



«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

АО «Композит», д.т.н.

А.Г. Береснев

06. 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Кхамееса Елсайеда Мохамеда Амера
«Структура и свойства новых литейных и деформируемых сплавов на основе
систем Al-Cu-Y и Al-Cu-Er», представленную на соискание учёной степени
кандидата технических наук по специальности

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Алюминиево-медные сплавы являются важной группой материалов, без которых невозможно обойтись в современной промышленности. Они широко используются во многих областях, таких как аэрокосмическая, автомобильная и другие, где в настоящее время необходимо дальнейшее повышение комплекса эксплуатационных свойств для разработки нового поколения авиакосмической техники и транспортных средств. Небольшие добавки РЗМ существенно повышают механические свойства алюминиевых сплавов, за счет выделения дисперсоидов из пересыщенного при кристаллизации твердого раствора в процессе отжига. Такие дисперсоиды являются эффективными антирекристаллизаторами, сохраняя прочность деформированных полуфабрикатов при отжиге.

Диссертационная работа Кхамееса Елсайеда Мохамеда Амера направлена на создание новых жаропрочных алюминиевых сплавов. В работе показано, что сплавы системы Al-Cu-Y и Al-Cu-Er являются перспективными для создания на их основе высокотехнологичных и жаропрочных материалов, поскольку имеют узкий интервал кристаллизации и высокую температуру солидуса при соотношении Cu/Er и Cu/Y равном 4/1. Впервые изучены фазовый состав и структура сплавов данной системы и установлено, что они состоят из алюминиевого твердого раствора (Al) и дисперсной эвтектики, устойчивой к росту в процессе высокотемпературной гомогенизации. При этом интервал кристаллизации сплавов очень мал и составляет 19-20°C. Показано, что примеси Fe и Si приводят к формированию фаз $Al_{11}Cu_2Y_2Si_2$ и $Al_3Er_2Si_2$, частицы которых не изменяют своей морфологии в процессе гомогенизации и не снижают

пластичность. Примесь железа растворяется в фазах кристаллизационного происхождения $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Y}$ и $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Er}$, в количестве около 1%, не изменяя их формы. Марганец приводит к формированию фаз с атомным соотношением Cu/Mn/(Er/Y) равным 4/2/1 и предполагаемым составом $\text{Al}_{25}\text{Cu}_4\text{Mn}_2\text{Er}$ и $\text{Al}_{25}\text{Cu}_4\text{Mn}_2\text{Y}$. Установлены особенности изменения фазового состава в процессе гомогенизации перед закалкой и в процессе старения. Показано, что в процессе гомогенизационного отжига одновременно происходит распад пересыщенного марганцем, цирконием, иттрием и эрбием твердого раствора с образованием в сплаве Al-Cu-Y-Mn-Zr дисперсоидов фаз $\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$ длиной 200-250 нм и шириной 150-200 нм и $\text{Al}_3(\text{Zr,Y})$ диаметром 30-50 нм; а в сплаве Al-Cu-Er-Mn-Zr дисперсоидов фаз $\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$ длиной 100-250 нм и шириной 70-120 нм и $\text{Al}_3(\text{Zr,Er})$ диаметром 25-45 нм. Последующее старение протекает с упрочнением за счет выделения дискообразных выделений фазы θ' толщиной 5 нм и диаметром 80-200 нм, которые образуются в основном на дисперсоидах фаз $\text{Al}_3(\text{Zr,Y})$ и $\text{Al}_3(\text{Zr,Er})$.

Стоит отметить и наглядную демонстрацию практической значимости проведенного исследования. Новые сплавы имеют высокие прочностные свойства. В частности, литейные сплавы в закаленном и состаренном состоянии имеют предел текучести на растяжение при комнатной температуре 303-306 МПа при удлинении 0,4%. При повышенных температурах испытания 200 и 250°C предел текучести составляет 246-250 и 209-215 МПа, а удлинение - 3 и 4-5,5% соответственно. Предел длительной прочности σ_{100}^{250} составляет 117-118 МПа. Прокатанные и отожжённые сплавы с пониженным содержанием легирующих элементов имеют предел текучести 316-405 МПа при относительном удлинении 4,0-6,5%. При этом закалка и старение при 210°C после прокатки обеспечивает наилучшую пластичность 11,3-14,5% при пределе текучести 264-266 МПа и пределе прочности 356-365 МПа. Составы и режимы получения сплавов защищены патентом РФ (RU 2749073C1).

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, описания используемых материалов и экспериментальных методов, глав с результатами исследования и списка использованной литературы. Число страниц с диссертационной работой составляет 120, рисунков 59, таблиц 21, ссылок в списке литературы 135.

Во введении поставлена цель работы, обоснованы ее актуальность, научная и практическая значимость.

В первой главе проведен литературный обзор. Достаточно подробно описаны особенности легирования алюминиевых сплавов на основе системы Al-Cu, фазовые диаграммы двойных и тройных систем с медью и исследуемыми

редкоземельными металлами, показана перспективность легирования алюминиевых сплавов выбранными элементами иттрием и эрбием. Эрбий и иттрий способны составить конкуренцию дорогостоящему скандию, как дисперсоидообразующие элементы, способные повышать прочностные свойства. Основное заключение из обзора литературы - сплавы с атомным соотношением Cu/Er и Cu/Y равным 4/1 имеют очень узкий интервал кристаллизации при высокой температуре солидуса и могут быть перспективны для разработки на их основе новых высокотехнологичных и жаропрочных материалов.

