

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (НИУ «БелГУ»)



**НИУ  
БелГУ**  
BELGOROD STATE  
UNIVERSITY (BSU)

Победы ул., д. 85, г. Белгород, 308015; e-mail: info@bsu.edu.ru,  
тел.: (4722) 30-12-11, факс 30-10-12, Web: http://www.bsu.edu.ru  
ОКПО 02079230, ОГРН 1023101664519, ИНН/КПП 3123035312/312301001

21.09.2021 № 7-345  
№ \_\_\_\_\_ ОТ \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и  
инновациям НИУ «БелГУ»

Репников Н.И.



## ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Летягина Николая Владимировича  
«Влияние дополнительного легирования (La, Cu, Mn) на структуру,  
технологичность и механические свойства композиционных  
алюмокальциевых сплавов», представленную на соискание ученой степени  
кандидата технических наук по специальности  
05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

### Актуальность темы диссертации

Разработки литейных алюминиевых сплавов на основе системы Al-Ca с добавлением таких элементов как La, Cu, Mn является актуальной, поскольку позволяет не только разработать новые сплавы, которые могут иметь преимущества перед классическими литейными сплавами типа А356, но откроет возможность для применения принципиально новых алюминиевых сплавов для аддитивных технологий. Последнее имеет большое значение, поскольку в отличие от других сталей и сплавов необходимая форма деталей из алюминиевых сплавов может быть легко получена механической

обработкой, а применение аддитивных технологий для производства деталей из алюминиевых сплавов окажется востребована промышленностью только при получении деталей с уникальными механическими и/или физическими свойствами. С этой точки зрения исследования новых сплавов, созданных на базе эвтектик Al-Ca/Al-La с добавлением таких легирующих элементов как Mn, Cu, является актуальным, поскольку позволяет на базе детального изучения их структуры, литейных и физико-механических свойств разработать микроструктурный дизайн новых алюминиевых сплавов как для их получения по классической технологии литья, так и по аддитивным технологиям. Кроме того, данная работа позволяет продвинуться в понимании возможностей для получения композиционных материалов на базе эвтектик. Другим важным аспектом диссертационной работы Летягина Н.В. является показанная возможность использования для выплавки новых алюминиевых сплавов как вторичного сырья, так и первичного алюминия с повышенным содержанием Fe, что имеет большое значение с точки зрения себестоимости продукции. Также в диссертации впервые показано, что структура и микротвердость сплавов на основе новых эвтектик, полученных селективным лазерным плавлением, принципиально отличается от структуры и свойств этих материалов, полученных обычным литьем. Это открывает перспективы получения деталей из алюминиевых сплавов с уникальными свойствами по аддитивным технологиям.

### **Структура и основное содержание диссертации**

Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов, а также списка литературы из 130 источников. Работа изложена на 115 страницах, содержит 63 рисунка и 29 таблиц.

Во **введении** отражена актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи проводимого исследования, представлены научная новизна и практическая значимость, основные положения,

выносимые на защиту, сведения о публикациях, представлены структура и объем диссертации.

В **первой главе** приведен обзор среднепрочных литейных и деформируемых алюминиевых сплавов, описаны современные подходы к разработке новых сплавов, в том числе литейных, а также представлены последние достижения в области исследования алюмокальциевых сплавов. Рассмотрены их структуры и свойства как после литья, так и после деформации. Описано влияние на их структуру и свойства примесей – Fe, Si и легирующих элементов – La, Cu, Ni, Zr, Sc и тд.

Во **второй главе** описаны режимы плавки и литья, термической и деформационной обработки. Подробно описаны примененные опции термодинамических расчетов в программе Thermo-Calc, а также методы и оборудование для экспериментальных исследований структуры, физико-механических и эксплуатационных свойств.

В **третьей главе** представлена расчетно-экспериментальная часть диссертационной работы, включающая анализ фазового состава и характера равновесной и неравновесной кристаллизации модельных сплавов систем Al-Ca-La, Al-Ca-Cu, Al-Ca-Mn. Представлены результаты экспериментальных исследований структуры этих сплавов. Был проведен подробный теоретический анализ, который позволил построить ранее не изученные фрагменты диаграмм в области алюминиевого угла, а также обосновать состав экспериментальных сплавов, в которых возможно получение многофазной эвтектики. Наибольший интерес представляют данные по сплавам с различным содержанием Ca и La, а также влияние легирования медью на структуру и фазовый состав доэвтектического сплава Al-Ca. Особое значение имеют данные по влиянию химического состава на структуру и микротвердости интерметаллидов, которые образуют эвтектики.

