УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН)

кандидат технических наук

_____А.В. Самохин

«23» ОКТЯБРЯ 2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Позднякова Андрея Владимировича «Структурообразование и свойства новых высокотехнологичных алюминиевых сплавов с редкоземельными металлами», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Актуальность темы исследования

Исследование направлено на решение задачи по созданию новых алюминиевых сплавов различных групп и улучшению свойств за счет применения редкоземельных металлов (РЗМ) при легировании. В работе предложены новые термически стабильные проводники; обоснована замена дорогостоящего скандия в авиационных магналиях; повышена жаропрочность силуминов для расширения их применения; созданы новые, одновременно литейные и деформируемые, жаропрочные сплавы на основе новой системы Al-Cu-РЗМ и применены известные подходы в совокупности с легированием РЗМ для создания новых литейных и деформируемых жаропрочных сплавов Al-Zn-Mg-Cu-РЗМ, где РЗМ (Y, Er, Yb, Gd) играют сразу три ключевые роли: (1) совместно с цирконием и титаном повышают эффективность модифицирования зёренной структуры сильнолегированных сплавов; (2) совместно с цирконием приводят к повышению прочности всех разработанных алюминиевых сплавов за счет образования дисперсно-упрочняющих фаз при отжиге или высокотемпературной гомогенизации, сохраняющих $L1_2$ структуру; (3) совместно с медью в сплавах Al-Cu-РЗМ и Al-Zn-Mg-Cu-РЗМ образуют дисперсную термически стабильную эвтектику, что способствует снижению склонности к образованию трещин кристаллизационного происхождения и повышению прочности, жаропрочности и технологичности при горячей деформации. В связи с вышеизложенным, актуальность диссертационной работы Позднякова Андрея Владимировича не вызывает сомнений.

Цель работы состоит в разработке научно-обоснованного подхода к легированию алюминиевых сплавов редкоземельными металлами путем установления закономерностей структурообразования при литье, термической и термодеформационной обработке для улучшения свойств магналиев и силумина и создания новых термически стабильных проводников, новых литейных и деформируемых жаропрочных сплавов.

Научная новизна исследований

1. Установлено, что легирование сплавов систем Al-Sc, Al-Zr и Al-Mg-Sc-Zr малыми добавками (Y, Yb, Er, Gd) приводит к распределению РЗМ между дисперсными частицами фаз кристаллизационного происхождения Al_3РЗМ, τ_2, (Al, Mg, Y), (Al, Mg, Er) или (Al, Mg, Yb, Si) и $Al_{10}Fe_2Yb$ с малой объёмной долей и алюминиевым твёрдым раствором. Отжиг слитков этих сплавов при 300-440°С приводит к упрочнению за счёт распада пересыщенного при литье алюминиевого твёрдого раствора с образованием $L1_2$-фаз Al_3РЗМ (РЗМ – Sc, Zr, Y, Yb, Er, Gd) размером от 4-11 до 20-25 нм.

2. Показано, что термомеханическая обработка, включающая отжиг слитков сплавов Al-Sc-РЗМ и Al-Zr-РЗМ-Fe-Si на максимальную твёрдость, горячую и холодную прокатку и постдеформационный отжиг при 300°С до 100 часов за счёт полного протекания распада твёрдого раствора и однородного распределения $L1_2$-дисперсоидов, обеспечивает однородную дисперсную субструктуру и оптимальное сочетание прочности и электропроводности.

3. Установлено, что в новых сплавах для проводников Al-Zr-РЗМ-Fe-Si примесь кремния не является вредной, обеспечивая образование фаз Al_8Fe_2Si, $Al_3Er_2Si_2$, $Al_2Si_2РЗМ$ кристаллизационного происхождения, связывающих примесь кремния, а также формирование в процессе отжига слитков дисперсоидов фазы α-(Al_8Fe_2Si) и кремниевых дисперсоидов. Кроме того, кремний дополнительно активирует распад твёрдого раствора и, в сочетании с разработанными режимами термомеханической обработки, обеспечивает достижение более высокой электропроводности, чем в сплавах без примесей железа и кремния.

