих требованиям ГОСТ 1583-93.

**Научная новизна:**

1. Разработана методическая основа системы качества промышленных доэвтектических медистых силуминов, основанная на количественной оценке их микроструктуры.
2. Выполнена количественная оценка взаимозависимости и значимости влияния на механические свойства сплавов отдельных структурных параметров медистых силуминов.
3. Установлены количественные закономерности «структура-свойство» для прогнозирования твёрдости и относительного удлинения медистых силуминов по их структуре.

**Практическая значимость работы:**

1. Разработаны современные количественные методики оценки структуры медистых силуминов с помощью автоматического анализа панорамных изображений для:

- а. объёмной доли эвтектики;
  - б. дисперсности эвтектики, согласующейся со шкалой микроструктур силуминов Американского общества литейщиков;
  - в. пористости, согласующейся с баллом по ГОСТ 1583-93.
2. Определены требования к микроструктуре сплава АК6М2 в литом, отожжённом, закалённом и искусственно состаренном состояниях, которые могут гарантировать механические свойства, соответственно, регламентированные ГОСТом или требованиями заказчика.
  3. Разработаны методики травления для выявления дендритной структуры и интерметаллидных включений в силуминах, позволяющие повысить точность их количественной оценки.

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

1. Взаимозависимость отдельных структурных параметров силуминов и их значимость влияния на механические свойства сплавов.
2. Количественные методики оценки структуры силуминов с помощью автоматического анализа панорамных изображений, в частности:
  - применение текстурного анализа для оценки объёмной доли эвтектики, основанное на дискриминации по признаку «гомогенность»;
  - применение Евклидовой карты расстояний для количественной оценки дисперсности эвтектики;
  - количественная зависимость балла пористости по ГОСТ 1583-93 от объёмной доли пор в сплаве.
3. Уравнения регрессии, адекватно описывающие твёрдость и относительное удлинение сплава АК6М2 в литом, отожжённом, закалённом и искусственно состаренном состояниях, в зависимости от найденных независимых параметров структуры.
4. Методики селективного травления для выявления дендритной структуры и интерметаллидных включений с последующей их количественной оценкой на панорамных изображениях.

#### **Апробация работы**

Основные материалы диссертационной работы доложены и обсуждены: на международной научно-технической конференции «Современные металлические

материалы и технологии (СММТ'2013)», Санкт-Петербург, 2013г; на молодёжной научно-практической конференции в рамках Недели науки СПбПУ, Санкт-Петербург, 2014г; на международной научно-практической конференции «Литейное производство сегодня и завтра», Санкт-Петербург, 2014г; на международном симпозиуме «Microscopy and Microanalysis 2015», Портланд, Орегон, США, 2-6 августа 2015г.

Результаты диссертационной работы отражены в 6-ти публикациях, 2 из которых включены в перечень ВАК и международную базу Scopus.

**Личный вклад автора.** Личный вклад автора заключается в постановке цели и задачи работы, подготовке и проведении теоретической и экспериментальной работы, обработке полученных в результате исследования данных, их обобщении и формулировке выводов, в подготовке к публикации полученных результатов.

**Структура и объем диссертации:** Диссертация состоит из введения, 5 глав, 11 выводов, библиографического списка из 83 наименований. Работа изложена на 171 странице машинописного текста, содержит 109 иллюстраций и 13 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **1. Обзор литературы**

Рассмотрены фазовые и структурные составляющие промышленных силуминов с использованием соответствующих диаграмм состояния. Описаны изменения структуры сплавов после различных видов термообработки. Рассмотрено влияние технологии получения силуминов на их структуру. Определены основные фазовые и структурные составляющие промышленных силуминов, оказывающие значимое влияние на их свойства. Изучены методики выявления структуры алюминиевых сплавов. Проведён критический анализ литературы по существующим методикам оценки структуры промышленных силуминов и показано их несовершенство или полное отсутствие. На основе этого сформулированы актуальность, цель и задачи работы.

### **2. Материалы и методика исследований**

Исследовали образцы промышленного сплава АК6М2 в литом, отожжённом, закалённом и искусственно состаренном состоянии, а так же образцы промышленных сплавов АК7п, АК9ч, АК8М и АК9М2 в литом состоянии. Всего исследовано 70 образцов промышленных сплавов.

Эвтектика (Al)+(Si) является одним из важнейших структурных элементов медистых силуминов. Механические свойства этих сплавов в значительной степени определяются её дисперсностью, которая зависит от модифицирования расплава и тепловых условий разливки и затвердевания. Исследовали образцы без модифицирования и обработанные различными модификаторами (до 0,02% стронция, до 0,2% титана, до 1% мелкокристаллических добавок исходного сплава). Дополнительно изменяли теплофизические условия разливки и затвердевания, чтобы получить максимальное морфологическое разнообразие эвтектики.

Механические свойства (предел текучести, предел прочности, удлинение) оценивали при комнатной температуре после испытаний на универсальной машине Zwick/Roell Z150 по ГОСТ 1497-84.

Рентгеноспектральный микроанализ химического состава интерметаллидных фаз проводили с использованием энергодисперсионного спектрометра Oxford Instruments X-Max 80, установленного на ПЭМ Zeiss Supra 55VP. Для термодинамического моделирования использовали программное обеспечение FactSage, оснащённое базами данных SGTE. Интерметаллидные фазы выделяли травлением в 25% водном растворе едкого натра в течение 5-10 секунд. Дендритную структуру выявляли с помощью глубокого травления 25% раствором едкого натра в воде в течение 3 минут.

Металлографический анализ проводили с помощью моторизованного оптического микроскопа Carl Zeiss Axiovert 200 MAT, оснащённого анализатором изображений Thixomet Pro.

### **3. Разработка методик количественной оценки параметров структуры силуминов**

Фазовые и структурные составляющие силуминов изучали методами рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) на электронном микроскопе для последующего корректного распознавания и оценки структуры методами количественной металлографии с использованием светового оптического микроскопа.

#### *Фазовые и структурные составляющие сплава АК6М2 и их интерпретация*

В исследованных сплавах АК6М2, наряду с  $\alpha$ -твёрдым раствором на основе алюминия (Al) и эвтектическим кремнием, с помощью РСМА были обнаружены и

идентифицированы другие фазы: 1)  $\alpha$ -фаза ( $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ ) в форме иероглифов, 2) крупнопластинчатая железосодержащая  $\beta$ -фаза ( $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ), 3) компактная  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ; 4) мелкодисперсная  $\theta$ -фаза ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ) (рис.1, а).