В **четвертой главе** представлены результаты изучения структуры, свойств и технологических характеристик литья сплавов на основе систем

Al-Ca-La-Mn, Al-Ca-Cu-Mn. Обосновано, что перспективными литейными сплавами являются Al-3Ca-(1-2)La-1,5Mn и Al-3Ca-1Cu-1,5Mn содержащие порядка 15 об. % вторых фаз и демонстрирующие литейные и механические свойства на уровне среднепрочных сплавов. Полученные механические свойства в литом состоянии по пределу текучести находятся на уровне 150 МПа при относительно высоком относительном удлинении более 7 %. Это сочетание прочности и пластичности было получено без использования операции гомогенизации и закалки, что соответствуют уровню механических свойств термически неупрочняемого сплава АК12 или доэвтектического силумина А356 без термического упрочнения. Наибольшие прочностные свойства продемонстрировал сплав с 3%Ca, 2%La и 2%Mn, которые, тем не менее, несколько ниже свойств сплава А356-1 после литья и упрочняющей термической обработки. Дополнительное легирование Sc и Zr в сочетании с отжигом при 350°C привело к некоторому повышению механических свойств. Однако, предел текучести этих сплавов остался даже ниже, чем у АК12. Все сплавы с Ca и La несмотря на высокую литейную усадку демонстрируют хорошую устойчивость к образованию горячих трещин при литье. Приведены данные по коррозионным свойствам, которые показывают, что сопротивление межкристаллитной коррозии разрабатываемых сплавов почти такое же, как у силуминов. Впервые представлены данные, показывающие, что сплавы Al-6Ca-4La-2Mn и Al-9Si-3Cu, полученные селективным лазерным сплавлением, имеют микротвердость на 70-80% выше, чем в литом состоянии.

В **пятой** главе представлены результаты исследования влияния термдеформационной обработки на структуру и свойства сплавов Al-3Ca-2La-1,5Mn и Al-3Ca-1Cu-1,5Mn. Первый сплав показывает прочностные свойства на уровне среднепрочных термически упрочняемых сплавов 6XXX серии без необходимости в применении полного цикла упрочняющей термической обработки, включающей закалку и старение, а второй сплав

демонстрирует прочностные свойства на уровне термически неупрочняемых сплавов 6XXX серии. Данные сплавы могут быть подвергнуты различным видам холодной и горячей деформационной обработки, например, продольная прокатка или даже холодное волочение без необходимости в операции продолжительного высокотемпературного гомогенизационного отжига. Холодная прокатка эффективна в увеличении прочностных характеристик сплава  $\text{Al-3Ca-2La-1,5Mn}$  при уменьшении пластичности.

В **шестой главе** на примере сплавов системы  $\text{Al-Ca-Cu-Mn-Fe-Si}$  показано, что высокотехнологичные, т.е. полученные с использованием промышленных технологий литья и термдеформационной обработки, алюмоматричные композиты могут быть выплавлены с использованием вторичного алюминиевого сырья, в том числе алюминиевого баночного лома. Важным является вывод о том, что эти сплавы могут содержать повышенное содержание железа, что дает возможность использовать первичный алюминий с низкой стоимостью. После деформации и отжига разработанные сплавы демонстрируют свойства, сравнимые со свойствами сплавов 6XXX серии.

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.

Наиболее значимые результаты, определяющие **научную новизну**:

1. Предложено строение диаграмм  $\text{Al-Ca-La}$ ,  $\text{Al-Ca-Cu}$ ,  $\text{Al-Ca-Mn}$ . Установлены фазовые превращения, выявлена значительная растворимость лантана и меди в соединении  $\text{Al}_4\text{Ca}$ , проведено количественное описание состава и свойств впервые выявленных соединений  $\text{Al}_{10}\text{CaMn}_2$ ,  $\text{Al}_{10}\text{CaCu}_2$ .

2. Показаны, что сплавы  $\text{Al-Ca-La}$  с добавками  $\text{Cu}$  и  $\text{Mn}$  проявляют удовлетворительные литейные свойства, их возможно подвергать термдеформационной обработке с использованием листовой и радиально-сдвиговой прокатки; селективное лазерное сплавление позволяет существенно повысить прочностные свойства этих сплавов.

3. На примере заэвтектических сплавов системы Al-Ca-La-Mn показана возможность получения термостабильной (до 400 °С) квазиэвтектической структуры, содержащей более 25 об. % наноразмерных алюминидных фаз по технологии селективного лазерного плавления.

4. На примере модельных сплавов системы Al-3Ca-La(Cu)-1,5Mn показано, что компактная морфология интерметаллидных фаз  $Al_4(Ca,La)$ ,  $(Al,Cu)_4Ca$ ,  $Al_{10}CaMn_2$  способствует получению качественных деформированных полуфабрикатов со степенью обжатия более 90%. Установлено влияние добавок Cu и La на микротвердость фазы  $Al_4Ca$ , а также соотношения Ca и La на микротвердость фазы  $Al_{11}(La,Ca)_3$ , что имеет важное значение для определения принципов микроструктурного дизайна металломатричных композитов на основе эвтектик.

5. На примере сплавов системы Al-3Ca-Cu-Mn-Fe-Si показана возможность получения литейных и деформируемых алюминиевых сплавов, выплавляемых на основе вторичного алюминиевого сырья (в т.ч. алюминиевого баночного лома) при содержании железа до 0,5 масс.%, кремния до 0,3 масс.%.