4. Впервые показано, что легирование РЗМ (РЗМ – Y, Er, Yb, Gd) сплавов Al-Cu-Mg-Mn-Zr и Al-Zn-Mg-Cu-Cr-Zr, как основными эвтектикообразующими элементами, от 0,3 до 3% при соблюдении атомного соотношения Cu/РЗМ = 4 обеспечивает новым сплавам высокую технологичность при литье, высокую прочность и жаропрочность за счёт образования дисперсной термически стабильной эвтектики при литье и наноразмерных дисперсоидов $L1_2$ – Al_3(РЗМ, Zr), $Al_{20}Cu_2Mn_3$ или E($Al_{18}Mg_3Cr_2$) при гомогенизации. Дисперсоиды Al_3(РЗМ, Zr) сохраняют $L1_2$-структуру даже после высокотемпературной гомогенизации при 555-605°С в течение 1-3 часов. Основной вклад в предел текучести вносят продукты старения S' или T' фаз – более 50% и дисперсоиды Al_3(РЗМ, Zr), $Al_{20}Cu_2Mn_3$ или E – более 25%.

5. Выявлено, что наличие неизбежных примесей Fe и Si в алюминии не оказывает негативного влияния на структуру и свойства сплавов Al-Cu-Mg-РЗМ и Al-Zn-Mg-Cu-РЗМ: Fe до 0,15% растворяется в фазах $Al_8Cu_4РЗМ$, Si приводит к образованию новых достаточно компактных частиц фаз $Al_{11}Cu_2Y_2Si_2$ ((Al, Cu)$_4$YSi), $Al_3Er_2Si_2$, $Al_{80}Yb_6Cu_6Si_8$, $Al_{80}Gd_6Cu_6Si_8$ кристаллизационного происхождения.

6. Установлено, что в новых сплавах Al-Zn-Mg-Cu-РЗМ с содержанием Zn,Mg и Cu по 2,5-3% за счёт перераспределения основных легирующих элементов, контролируемого введёнными РЗМ, происходит полное растворение S и T фаз при гомогенизации на первой ступени, которое приводит к повышению температуры солидуса, что даёт возможность использовать вторую высокотемпературную ступень гомогенизации для формирования более компактных интерметаллидов в структуре. Выявленные новые особенности легирования РЗМ сплавов с 2,5-3% Zn, Mg и Cu позволили сочетать в них большую коррозионную стойкость и относительное удлинение при высокой прочности при комнатной температуре и 200°С.

Практическая значимость работы

Разработаны проводниковые сплавы Al-Sc-РЗМ (Y, Yb, Er) и режимы их термомеханической обработки. Режим, состоящий из отжига слитка, обеспечивающего максимальную твёрдость, горячей и холодной прокатки и постдеформационного отжига при 300°С до 100 часов обеспечивает лучшее сочетание прочности и электропроводности. Из сплава Al-Sc-Y-Er в условиях завода ООО «Авиаль» получена проволока диаметрами 2, 2,7 и 3,8 мм. Проволока прошла испытания по количеству перегибов (8-10) в соответствии с ТУ 16.К71-088–90.

Замена части скандия на иттрий в сплаве 1545К позволила достигнуть того же уровня свойств в новом сплаве 1545КИ. Замена части скандия эрбием в сплаве 1570 с повышением доли холодной прокатки позволила повысить предел текучести примерно на 20 МПа до 370-374 МПа в сплаве 1570Э (Al-5,7Mg-0,4Mn-0,12Sc-0,1Zr-0,38Er). Сплавы 1570МИт (Al–6,0Mg–0,2Mn–0,05Sc–0,25Zr-0,3Yb) и 1570ХИт (Al–6,0Mg–0,2Cr–0,05Sc–0,25Zr-0,3Yb) с минимальным скандием, в сравнение со сплавом 1570. Результаты реализуются в рамках промышленного освоения на предприятиях Госкорпорации «Роскосмос». Разработаны новые литейные сплавы Al-Cu-Mg-РЗМ (Y, Yb, Er, Gd) с низкой

склонностью к образованию трещин кристаллизационного происхождения и высокой прочностью.