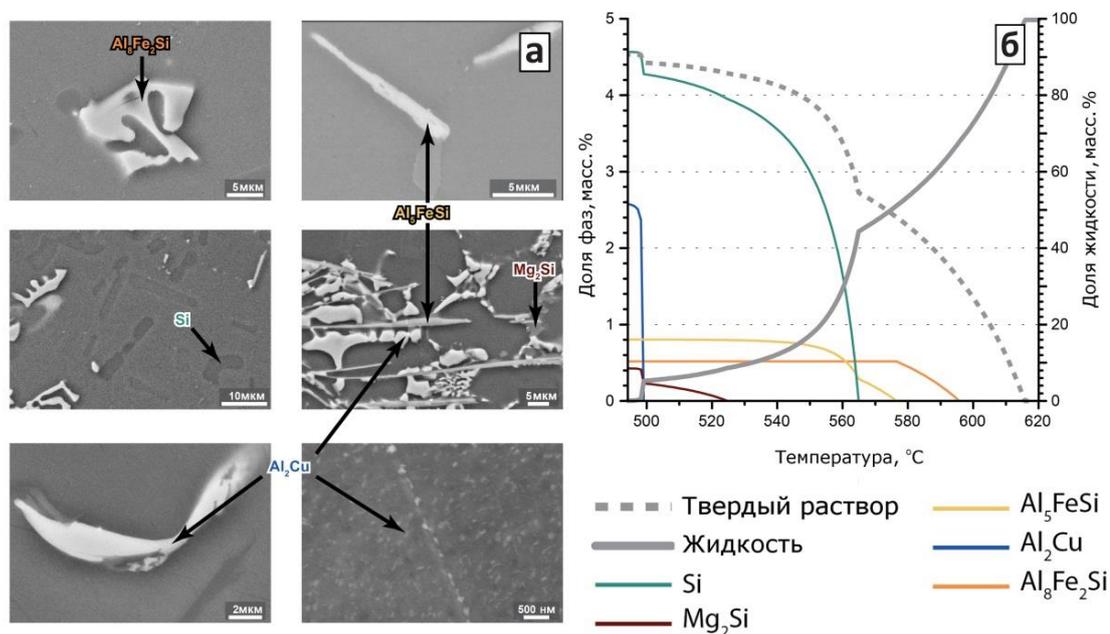


Рис. 1. Фазовый состав сплава АК6М2 (а) и его интерпретация с помощью термодинамического моделирования (б)

Состав, размер и морфология этих фаз соответствует их термовременной природе, выявленной методами термодинамического моделирования. На рис.1б приведены результаты термодинамического моделирования процессов затвердевания, рассчитанные по правилу неравновесного рычага в соответствии с уравнением Гулливера-Шейла. В самом начале затвердевания сплава образуется неравновесная  $\alpha$ -фаза  $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$  в составе эвтектики, имеющая морфологию иероглифов. К середине затвердевания эстафета фазообразования передаётся к железосодержащей  $\beta$ -фазе  $\text{Al}_5\text{FeSi}$ , которая образует крупные первичные пластинчатые интерметаллиды. Второй момент интенсивного образования  $\beta$ -фазы совпадает с началом затвердевания (Al)+(Si) эвтектики. В конце эвтектического затвердевания образуются  $\text{Mg}_2\text{Si}$  в составе тройной эвтектики (Al)+ $\text{Mg}_2\text{Si}$ +(Si) и интерметаллиды  $\text{Al}_2\text{Cu}$  в составе четверной эвтектики (Al)+ $\text{Mg}_2\text{Si}$ + $\text{Al}_2\text{Cu}$ +(Si). При повышенной скорости охлаждения расплава четверная эвтектика не успевает образоваться, тогда при дальнейшем охлаждении из твёрдого раствора выделяются мелкодисперсные интерметаллиды  $\text{Al}_2\text{Cu}$  (рис. 1, б).

### *Объёмная доля эвтектики*

Объёмная доля эвтектики в сплаве является одной из самых важных характеристик силуминов. Определение этой величины не представляет затруднений для мелкодисперсной эвтектики, границы колоний которой с твёрдым  $\alpha$ -раствором чётко очерчены. В случае грубой или вырожденной эвтектики нет чётких границ эвтектических колоний с  $\alpha$ -раствором на основе алюминия, поэтому их определение известными методами невозможно, хотя наибольшее снижение пластичности наблюдается в сплавах с грубыми эвтектическими колониями, связанными в объёме в единый скелет.

Для количественной оценки с помощью анализа изображений объёмной доли эвтектики независимо от её морфологии предложен алгоритм, основанный на текстурном анализе, который заключается в поиске количественных признаков, характеризующих данное изображение. Одним из способов поиска текстурных признаков изображения является построение матриц совместной встречаемости уровней серого  $P_d$ , элементы которых представляют собой условную вероятность  $P_d(i,j)$  возникновения пикселя с уровнем яркости  $i$  на расстоянии  $d$  от пикселя с уровнем яркости  $j$ . Далее вычисляют параметр «гомогенность» ( $H_d$ ):

$$H_d = \sum_i \sum_j \frac{P_d(i,j)}{1+|i-j|} \quad (1)$$

Гомогенность характеризует рассеяние матрицы  $P_d(i,j)$  относительно главной диагонали, которое отражает размер зерна или грубость текстуры. Для областей изображения, находящихся в  $\alpha$ -растворе, коэффициент гомогенности будет больше, чем для эвтектики. Таким образом, задав порог дискриминации по гомогенности, можно выделить область, ограниченную эвтектикой (рис.3).

### *Дисперсность эвтектики*

Другим важным параметром структуры медистых силуминов является дисперсность эвтектики (Al)+(Si), определяемая размером и морфологией частиц кремния. Однако определение размера отдельных частиц, слипшихся в эвтектических колониях, представляет известные трудности.