Во второй главе подробно описаны экспериментальные подходы, использованные при выполнении диссертационной работы, а также составы 12 исследованных сплавов, их экспериментально определенные температуры солидуса и ликвидуса.

В третьей главе представлены результаты исследования структуры и свойств тройных сплавов систем Al-Cu-Y и Al-Cu-Er и влияния основных примесей железа и кремния на фазовый состав и механические свойства базовых сплавов. Показано, что сплавы с примесями имеют на 10-30 МПа больший предел текучести при испытании на растяжение. В целом наличие постоянных для алюминия примесей железа и кремния не оказывает негативного влияния на характеристики механических свойств исследованного сплава. А сплавы с эрбием демонстрируют более высокие характеристики механических свойств по результатам испытаний на одноосное растяжение.

В четвертой главе проведено исследование влияния циркония на структуру и свойства сплавов Al-Cu-Y и Al-Cu-Er. Определено влияние циркония и марганца на фазовый состав и механические свойства базовых сплавов. Исследованы структура и свойства сложнолегированных сплавов с добавками магния, титана, примесей железа и кремния. В данной главе получены основные результаты, отражающие научную и практическую значимость. Изучена структура новых сплавов и определен комплекс характеристик механических свойств для литейных и деформируемых сплавов при комнатной и повышенных температурах.

В пятой главе представлены результаты определения характеристик физических свойств, таких как показатель горячеломкости, плотность, коэффициент термического расширения, а также показателей сверхпластической деформации и коррозионной стойкости, и поведение сплавов при обработке лазером. Показано, что по величине показателя горячеломкости новые сплавы обладают хорошими литейными свойствами.

Результаты диссертационной работы обсуждены на российских и международных конференциях и полностью опубликованы в 11 печатных работах, которые рекомендованы ВАК.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

Диссертация написана грамотным техническим языком, хорошо оформлена, хотя имеется ряд грамматических и пунктуационных ошибок. В работе подробно представлены теоретическое описание и используемые экспериментальные методики. Основные замечания по существу проведенной научной работы:

1. По результатам испытаний на растяжение сплавы с примесями (Таблица 3.3) после отжига при 100-150°C имеют более высокую пластичность, что кажется противоречивым, поскольку образуются не очень компактные интерметаллиды. То же для результатов по Таблице 3.4.

2. Не понятно, почему при исследовании влияния циркония в главе 4 гомогенизацию проводили при температурах 540 °C и 590 °C, а в главе 3 тройные сплавы гомогенизировали при 605°C.

3. При изучении микроструктуры в ПЭМ сплавов с цирконием и марганцем не представлено подтверждения присутствия названных фаз: $Al_{20}Cu_2Mn_3$, $Al_3(Zr,Y)$, $Al_3(Zr,Er)$, $\theta''(Al_2Cu)$. При этом вызывает сомнение, что в процессе старения при 210°C образуется именно $\theta''(Al_2Cu)$, вероятнее это θ' .

3. По рисунку 4.26 можно предположить, что упрочнение при старении при 210 °C не закончено. Зависимость имеет еще нарастающий характер.

4. Механические характеристики при повышенных температурах определяли после старения при 210 °C. Сплав при испытании при 250 °C и 300 °C имеет нестабилизированную структуру. Возможно, необходимо определять режим старения при температуре более близкой к температуре испытания, т.е. температуре эксплуатации.

5. Деформируемые сплавы показали достаточно высокий уровень предела текучести. Но плотность сплавов очень высокая. Следовало бы провести сравнение удельной характеристики. На сколько превышение по пределу текучести значимо при условии повышенной плотности сплава.

6. Согласно зависимостям напряжения от деформации при подсолидных температурах сплавы имеют удлинение до 500%. Насколько достигнутый результат значим в совокупности с другими свойствами новых сплавов?

7. Коррозионная стойкость, определённая для сплавов в состоянии низкотемпературного отжига после прокатки, не дает полного представления о разработанных сплавах. Следовало бы провести сравнение с эталонными сплавами, выбранными в данном исследовании.

Заключение

Сделанные замечания имеют рекомендательный характер и не влияют на высокую оценку диссертационной работы Кхамееса Елсайеда Мохамеда Амера. Работа выполнена на высоком теоретическом и экспериментальном уровне, полученные результаты являются новыми и имеют научную и практическую значимости. Достоверность результатов не вызывает сомнений и подтверждается их согласованностью с литературными данными. Это позволяет утверждать, что обозначенная в работе цель исследования достигнута, а положения, выносимые на защиту, экспериментально доказаны.

Диссертационная работа «Структура и свойства новых литейных и деформируемых сплавов на основе систем Al-Cu-Y и Al-Cu-Er», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском технологическом университете "МИСиС".

Соискателю Кхамеесу Елсайеду Мохамеду Амеру может быть присвоена степень кандидата технических наук по специальности 2.6.1 — “Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов” по результатам публичной защиты диссертации.

Доклад по диссертационной работе и отзыв заслушаны и обсуждены на секции НТС Комплекса «Металлические материалы» АО «Композит» 26 мая 2022 г. На заседании секции присутствовало 14 человек, из них докторов наук – 3, кандидатов наук – 7 (протокол заседания секции НТС № 5 от 26.05.2022 г.).

Адрес организации: 141070, МО, г. Королев, ул. Пионерская, д.4

Тел.: 8 (495) 513-22-11

Эл. почта: info@kompozit-mv.ru

Веб-сайт: www.kompozit-mv.ru

Начальник отделения
металлических материалов и
металлургических технологий,
заместитель председателя
секции НТС комплекса
«Металлические материалы», д.т.н.

А.И. Логачева