Разработаны новые деформируемые сплавы Al-Cu-Mg-РЗМ (Y, Yb, Er, Gd), в которых после гомогенизации, закалки в воду, горячей и холодной прокатки, рекристаллизационного отжига при 555-565°С в течение 15 минут, закалки в воду и старения достигнуты следующие свойства листов на растяжение: $\sigma_{0,2}$=264-306 МПа, σ_B=356-389 МПа, δ= 5,2-14,5%. Разработаны составы и режимы термической обработки новых литейных и деформируемых алюминиевых сплавов системы Al - (3-4) Zn - (3-4) Mg - (3-4) Cu - РЗМ.

Новые деформируемые сплавы Al - (2,5-3) Zn - (2,5-3) Mg - (2,5-3) Cu - РЗМ после гомогенизации, закалки в воду, горячей и холодной прокатки, рекристаллизационного отжига при 520°С в течение 15 минут, закалки в воду и одноступенчатого высокотемпературного или ретроградного старения сочетают высокий предел текучести $\sigma_{0,2}$=291-345 МПа, пластичность δ=11-14,8% и превосходную коррозионную стойкость. Новые деформируемые сплавы по пределу текучести соответствуют дорогим скандий-содержащим магналиям и низко-коррозионностойким дуралюминам и занимают нишу между свариваемыми и высокопрочными алюминиевыми сплавами.

Достоверность результатов исследований обеспечивается использованием современных средств и методов исследований и испытаний, статистически обоснованным объемом экспериментальных исследований. Полученные результаты опубликованы в статьях в рецензируемых журналах, а также включены в отчеты по проектам, представлены и обсуждены на российских и международных конференциях.

Апробация работы и публикации по диссертации

Основное содержание диссертации изложено в 20 статьях в журналах, включённых в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук (в том числе статьи, входящие в Scopus), получено 5 патентов РФ.

Структура и основное содержание работы

Диссертационная работа Позднякова А.В. состоит из введения, 7 глав, выводов, содержит библиографический список и 4 приложения. Работа изложена на 320 страницах машинописного текста, содержит 155 рисунков и 62 таблицы. Библиографический список состоит из 396 источников.

Во введении обоснована актуальность исследования и выбор РЗМ в качестве малых добавок и основных легирующих элементов для различных групп алюминиевых сплавов, сформулированы цель и задачи исследования. Приведены научная новизна, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности результатов, личный вклад автора.

В первой главе представлен аналитический обзор литературы по особенностям легирования алюминия и его сплавов РЗМ. Рассмотрены особенности легирования алюминиевых сплавов самой распространённой парой из ряда редкоземельных и переходных металлов (РЗМ и ПМ) – Sc и Zr. Представлены альтернативы дорогостоящему скандию, в качестве которых выступили соседи циркония по периодической системе – иттрий и гафний, а также элементы из ряда лантаноидов.

Во второй главе описаны методы получения объектов исследования, их обработка, исследование структуры и фазового состава и определение свойств. Приведено описание методов выплавки слитков, определения показателя горячеломкости, термодинамических расчетов, микроструктурных исследований, пробоподготовки, термической и термодеформационной обработок, определения характеристик механических, физических и коррозионных свойств, методики построения карт деформации для оценки технологичности при горячей деформации и расчета вкладов структурных составляющих в механические свойства.