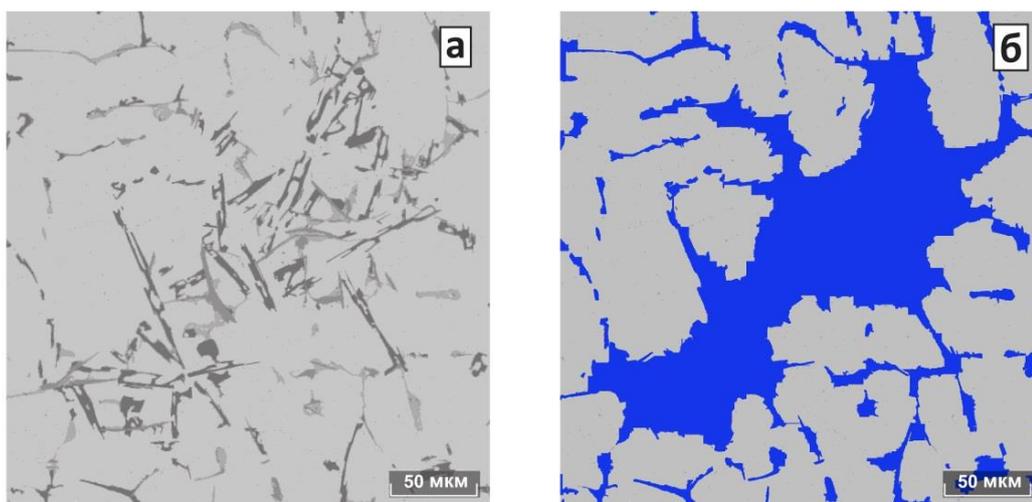


Рис. 3. Структура сплава АК6М2: исходная (а) и с распознанной эвтектикой (б)

Дисперсность эвтектики оценивали по среднему из максимальных диаметров по Фере и вытянутости частиц кремния в эвтектических колониях без разделения их на отдельные кристаллы. В результате обработки 18 панорам силуминов с разной дисперсностью эвтектики, охватывающей все её классы согласно шкалам американского общества литейщиков (American Foundry Society, AFS), получено уравнение, которое адекватно описывает все эти классы:

$$K_{AFS}(L_{Si}, El_{Si}) = 7,63 - 0,15 \cdot L_{Si} - 1,38 \cdot El_{Si} \quad (2)$$

здесь:  $L_{Si}$  и  $El_{Si}$  – длина и вытянутость кремния в эвтектических колониях.

Другим способом оценки дисперсности эвтектики может быть методика, основанная на построении Евклидовой карты расстояний. На панорамных изображениях все частицы кремния, включая конгломераты слипшихся частиц в эвтектических колониях, выделяли по уровню серого. Затем на полученном бинарном изображении таких объектов вычисляли среднее расстояние от всех точек, расположенных внутри частиц кремния в эвтектических колониях, до соответствующих границ этой частицы с  $\alpha$ -твёрдым раствором на основе алюминия (рис. 4).

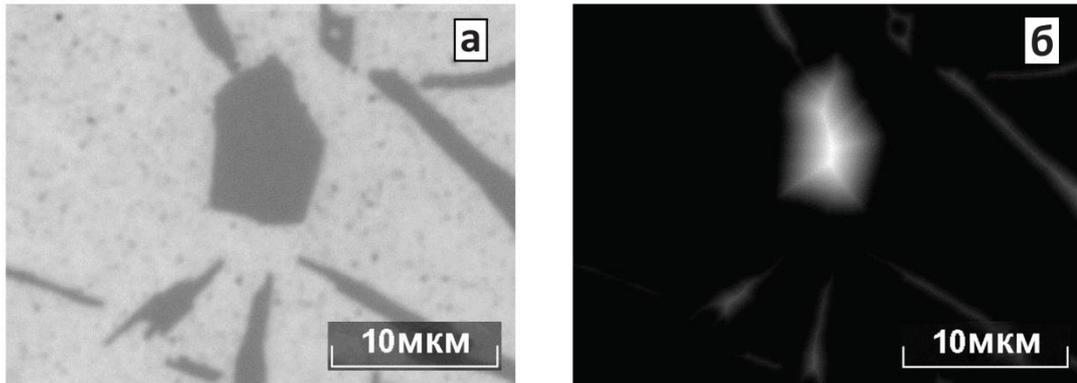


Рис. 4. Частицы кремния в сплаве АК6М2(а) и их карты Евклидовых расстояний (б)

Величину, обратную этому среднему расстоянию, назвали коэффициентом дисперсности эвтектики, который характеризует средневзвешенную толщину поперечного сечения всех выделенных частиц кремния в эвтектических колониях. В результате обработки тех же 18 панорамных изображений, что и для определения  $K_{AFS}(L_{Si}, El_{Si})$ , получено другое уравнение, которое так же адекватно описывает все классы эвтектики по шкале AFS, но уже с новыми параметрами структуры:

$$K_{AFS}(K_{эвт}, El_{Si}) = 3,98 + 2,58 \cdot K_{эвт} - 1,38 \cdot El_{Si} \quad (3)$$

здесь:  $K_{эвт}$  и  $El_{Si}$  – коэффициент дисперсности эвтектики и вытянутость кремния в эвтектических колониях.

Как видно из рис. 5, класс эвтектики, определённый по панорамам реальных структур силуминов, хорошо описывает все классы согласно шкале AFS. Результаты, полученные с помощью оригиналов эталонных изображений шкал AFS, сильнее отклоняются от этой прямой из-за небольших размеров полей зрения и низкого качества фото-эталонов.

Из сравнения этих двух методик можно сделать вывод, что оба параметра (средняя длина и коэффициент дисперсности) совместно с вытянутостью кремния в эвтектических колониях одинаково хорошо описывают все классы эвтектики по шкале AFS и могут быть использованы для оценки качества структуры силуминов в промышленности.

Длина и вытянутость частиц кремния в эвтектических колониях это независимые параметры и их совместное использование позволяет описать классы эвтектики по шкале AFS. Однако, как будет показано ниже, для исследованных сплавов вытянутость не оказывает значимого влияния на их механические свойства, поэтому для оценки качества структуры силуминов разработана

восьмибалльная шкала (рис. 6), основанная только на средней длине кремния в эвтектических колониях.