Основная **практическая значимость** выполненной работы состоит в том, что предложены составы высокотехнологичных литейных алюминиевых сплавов системы Al-3Ca-Cu-Mn-Fe-Si, выплавляемых на основе вторичного сырья, не требующих термообработки и обладающих пределом текучести более 150 МПа при пластичности 6-8 % после гравитационного литья в кокиль (Патент РФ 2741874). А также предложены составы сплавов на основе систем Al-Ca-La-Mn, Al-Ca-Cu-Mn, Al-Ca-Cu-Mn-Fe-Si и технология их термомеханической обработки, позволяющая получать в листах и сортовом прокате предел текучести выше 200 МПа при пластичности до 15 % без использования закалки и старения.

**Достоверность результатов** данной диссертационной работы подтверждается использованием взаимодополняющих методик современного



программного обеспечения для проведения моделирования фазового состава и обработки представления данных, аналитического и испытательного оборудования для исследования структуры, механических свойств, сопротивления коррозии, а также системного подхода к выполнению целей и задач исследований, направления которых были поддержаны научными фондами РФФИ и РНФ.

### **Апробация и публикации основных положений работы**

Результаты работы докладывались и обсуждались на 6 Всероссийских и Международных научных конференциях. По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ, входящих в базы данных Web of Science (Core Collection)/Scopus.

### **Замечания по диссертации:**

1. В диссертационной работе рассматриваются такие литейные свойства разрабатываемых алюминиевых сплавов как горячеломкость и усадка в сравнение с промышленными конкурентами. Однако не менее важным свойством для изучения является жидкотекучесть, данных по которой не приводится.

2. В диссертации отмечено, что выплавка сплавов системы Al-Ca-Cu-Mn на основе вторичного сырья требует контроля содержания железа до 0,5 масс. % и марганца до 1 масс. %, которые значительно сужают область существования алюминиевого твердого раствора и приводят к образованию первичных кристаллов фазы  $Al_6(Fe, Mn, Cu)$ . Однако непонятно, какую скорость охлаждения необходимо обеспечить для получения указанного эффекта. Будет ли аналогичный эффект наблюдаться, например, в случае подогретой металлической формы?

3. В работе не рассматривается влияние фактора масштабирования при переходе от лабораторных плавов к изготовлению крупногабаритных полуфабрикатов из разработанных сплавов.

4. Исходя из выявленной технологичности разрабатываемых сплавов в процессе литья, термдеформационной обработки, селективного лазерного плавления, не менее интересным и целесообразным для изучения является свариваемость разработанных материалов. В работе по этому направлению исследований не проводилось.

5. Сравнение механических свойств разрабатываемых сплавов производится со сплавом А356 без термической обработки. В то же время, учитывая стоимость La целесообразно проводить сравнения со сплавом А356-2, который модифицирован Sr, после термической обработки. В этом случае получится, что механические свойства разработанного сплавов с La сравнимы со свойствам данного сплава.

#### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологии получения новых алюминиевых сплавов в виде литых заготовок (цилиндрические слитки, чушка), фасонных отливок и деформируемых полуфабрикаты (пруток, профиль, проволока) для решения задач металлургии и гибридных технологий (аддитивного производства). К основным потребителям данной продукции можно отнести предприятия изготовители алюминиевых полуфабрикатов для строительной индустрии, авиа-, судо-, машиностроения, научно-производственные предприятия в которых ведутся работы по разработке и внедрению сплавов на основе алюминия, управления по инновациям, ВУЗы.

#### **Заключение**

Сделанные замечания не влияют на высокую оценку диссертационной работы Летягина Н.В. Работа является актуальной, выполнена на высоком теоретическом и экспериментальном уровне, полученные научные результаты имеют научную и практическую значимость. Достоверность результатов не вызывает сомнений. Это позволяет утверждать, что



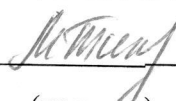
обозначенные в работе цели и задачи исследования достигнуты, а положения, выносимые на защиту, экспериментально доказаны.

Диссертационная работа «Влияние дополнительного легирования (La, Cu, Mn) на структуру, технологичность и механические свойства композиционных алюмокальциевых сплавов», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, полностью соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ «МИСиС», а ее автору Летягину Николаю Владимировичу может быть присуждена степень кандидата технических наук по специальности 05.16.01 - «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов» по результатам публичной защиты диссертации.

Диссертационная работа рассмотрена и обсуждена на заседании кафедры материаловедения и нанотехнологий НИУ «БелГУ». На заседании присутствовали 14 человек. Протокол № 1 от 16.09.2021 г.

Кандидат физико-математических наук,

И.о. Заведующего кафедрой Материаловедение и нанотехнологий

 /Тихонова М.С./  
(подпись) (Ф.И.О)

Подготовил заключение

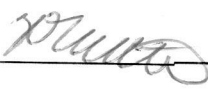
Доктор физико-математических наук,

Директор института Материаловедения и инновационных технологий,

Заведующий лаборатории механических свойств наноструктурных и

жаропрочных материалов НИУ «БелГУ»,

Профессор кафедры Материаловедение и нанотехнологий НИУ «БелГУ»

 /Кайбышев Р.О./  
(подпись) (Ф.И.О)