



«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

АО «Композит», д.т.н.

А.Г. Береснев

«19» 01 2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

**на диссертационную работу Мамзуриной Ольги Игоревны
«Разработка нового литейного и деформируемого жаропрочного сплава
на основе системы Al-Cu-Yb(Gd)-Mg-Mn-Zr», представленную на
соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»**

Сплавы на основе системы Al-Cu имеют широкое применение во многих областях промышленности, таких как аэрокосмическая, автомобильная и другие. В настоящее время важной задачей металловедения является дальнейшее повышение комплекса эксплуатационных свойств для разработки нового поколения авиакосмической техники и транспортных средств. Для повышения механических свойств алюминиевых сплавов применяют небольшие добавки РЗМ, которые способствуют выделению дисперсоидов в процессе отжига.

Диссертационная работа Мамзуриной Ольги Игоревны направлена на создание новых жаропрочных сплавов с улучшенными литейными свойствами и износостойкостью. В работе показано, что сплавы системы Al-Cu-Yb и Al-Cu-Gd являются перспективными для создания на их основе высокотехнологичных и жаропрочных материалов. Сплавы с атомным соотношением концентраций Cu/РЗМ равном 4/1 имеют узкий интервал кристаллизации (19-35 °С) и высокую температуру солидуса. Впервые подробно изучены фазовый состав и структура сплавов в алюминиевых углах диаграмм состояния данных систем в литом и гомогенизированном состояниях. Показано, что эвтектические фазы кристаллизационного происхождения устойчивы к росту в процессе высокотемпературной гомогенизации. Установлено, что неизбежные примеси в алюминии такие как Fe и Si не снижают пластичность сплавов, т.к. железо растворяется в фазе кристаллизационного происхождения Al_8Cu_4Yb Al_8Cu_4Gd в количестве около 1 %, а кремний приводит к формированию фаз $Al_{80}Yb_6Cu_6Si_8$ и $Al_{80}Gd_5Cu_8Si_5$, частицы которых в процессе гомогенизации фрагментируются и компактируются.

Последовательное легирование сплавов Al-Cu-Yb и Al-Cu-Gd цирконием и совместно цирконием и марганцем изменяет фазовый состав после гомогенизации, что приводит к увеличению прочностных характеристик за счет появления сферических фаз $Al_3(Zr, Yb/Gd)$ диаметром до 50 нм, дисперсоидов фазы $Al_{20}Cu_3Mn_3$ (в сплавах с марганцем) размером около 150x200 нм. Последующее старение протекает с выделением дискообразных частиц фазы $\Theta'(Al_2Cu)$ диаметром 80-180 нм и толщиной 3-5 нм.

При дальнейшем увеличении легирующих элементов (Al-Cu-Yb(Gd)-Mg-Mn-Zr) в литом состоянии дополнительно появляется фаза Mg_2Si . После гомогенизационного отжига за счет растворения неравновесного избытка фаз алюминиевый твердый раствор содержит максимальное количество меди (2-2,5 %) и магния (около 1 %), выделяются фазы типа $L1_2-Al_3(Zr, Yb/Gd)$ диаметром меньше 50 нм, дисперсоиды фазы $Al_{20}Cu_3Mn_3$. При старении практически гомогенно выделяются дисперсоиды основной фазы - упрочнителя $S'(Al_2CuMg)$.

Разработанные сплавы по структуре качественно близки к сплавам 242.0 и 336.0. Они состоят из алюминиевого твердого раствора, достаточно крупных частиц фаз кристаллизационного происхождения, при этом значения предела текучести выше более чем на 100 МПа, чем у стандартных сплавов. Превосходство в прочности новым сплавам придают выделившиеся при гомогенизации дисперсоиды фазы $L1_2-Al_3(Zr, Yb/Gd)$.

Составы и режимы получения сплавов защищены патентом РФ №2785402. «Жаропрочные литейные и деформируемые алюминиевые сплавы на основе систем Al-Cu-Yb и Al-Cu-Gd (варианты)».

Структура и объем работы:

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов и списка литературы из 130 наименований, изложена на 97 страницах, содержит 37 рисунков и 26 таблиц.

Во Введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, положения, выносимые на защиту.

В первой главе изложен обзор литературных данных по проблеме легирования сплавов систем Al-Cu и Al-Cu-Mg редкоземельными металлами.

Во второй главе описаны экспериментальные и расчетные методы, использованные при выполнении диссертационной работы, составы 10 исследованных сплавов, описание специального оборудования.

В третьей главе представлены результаты исследования эволюции структуры тройных сплавов Al-Cu-Yb, Al-Cu-Gd при последовательном легировании только цирконием, цирконием и марганцем и совместно

цирконием, марганцем и магнием. Подобраны режимы гомогенизационного отжига и старения. Показаны изменения фазового состава сплавов при гомогенизации и старении. При получении сплавов из алюминия марки А7 структура сплавов остается устойчивой к негативному влиянию примесей железа и кремния.

В четвертой главе на основании проведенных расчетов показано, что основной вклад в значение предела текучести сложнолегированных сплавов вносят дисперсоиды $L1_2$ и S' , рассчитанные по уравнению Орована. Согласно приведенным расчетам предел текучести комплекснолегированных сплавов в закаленном и состаренном состояниях хорошо согласуется с экспериментально определенными значениями.

Показатели жаропрочности, износостойкости и коррозионной стойкости сплавов находятся выше, чем промышленные сплавы сравнения (АМ5, АК7ч и др.).