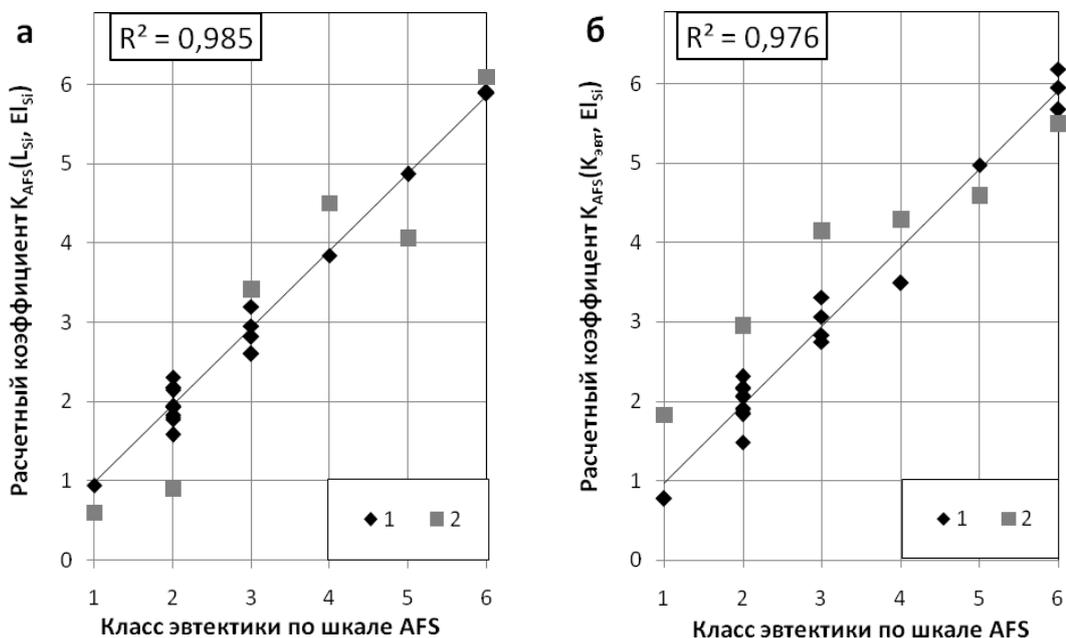


Рис. 5. Описание класса эвтектики по шкале AFS с помощью параметров:  
 а)  $L_{Si}$  и  $El_{Si}$ ; б)  $K_{эвт}$  и  $El_{Si}$ . 1 – исследованные образцы, 2 – эталонные изображения  
 шкал AFS

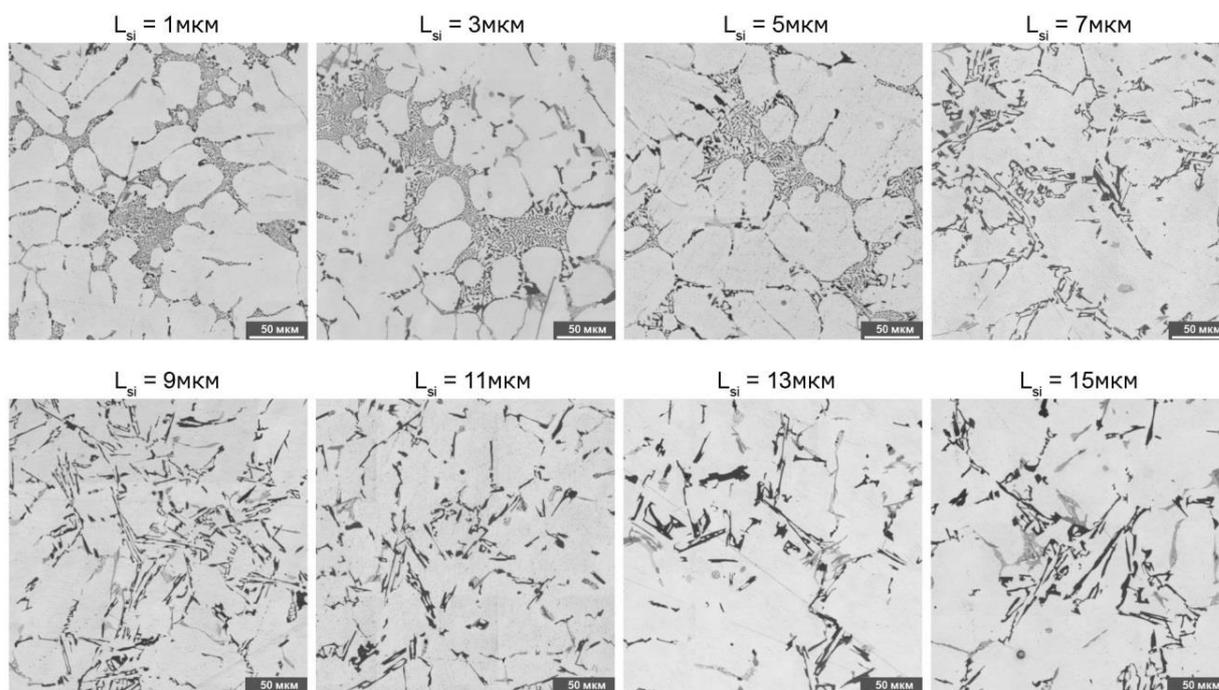


Рис. 6. Классы дисперсности эвтектики, основанные на средней длине частиц кремния в эвтектических колониях

## *Интерметаллиды*

Как известно, грубые интерметаллиды размером более 5 мкм оказывают отрицательное влияние на пластические свойства сплава. Их объёмную долю измеряли по ASTM E 1245. Для однозначного определения границ интерметаллидов исходные изображения обрабатывали алгоритмом подчёркивания границ. Размер и форму интерметаллидов оценивали с помощью максимального диаметра по Фере и вытянутости аналогично оценке дисперсности эвтектики.

### *Выбор параметров структуры для описания свойств*

Для выявления взаимосвязей «структура-свойство» измеряли следующие параметры структуры литых и отожжённых сплавов АК6М2:  $\lambda_2$  – расстояние между дендритными осями 2-го порядка;  $V_p$  – объёмная доля пор;  $HV_\mu$  – микротвёрдость  $\alpha$ -твёрдого раствора на основе алюминия, как характеристика дисперсионного и твёрдорастворного упрочнения;  $V_{эвт}$  – объёмная доля эвтектики по методике, разработанной в настоящей работе;  $L_{Si}$  – средняя длина кремния в эвтектических колониях;  $K_{эвт}$  – коэффициент дисперсности эвтектики, разработанный в настоящей работе;  $El_{Si}$  – вытянутость кремния в эвтектических колониях;  $V_i$  – объёмная доля интерметаллидов диаметром более 5 мкм (далее крупные интерметаллиды);  $L_i$  – средняя длина интерметаллидов;  $El_i$  – вытянутость интерметаллидов (вытянутость определяли как отношение максимального к минимальному диаметру по Фере).

При температуре отжига 300°C растворимость меди в алюминии повышается до 1 % масс., поэтому субмикронные неравновесные выделения упрочняющих фаз, образовавшиеся в литом металле, растворяются. Возможно частичное растворение крупных частиц  $Al_2Cu$ . После отжига следует ожидать более равномерное распределение меди по сечению  $\alpha$ -твёрдого раствора на основе алюминия по сравнению с литой структурой, где выделения  $\theta$ -фазы ( $Al_2Cu$ ) сосредоточены вокруг дендритных ветвей. Основные фазы, составляющие структуру данного сплава (кремний, железосодержащие интерметаллиды, крупные частицы  $Al_2Cu$ ) не претерпевают значительных изменений при отжиге, поэтому методики и алгоритмы, разработанные для литого сплава, должны работать и для отожжённого состояния. По этой причине результаты металлографических исследований и свойства литых и отожжённых сплавов были объединены в одну выборку для их последующего совместного анализа.