В третьей главе проведена оценочная проверка эффективности ряда РЗМ, таких как Y, Er, Sm, Gd, Hf, на упрочнение сплава Al-Sc-Zr со сниженным содержанием скандия относительно сплавов с высокой термической стабильностью. Представлено детальное исследование влияния РЗМ и режимов термической и термодеформационной обработок

при комплексном легировании сплавов Al-Sc и Al-Zr на структуру и свойства перспективных проводников. Показано, что добавки 0,1% Y, Sm, Er, Hf и Gd раздельно приводят к повышению термической стабильности фазы $Al_3(Sc, Zr)$ после отжига при 250 °С вплоть до 100 часов выдержки, разупрочнение при отжиге при 370 °С начинается после 54 часов выдержки. Показано влияние малых добавок РЗМ (Y, Yb, Er) раздельно и комплексно и режимов термомеханической обработки на фазовый состав, упрочнение при отжиге слитков и листов сплавов Al-Sc. На примере сплавов Al-Y-Er и Al-Zr-Y-Er показана возможность получения безциркониевых проводников и эффективность циркония в сплавах Al-Zr-РЗМ без скандия. Показано влияние малых добавок РЗМ (Y, Er, Yb, Gd) раздельно, примесей железа и кремния и режимов термомеханической обработки на фазовый состав, упрочнение при отжиге слитков и листов сплавов Al-Zr. Установлено, что термомеханическая обработка включающая отжиг слитков на максимальную твердость, горячую и холодную прокатку и постдеформационный отжиг при 300°С до 100 часов или при 360°С за счет полного протекания распада твердого раствора и однородного распределения $L1_2$-дисперсоидов обеспечивает сплавам Al-Zr-РЗМ-Fe-Si предел текучести 176-196 МПа, предел прочности 191-210 МПа, относительное удлинение 10-16%.

В четвертой главе показана возможность замены дорогостоящего скандия на примере сплавов 1545К и 1570 и повышения высокотемпературных свойств силуминов на примере сплава типа АК5М. В качестве замены скандию рассмотрены добавки иттрия, эрбия и иттербия. Прочностные свойства силумина типа АК5М повышены совместным легированием цирконием и эрбием, иттрием, иттербием или гадолинием. В результате определены особенности влияния малых добавок РЗМ (Y, Er, Yb) взамен части скандия в алюминиевых сплавах 1545К и 1570 системы Al-Mg на макроструктуру и механические свойства слитков и листов. Замена части скандия на иттрий в сплаве 1545К позволила достигнуть того же уровня свойств в новом сплаве 1545КИ. В сплаве 1545КИ в отожженном после прокатки состоянии предел текучести составляет 330-390 МПа, предел прочности 389-434 МПа при удлинении 6,6-9,2%. Замена части скандия эрбием в сплаве 1570 с повышением доли холодной прокатки позволила повысить механические свойства в отожженном состоянии с предела текучести 353 МПа и предела прочности 463 МПа в сплаве 1570 до предела текучести 370-374 МПа и предела прочности 450-470 МПа в сплаве 1570Э. Сплавы 1570МИт и 1570ХИт с минимальным скандием, в сравнении со сплавом 1570, также демонстрируют очень высокие показатели прочности в отожженном состоянии: предел текучести 338-414 МПа, предел прочности 443-475 МПа при удлинении 5,4-10,5%. Определены особенности влияния малых добавок Zr и РЗМ (Y, Er, Yb или Gd) на микроструктуру и механические свойства сплава АК5М системы Al-Si. Показано, что добавки Zr и РЗМ в оптимальном количестве 0,15% не оказывают существенного эффекта на кинетику старения, но существенно повышают (на 30-60 МПа) предел текучести на сжатие сплава АК5М при комнатной температуре (до 282-300 МПа) и при 200°С (до 202-240 МПа) за счет фаз, образованных Zr и РЗМ.