В пятой главе представлен анализ особенностей эволюции структуры и свойств сплавов после деформации. Использование модели «динамического поведения материалов» позволило построить карты пластической деформации для разработанных сплавов и определить наилучшие температурно-скоростные параметры деформации: температура 490-540 °С и малые скорости деформации $0,01 \cdot s^{-1}$. При температуре 540 °С и скорости деформации $1 \cdot 10^{-2} s^{-1}$ коэффициент скоростной чувствительности достигает значения 0,3 при удлинениях выше 200 %.

В деформированном и отожженном (150-210 °С) состояниях комплекснолегированные сплавы имеют высокую прочность на уровне промышленных сплавов Д16 и АК4-1 при малой пластичности. В закаленном (после рекристаллизации) и состаренном состояниях листы сплавов имеют большее значение предела текучести, но меньшую пластичность, чем сплав Д16.

Завершают работу общие выводы по всем главам, отражающие основные результаты и позволяющие оценить научную и практическую значимость проведенных исследований.

Практическая значимость работы Разработаны новые сплавы системы Al-Cu-Yb(Gd)-Mg-Mn-Zr, отличающиеся хорошими технологическими свойствами. Показано, что сплавы устойчивы к негативному влиянию примесей железа и кремния. Выбранные режимы термодиформационной обработки позволили достичь высокого уровня механических свойств при комнатной ($\sigma_{0,2} = 298-312$ МПа) и повышенных температурах ($\sigma_{0,2}$ при 250 °С составляет 206-235 МПа, а предел длительной прочности $\sigma_{100}^{250} = 111-113$ МПа). В деформированном и отожженном при 150-210 °С состояниях сплавы имеют

высокую прочность ($\sigma_b = 441-449$ МПа, $\delta = 2,7-3,2\%$) на уровне промышленных сплавов Д16 и АК4-1 при малой пластичности.

Результаты диссертационной работы обсуждены на российских и международных конференциях, основные результаты опубликованы в 6 печатных работах, которые рекомендованы ВАК. Разработанные составы новых сплавов защищены патентом.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертационной работы.

Диссертационная работа написана грамотным техническим языком, хотя имеется несколько грамматических ошибок. Основные замечания по существу проведенной научной работы:

1. В работе утверждается, что в литом состоянии в сплавах присутствуют неравновесные фазы Al_2Cu и $AlCu$. Но на представленных изображениях РЭМ литых структур эти фазы не отмечены.
2. Из текста работы не очевидно, что дисперсоиды фазы $L1_2-Al_3(Zr, Yb/Gd)$ выделяются именно в процессе гомогенизационного отжига. Почему нет ПЭМ изображений структур после гомогенизации?
3. В работе не приведены значения величины обжата и количество проходов при получении листового проката из исследуемых сплавов. Не указаны оптимальные режимы.
4. Вывод о снижении склонности новых сплавов к образованию горячих трещин необходимо подтвердить дополнительными испытаниями.
5. Впервые определенные фазы кристаллизационного происхождения с марганцем $Al_{80-88}-Cu_{8-12}Yb_{3-4}Mn$ и $Al_{78-86}-Cu_{10-15}Gd_{3-5}Mn$ требуют уточнения состава и дополнительных исследований.
6. Разработанные сплавы в деформированном состоянии имеют прочность на уровне промышленных сплавов Д16 и АК4-1. Однако не приведено сравнение свойств данных сплавов при повышенных температурах (200-300 °С), для работы в которых и был разработан сплав АК4-1.
7. В работе, отсутствует информация о влиянии легирования Yb и Ga на свариваемость сплавов, что было бы интересно, так как сплав Д16 обладает плохой свариваемостью и наличие удовлетворительных свойств в разработанных сплавах могло бы расширить применение алюминиевых сплавов за счёт снижения трудоёмкости изготовления изделий.

8. Сплавы на основе систем Al-Cu-Mn и Al-Cu-PЗМ нашли широкое применение при изготовлении изделий, работающих при криогенных температурах. К сожалению, в работе оценка характеристик разработанных сплавов не описана.

Заключение

Сделанные замечания имеют рекомендательный характер и не влияют на высокую оценку диссертационной работы Мамзуриной Ольги Игоревны. Работа выполнена на высоком теоретическом и экспериментальном уровне, полученные результаты являются новыми и имеют научную и практическую значимость. Достоверность результатов не вызывает сомнений. Обозначенная в работе цель исследования достигнута, а положения, выносимые на защиту, экспериментально доказаны.

Диссертационная работа «Разработка нового литейного и деформируемого жаропрочного сплава на основе системы Al-Cu-Yb(Gd)-Mg-Mn-Zr», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС.

Соискателю Мамзуриной Ольге Игоревне 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» 16 января 2024 года. На заседании секции присутствовало 25 человек, из них докторов наук – 3, кандидатов наук – 18 (протокол заседания НТС № 1 от 16.01.24 г.).

Адрес организации: 141070, МО, г. Королев, улица Пионерская, д. 24

Тел.: 8 (495) 516-22-11

Электронная почта: info@kompozit-mv.ru

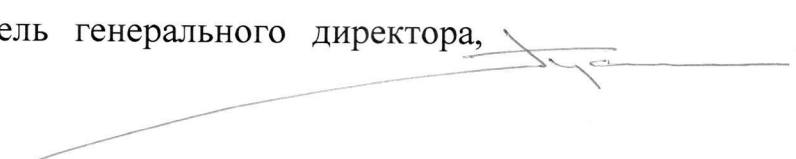
Веб-сайт: www.kompozit-mv.ru

Начальник сектора лёгких сплавов,
к.т.н.



А. С. Политико

Заместитель генерального директора,
к.т.н.



М. С. Гусаков