Для выбора уникальных параметров микроструктуры, определяющих свойства, был проведён анализ их взаимозависимости. Так, для сплава одинакового состава многие параметры микроструктуры определяются скоростью его затвердевания, о которой можно судить по дисперсности дендритной структуры, оценённой расстоянием между дендритными осями 2-го порядка ( $\lambda_2$ ). На рис.7а приведён пример влияния  $\lambda_2$  на дисперсность эвтектики, которая, в свою очередь, определяет размер частиц кремния (рис. 7б).

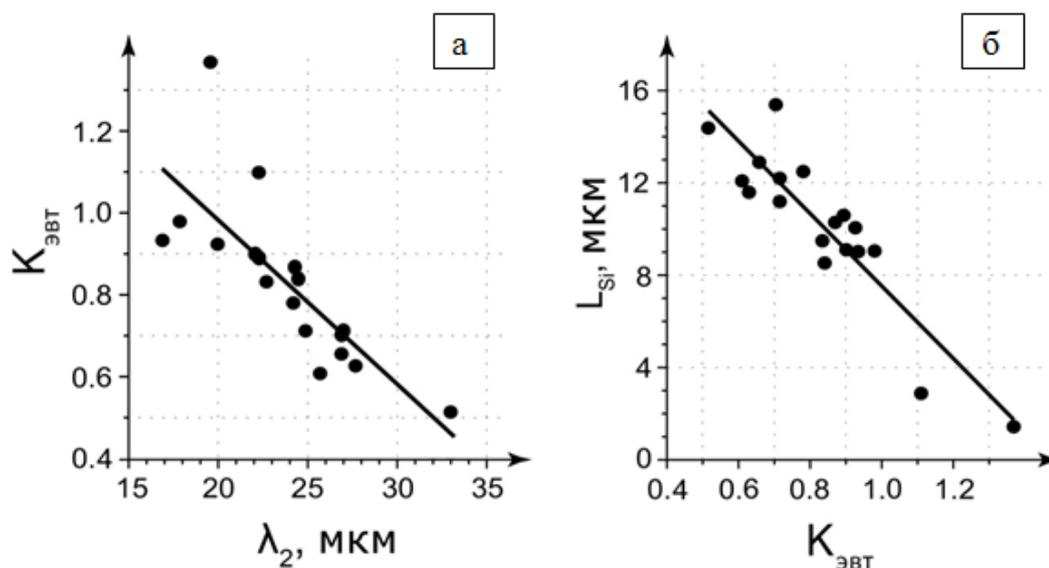


Рис. 7. Взаимозависимость структурных параметров: а) коэффициент дисперсности эвтектики ( $K_{эвт}$ ) и расстояние между дендритными осями второго порядка ( $\lambda_2$ ), б) средняя длина частиц кремния ( $L_{Si}$ ) и коэффициент дисперсности эвтектики ( $K_{эвт}$ )

Как видно из рис. 7а, дисперсность эвтектики закономерно снижается при огрублении дендритной структуры, однако в области дисперсной дендритной структуры наблюдается повышенный разброс точек. Это связано с тем, что дисперсность эвтектики определяется не только скоростью затвердевания, но и эффективностью модифицирования. Поскольку основной задачей данной работы была оцифровка структуры сплавов для количественного описания их механических свойств, то для этой цели выбрали дисперсность эвтектики, как интегральный параметр, учитывающий вклад в формирование структуры и свойств силуминов как скорости охлаждения, так и эффективности модифицирования.

Из рис. 7б следует, что длина частиц кремния и коэффициент дисперсности эвтектики взаимозаменяемы и любой из этих параметров одинаково хорошо описывают морфологию эвтектики. Заметим, что длина частиц кремния оценивается без использования сложных алгоритмов обработки изображений, которые необходимы для определения коэффициента дисперсности эвтектики. Поэтому в дальнейших исследованиях для поиска взаимосвязи «структура-свойство» выбрали длину частиц кремния в эвтектических колониях.

#### 4. Поиск взаимосвязи «структура-свойство»

Независимые параметры структуры силуминов (объёмная доля пор, микротвёрдость  $\alpha$ -твёрдого раствора на основе алюминия, объёмные доли эвтектики и крупных интерметаллидов, средняя длина частиц кремния в эвтектических колониях, вытянутость частиц кремния в эвтектических колониях, средняя длина и вытянутость крупных интерметаллидов) были использованы для описания относительного удлинения и твёрдости сплавов, регламентированных ГОСТ 1583-93. При этом пористость контролировали, чтобы исключить из рассмотрения дефектные образцы с содержанием пор более 1% (объёмн.). В таких образцах всегда наблюдали провал механических свойств.

Пористость – неизбежный элемент литой структуры силуминов, при этом следует различать газовую и усадочную пористость. Равномерно распределённые по объёму газовые поры могут быть оценены с помощью стереологических методов, использованных в ASTM E 1245. Усадочные поры, неравномерно распределены по объёму отливки преимущественно в её тепловых центрах, могут быть описаны лишь качественно.

В России газовую пористость литейных алюминиевых сплавов оценивают по шкалам ГОСТа 1583-93. Этот метод субъективен и не даёт количественной металлографической оценки. Стандартные шкалы пористости по ГОСТ 1583-93 были оцифрованы с помощью ASTM E 1245. Балл пористости по ГОСТ 1583-93 адекватно описывается объёмной долей пор по ASTM E 1245 (рис. 8) согласно уравнению:

$$G_p = 2,7 \cdot V_p^{0,24} \quad (4)$$

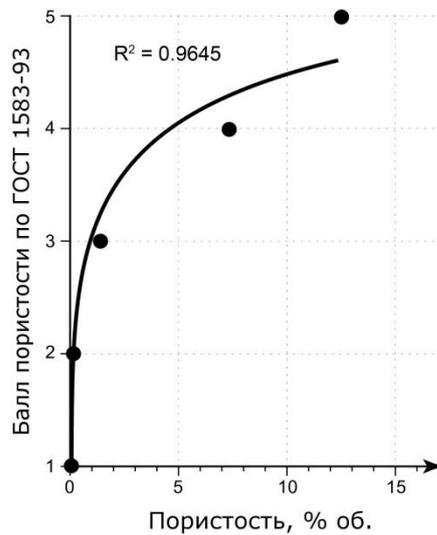


Рис. 8. Оценка балла пористости по ГОСТ 1583-93 по объёмной доле пор

*Построение моделей «структура-свойство» сплава АК6М2 в литом и отожжённом состояниях*