В пятой главе представлены результаты разработки новых сплавов на основе Al-Cu-РЗМ. На основе данных о тройных диаграммах Al-Cu-РЗМ (РЗМ – Y, Er, Yb, Gd) выбраны базовые тройные композиции Al-Cu-РЗМ с атомным соотношением Cu/РЗМ = 4. Сплавы на данном квазибинарном разрезе имеют высокую температуру солидуса и узкий интервал кристаллизации. Определено влияние примесей Fe и Si на фазовый состав и свойства сплавов. Тройные сплавы раздельно легировали Zr, Zr и Mn, и комплексно Mg, Mn, Zr в присутствии примесей Fe и Si. Проведено детальное исследование эволюции микроструктуры и фазового состава в процессе термической и термодеформационной обработок на свойства новых сплавов. Исследовано деформационное поведение новых комплексно легированных сплавов. РЗМ (Y, Er, Yb, Gd) впервые использованы не только как модификаторы зерна, но и как основные легирующие элементы, несущие ещё роль эвтектикообразующих совместно с медью. Новые литейные сплавы Al-Cu-РЗМ-Mg-Mn-Zr имеют низкий показатель горячеломкости, прочностные свойства на уровне литейного сплава АМ5. В литом, гомогенизированном при 555-565°С, закаленном и состаренном при 210°С состоянии новые сплавы демонстрируют высокую прочность и жаропрочность: при комнатной температуре $\sigma_{0,2}$ = 298-312 МПа, σ_B = 299-338 МПа, δ = 0,2-0,6%, при 250°С $\sigma_{0,2}$

= 206-235 МПа, $\sigma_в$ = 219-270 МПа, δ = 1,4-5,5%. Микроструктура, состоящая из микронных частиц фаз кристаллизационного происхождения и наноразмерных частиц дисперсоидов обеспечивает деформируемым сплавам Al-Cu-РЗМ-Mg-Mn-Zr рекристаллизованную структуру после 15 минут отжига при 555-556°С листов, а последующее старение за счет выделения S' фазы – высокий уровень механических свойств: $\sigma_{0,2}$ = 264-306 МПа, $\sigma_в$ = 356-389 МПа, δ = 5,2-14,5%. Низкотемпературный отжиг листов (150°С) обеспечивает следующий уровень свойств: $\sigma_{0,2}$ = 376-417 МПа, $\sigma_в$ = 409-449 МПа, δ = 2,7-4,5%.

В шестой главе представлены результаты разработки новых сплавов на основе системы Al-Zn-Mg-Cu-РЗМ. При содержании цинка 3-7% и магния 1-4,5% в сплавах на основе системы Al-Zn-Mg-Cu достигается максимальное упрочнение после закалки и старения. Однако сплавы с таким соотношением Zn/Mg (более 1) обладают низким сопротивлением коррозии и высокой склонностью к образованию горячих трещин при литье. Отталкиваясь от этих данных и взяв за основу результаты создания новых сплавов Al-Cu-РЗМ (Глава 5), разработаны новые литейные и деформируемые сплавы на основе системы Al-Zn-Mg-Cu-РЗМ (РЗМ – Y или Er) с повышенной технологичностью и жаропрочностью.

В седьмой главе представлены результаты исследований по адаптации новых литейных сплавов к условиям кристаллизации. Современное производство изделий из алюминиевых сплавов охватывает широкий спектр отливок, получаемых кристаллизацией с разными скоростями от единиц °С/с при литье в песчаные формы до 1000°С/с при аддитивном производстве. Проведена оптимизация составов новых сплавов Al-Cu-РЗМ путем замены Mn на Cr и корректировка составов для адаптации к аддитивному производству. В структуре треков поверхностного лазерного плавления (ПЛП) полностью отсутствуют дефекты кристаллизационного происхождения, в частности, горячие трещины. При этом зона трека не имеет усадочной раковины и пористости. В зоне ПЛП формируется существенно более дисперсная структура, практически полностью отсутствуют первичные компактные интерметаллиды, видимые в слитке. Наличие в сплаве большого количества модификаторов зерна (Ti, Zr, Y, Er) позволяет сформировать уже в слитке зерно размером около 30 мкм, равное размеру дендритной ячейки. Зёренная структура треков представлена узкой зоной (около 50 мкм) столбчатых кристаллов и зоной равноосных кристаллов размером около 5 мкм. Большую скорость старения в треках сплавов AlCuYMgCr-L и AlCuErMgCr-L обеспечивает дисперсная структура и состав твердого раствора, отличающийся от матрицы.