Разработаны модели, адекватно описывающие твёрдость (рис. 9) и относительное удлинение (рис. 10) сплава АК6М2 в зависимости от предложенных параметров структуры:

$$HRH = 50,5 + 0,36 \cdot HV_{\mu} + 0,43 \cdot V_{\text{эвт}} + 0,37 \cdot L_{\text{Si}}, \quad (5)$$

$$\ln(\delta_5) = 3,1 - 0,08 \cdot V_{\text{эвт}} - 0,09 \cdot L_{\text{Si}} - 0,06 \cdot V_i. \quad (6)$$

Как видно из рис. 9б, наибольшее влияние на твёрдость сплава оказывает микротвёрдость твёрдого раствора алюминия и объёмная доля эвтектики. Средний размер кремния в эвтектических колониях влияет на твёрдость в меньшей степени.

Согласно ГОСТ 1583-93 твёрдость сплава АК6М2 в литом состоянии должна быть не ниже 78,4 НВ, или 100 HRH. Исходя из этого ограничения, из номограмм рис. 9б-г были определены следующие критерии для оценки структуры сплава, обеспечивающей твёрдость по ГОСТ 1583-93:  $HV_{\mu} \geq 78 \text{ НВ}$ ,  $V_{\text{эвт}} \geq 22 \%$ .

Как следует из рис. 10б, объёмная доля крупных интерметаллидов мало влияет на относительное удлинение. Влияние объёмной доли эвтектики и длины кремния в эвтектических колониях на относительное удлинение нелинейно: чем меньше объёмная доля эвтектики и выше её дисперсность, оценённая длиной частиц кремния, тем более разобщены хрупкие кристаллы кремния в эвтектике, тем полнее «работает» при растяжении пластичный твёрдый раствор на основе алюминия, поэтому сильнее растёт относительное удлинение.

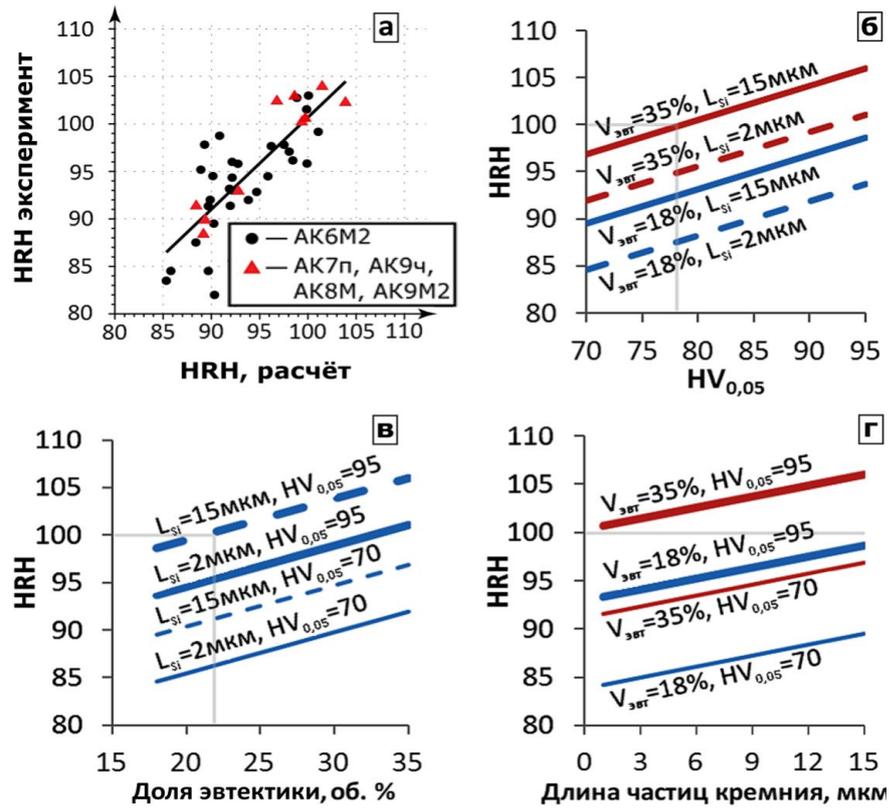


Рис. 9. Взаимосвязь между расчётной и экспериментальной твёрдостью (HRH) (а) и влияние на неё параметров структуры сплава АК6М2 (б-г)

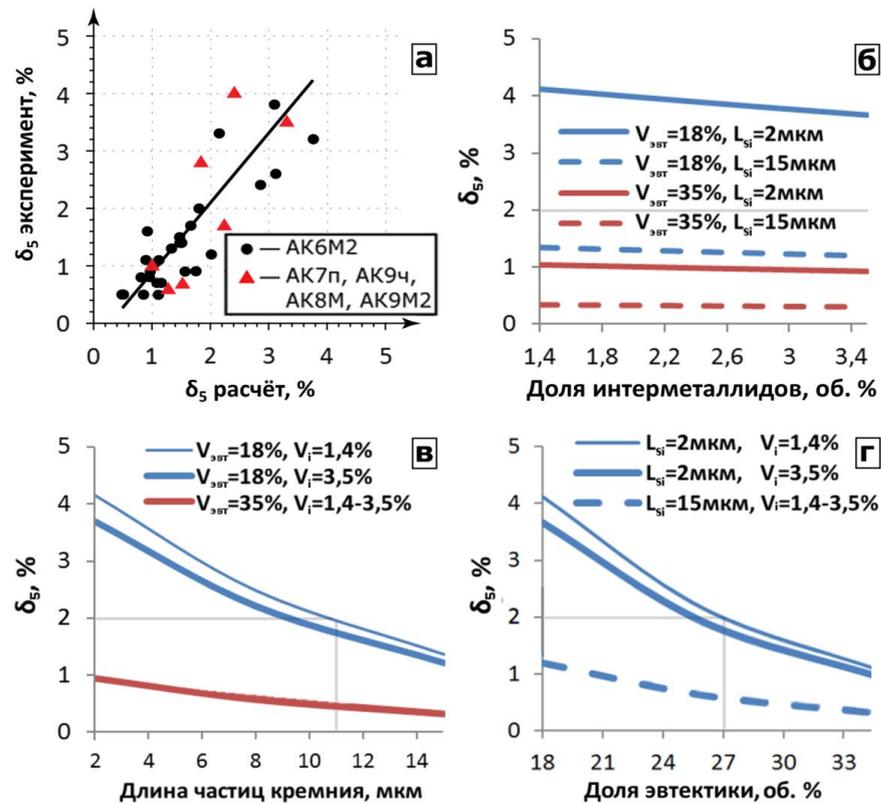


Рис. 10. Взаимосвязь между расчётным и экспериментальным относительным удлинением (а) и влияние на него параметров структуры сплава АК6М2 (б-г)

Согласно ГОСТ 1583-93 для сплава АК6М2 в литом состоянии относительное удлинение должно быть не менее 2%, поэтому из результатов выполненных исследований (рис. 10, б-г), получены следующие требования к структуре, обеспечивающие свойства сплава АК6М2 в соответствии с ГОСТ 1583-93:  $V_{\text{эвт}} \leq 27\%$ ,  $L_{\text{Si}} \leq 11$  мкм.

Найденные количественные закономерности «структура-свойство» для сплава АК6М2 справедливы и для других доэвтектических силуминов: АК7п, АК9ч, АК8М, АК9М2 (рис. 9-10). Таким образом, уравнения регрессии, полученные для одного сплава (АК6М2), адекватно оценивают взаимосвязь «структура-свойство» для многих других доэвтектических силуминов, что доказывает универсальность разработанных методик.

### **5. Взаимосвязь «структура-свойство» для медистых силуминов после закалки и старения**

В результате нагрева литого сплава под закалку и полного искусственного старения (Т6) кремний в составе эвтектики (Al)+(Si) сфероидизируется и коагулирует. Эти изменения морфологии частиц эвтектического кремния учитывали средним фактором формы (F2):

$$F2 = 4A / (\pi \cdot D_{\text{max}}^2) \quad (7)$$

где:  $A$  – площадь частицы,  $D_{\text{max}}$  – ее максимальный диаметр по Фере.

Морфология железосодержащих фаз изменяется незначительно, однако их размеры уменьшаются. Мелкодисперсные частицы  $\theta$ -фазы ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ) при нагреве полностью растворяются, образуя пересыщенный твёрдый раствор. При искусственном старении  $\theta$ -фаза снова выделяется из этого раствора в виде равномерно распределённых дисперсных частиц. Крупные интерметаллиды  $\theta$ -фазы округляются, а её скелетообразные выделения утоняются. Все эти изменения структуры могут быть описаны с помощью ранее выбранных параметров, а также другого параметра – фактора формы  $F2$  частиц кремния. Тогда уравнения регрессии для твёрдости и относительного удлинения для сплава АК6М2 после термообработки Т6 имеют следующий вид:

$$HRH = 10,2 + 0,63HV_{\mu} + 1,76L_{\text{Si}}, \quad (8)$$

$$\ln(\delta_5) = 9,97F2 - 0,13V_{\text{эвт}} - 2,7. \quad (9)$$

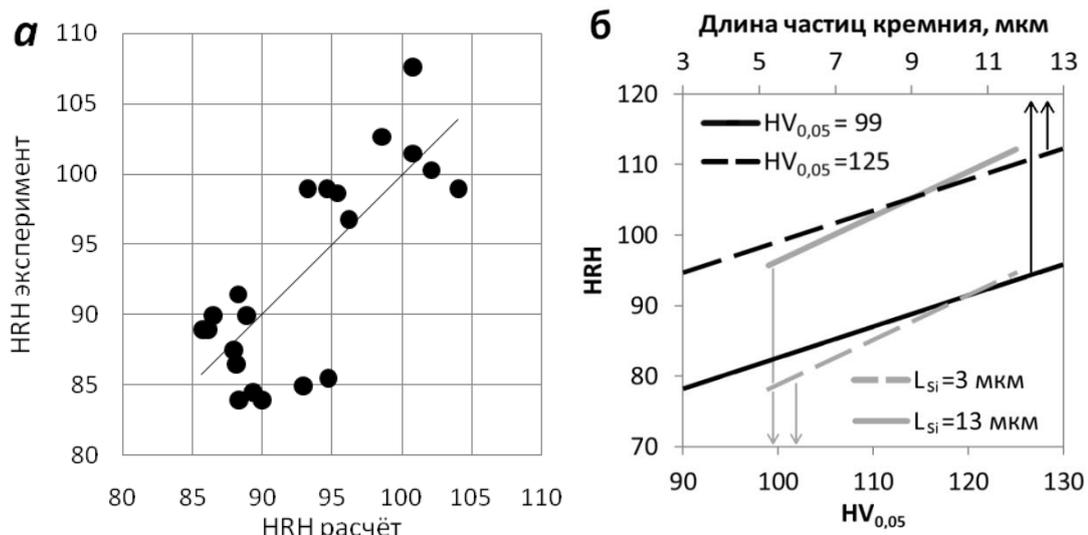


Рис. 12. Взаимосвязь между расчётной и экспериментальной твёрдостью (HRH) (а) и влияние на неё параметров структуры сплава АК6М2 после обработки Т6 (б)

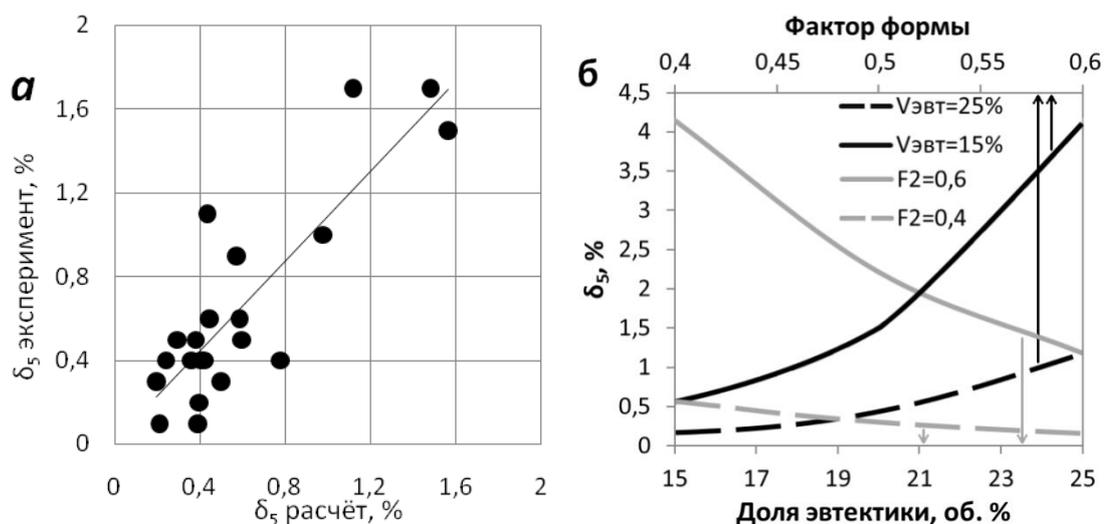


Рис. 13. Взаимосвязь между расчётным и экспериментальным относительным удлинением (а) и влияние на него параметров структуры сплава АК6М2 после обработки Т6 (б)

Полученные уравнения хорошо описывают твёрдость (рис. 12а) и относительное удлинение (рис. 13а) сплава АК6М2 в закалённом и искусственно состаренном состоянии.