В выводах по работе сформулированы основные результаты представленной диссертационной работы.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы. Результаты диссертационной работы А.В. Позднякова могут быть использованы на промышленных предприятиях, занимающихся изготовлением отливок и полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, таких как: ООО «Авиаль», АО «КУМЗ», АО «Русал», АО «СМЗ», АО «Спецлит» и т.д. Основными потребителями отливок и полуфабрикатов из алюминиевых сплавов могут быть любые предприятия электротехнической, автомобильной и аэрокосмической отраслей промышленности. Кроме того, результаты работы могут быть востребованы в научно-исследовательских институтах и центрах, занимающихся исследованиями и разработками новых алюминиевых сплавов различного назначения.

Соответствие автореферата содержанию диссертации. Автореферат диссертации соответствует её содержанию.

Замечания по работе

1. Во введении представлены задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели, задачи указаны как комплексные. Возможно, что необходимо было более конкретно представить некоторые пункты, чтобы нагляднее показать назначение новых термически стабильных проводников, новых литейных и деформируемых сплавов.
2. В первой главе приведены особенности легирования алюминия церием и сказано, что образование с ним и медью фазы является недостатком. Далее же образование подобных фаз с другими РЗМ представлено как положительный результат.

3. В выводе по влиянию эрбия на свойства сплава 1570 указано, что механические свойства повышены. Согласно формулировке, данное утверждение можно считать верным только для предела текучести, но не для предела прочности.

4. Из возможных технологических свойств при литье и деформации определены только показатель горячеломкости и построены карты деформации по относительно новой и нетипичной методике для определения технологичности при обработке давлением. Методически это представляется недостаточным.

5. Для новых сплавов системы Al - (2,5-4,5) Zn - (2,5-4,5) Mg - (2,5-4) Cu - РЗМ предложены весьма продолжительные режимы трехступенчатого старения. Было бы полезно оценить их экономическую эффективность с учётом получаемых механических и коррозионных свойств.

6. В процессе разработки новых сплавов был обнаружен ряд новых фаз при легировании РЗМ, сведений о которых в литературе нет. Новые фазы были идентифицированы только по результатам анализа химического состава отдельных частиц. Было бы полезно определить их структуру и тип кристаллической решетки.

Указанные замечания не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы.

Заключение по работе

Диссертационная работа Позднякова А.В. «Структурообразование и свойства новых высокотехнологичных алюминиевых сплавов с редкоземельными металлами» является самостоятельным, логически завершенным исследованием. Диссертация соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям Положением о порядке присуждения ученых степеней в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», а её автор, Поздняков Андрей Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Работа рассмотрена и обсуждена в ИМЕТ РАН на заседании Секции Учёного совета «Металловедение и металлофизика» 10 сентября 2026 г, протокол №8/26. Отзыв составлен на основании диссертации, автореферата, публикаций и доклада Позднякова А.В.

На заседании присутствовало 15 членов Секции из 25.

Результаты голосования: «за» – 15, «против» – нет, «воздержавшихся» – нет.

Председатель секции
чл.-корр. РАН — Банных И.О.

Секретарь секции
к.т.н. — Харин Е.В.

Сведения о ведущей организации:
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова
Российской академии наук (ИМЕТ РАН)
Адрес: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, 49
Телефон: +7 (499) 135-20-60
Адрес электронной почты: imet@imet.ac.ru
Сайт: https://www.imet.ac.ru/