Таким образом, механические свойства сплава АК6М2 в закалённом и состаренном состоянии характеризуются микротвёрдостью твёрдого раствора и такими структурными параметрами, как средняя длина и фактор формы частиц кремния, а также объёмная доля эвтектики в сплаве.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработаны методики количественной оценки микроструктуры и установлены количественные закономерности «структура-свойство» для промышленных доэвтектических медистых силуминов. Методики основаны на анализе панорамных изображений и позволяют оценить: дисперсность дендритной структуры; объёмную долю пор; объёмную долю и морфологию эвтектики, а также интерметаллидных включений.
2. Разработаны методики травления для выявления дендритной структуры и интерметаллидных включений в силуминах, позволяющие повысить точность их количественной оценки за счёт усиления контраста между матрицей и структурными составляющими сплавов.
3. Разработана количественная методика оценки пористости с помощью автоматического анализа панорамных изображений, согласующейся с баллом по ГОСТ 1583-93. Показано, что повышение объёмной доли пор выше 1% приводит к резкому падению механических свойств силуминов. Образцы с пористостью выше 1% не следует учитывать при поиске закономерностей «структура-свойство».
4. Для корректного распознавания и оценки структуры методами количественной металлографии с использованием светового оптического микроскопа выполнено исследование структуры сплавов рентгеноспектральным микроанализом. Показано, что состав, размер и морфология обнаруженных в составе сплавов фаз соответствуют их термовременной природе, интерпретированной методами термодинамического моделирования.
5. Разработана количественная методика оценки объёмной доли эвтектики с помощью анализа панорамных изображений, основанная на дискриминации по текстурному признаку «гомогенность». Методика позволяет адекватно оценить все возможные морфологические типы эвтектики, включая грубую и вырожденную.
6. Предложены разные варианты количественного описания морфологии эвтектики, основанные на «длине и вытянутости» или «коэффициенте дисперсности и вытянутости» кремния в эвтектических колониях. Результаты оценки по этим уравнениям одинаково адекватно описывают класс эвтектики

согласно шкалам микроструктур силуминов Американского общества литейщиков. Показано, что для исследованных сплавов вытянутость частиц кремния не оказывает значимого влияния на механические свойства сплавов, поэтому для оценки эвтектики разной морфологии разработана восьмибалльная шкала, основанная только на средней длине частиц кремния в эвтектических колониях.

7. Установлена взаимосвязь отдельных структурных параметров силуминов и обоснованы уникальные параметры структуры, адекватно описывающие механические свойства доэвтектических медистых силуминов. Показано, что разработанный коэффициент дисперсности эвтектики учитывает вклад в формирование структуры силуминов как скорости кристаллизации при литье, так и эффективности модифицирования; а длина частиц кремния и коэффициент дисперсности эвтектики взаимозаменяемы, и любой из этих параметров одинаково хорошо описывает морфологию эвтектики.
8. Показано, что в литом и отожжённом состояниях наибольшее влияние на макротвёрдость доэвтектических силуминов оказывает микротвёрдость твёрдого раствора на основе алюминия и объёмная доля эвтектики, а относительное удлинение, в основном, определяется объёмной долей эвтектики и длиной частиц кремния в эвтектических колониях.
9. Показано, что для доэвтектических силуминов после закалки и старения наибольшее влияние на макротвёрдость сплава оказывает микротвёрдость  $\alpha$ -твёрдого раствора на основе алюминия и средняя длина частиц кремния, а относительное удлинение определяется средним фактором формы частиц кремния и объёмной долей эвтектики.
10. Найденные закономерности «структура-свойство» позволили сформулировать требования к микроструктуре сплава АК6М2, которые могут гарантировать механические свойства, соответствующие ГОСТу в литом и отожжённом состояниях, а также требованиям Заказчика в закалённом и искусственно состаренном состояниях.
11. Количественные закономерности «структура-свойство», найденные для одного сплава (АК6М2), справедливы для многих других доэвтектических силуминов (АК7п, АК9ч, АК8М, АК9М2), что доказывает универсальность разработанных количественных методик оценки структуры сплавов.

**Основные положения диссертации опубликованы в работах:**

- 1) Казаков А.А., Кур А.А., Киселев Д.В., Лазутова Е.Б. Разработка количественных методов оценки структуры доэвтектических силуминов для прогнозирования их механических свойств // Цветные металлы. – 2014. – № 4. – С. 39-43.
- 2) Kazakov A., Kur A., Kazakova E., and Kiselev D. Quantitative Characterization of Hypoeutectic Aluminum–Silicon–Copper As-Cast Alloy Microstructures // Materials Performance and Characterization. – 2016. – Vol. 5. – No. 5. – P. 497-509.
- 3) Казаков А.А., Кур А.А., Киселев Д.В. Прогнозирование механических свойств доэвтектических силуминов на основе оценки количественных параметров их структуры // Литейное производство сегодня и завтра: труды международной научно-практической конференции / под ред. Косникова Г.А., Спб.: изд. Культ-информ-пресс. – 2014. – С. 246-256.
- 4) Kazakov A.A., Kur A.A., Kazakova E.I. Development of Quantitative Methods for Estimation of Aluminum Alloys Structure by Means of Image Analysis // Microsc. Microanal. – 2015. – Vol. 21 (Suppl. 3). – P. 2111-2112.
- 5) Казаков А.А., Кур А.А., Киселев Д.В. Прогнозирование свойств литых и деформированных алюминиевых сплавов на основе количественной оценки их структуры // Современные металлические материалы и технологии (СММТ'2013): труды международной научно-технической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та. – 2013. – С. 774.
- 6) Казаков А.А., Кур А.А. Разработка системы оценки качества алюминиевых сплавов методом автоматического анализа микроструктуры // Сборник докладов молодёжной научно-практической конференции в рамках Недели науки СПбПУ, Институт металлургии, машиностроения и транспорта. Ч. 1. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 241.