

УТВЕРЖДАЮ:

Ректор ФГБОУ ВПО «МАТИ-
Российский государственный
технологический университет»,
д.т.н., профессор



Рожественский А.В.

2015 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования

«МАТИ – Российский государственный технологический
университет им К.Э. Циолковского»

на диссертацию Газизова Марата Разифовича на тему «Влияние литья и
термомеханической обработки на структуру и механические свойства сплава
Al-Cu-Mg-Ag», представленную на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и
термическая обработка металлов и сплавов

Диссертационная работа Газизова М.Р. посвящена исследованию
влияния литья, термической и термомеханической обработок с
использованием больших пластических деформаций на микроструктуру,
фазовый состав и механические свойства термоупрочняемого алюминиевого
сплав системы Al-Cu-Mg-Ag с микродобавками Sc, Zr и Ge.

Актуальность темы диссертации

Актуальность работы обусловлена тем, что впервые были получены
систематические данные о структуре Al-Cu-Mg-Ag сплава с микродобавками
Sc, Zr и Ge после литья и влияние на неё гомогенизационного отжига.
Результаты эволюции микроструктуры в процессе пластической деформации с
большими степенями и последующего термического воздействия позволили
разработать способ повышения технологической пластичности полуфабрикатов
из данного материала и установить механизмы, ответственные как за
измельчение структуры, так и за последовательность фазовых превращений при
больших пластических деформациях и последующем старении. Изучение
влияния режимов термомеханической обработки на механические свойства

материала, структуру и последовательность выделения фаз при старении позволяет не только установить режимы обработки, которые обеспечивают высокую кратковременную прочность в сочетании с удовлетворительной пластичностью, либо высокую долговременную прочность и высокий предел ползучести, но и установить последовательность фазовых превращений при старении сильнодеформированного сплава системы Al-Cu-Mg-Ag.

Результаты данной работы позволяют создать целостную картину об изменениях в микроструктуре и фазовом составе Al-Cu-Mg-Ag сплава как после кристаллизации и последующем гомогенизационном отжиге, так и в процессе пластической деформации методами равноканального углового прессования (РКУП) при промежуточных температурах, а также холодной прокатки и последующем старении. Фактически в процессе выполнения работы была получена комплексная картина влияния микролегирования, режимов термомеханической обработки на механические свойства материала, что обуславливает актуальность работы с точки зрения промышленного использования Al-Cu-Mg-Ag сплавов в авиастроении. Таким образом, актуальность диссертационной работы не вызывает сомнений.

В результате анализа имеющихся литературных данных исследуемого направления Газизова М.Р. была сформулирована следующая цель диссертационной работы – установить влияние литья, гомогенизационного отжига и термомеханической обработки с использованием больших пластических деформаций на микроструктуру, фазовый состав и механические свойства Al-Cu-Mg-Ag сплава с микродобавками Sc, Zr и Ge.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Изучить особенности формирования микроструктуры и фазового состава Al-Cu-Mg-Ag сплава в литом и гомогенизированном состояниях.
2. Оценить влияние ТМО с использованием больших степеней деформации (до 80%) при комнатной температуре на микроструктуру, последовательность выделения фаз при старении и механические свойства Al-Cu-Mg-Ag сплава.
3. Установить влияние морфологии частиц различных фаз на закономерности и механизмы формирования мелкозернистой структуры и фазового состава Al-Cu-Mg-Ag сплава в процессе деформации методом РКУП при повышенных температурах ($T \sim 0,4 \dots 0,5 T_{пл}$).
4. Исследовать механические свойства Al-Cu-Mg-Ag сплава после РКУП, в том числе в области больших степеней деформации при повышенных температурах ($T \sim 0,4 \dots 0,5 T_{пл}$).

5. Выявить основные механизмы упрочнения и оценить их вклад в общую прочность сплава Al-Cu-Mg-Ag после деформации методом РКУП при повышенных температурах ($T \sim 0,4 \dots 0,5 T_{пл}$).

Структура диссертации и её основное содержание

Диссертация Газизова М.Р. состоит из введения, пяти глав, выводов, списка используемой литературы, включающего 176 наименований.

Во введении обоснована актуальность решаемой проблемы; сформулированы цель и задачи проводимых исследований, а также основные положения, выносимые на защиту; показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов; приведены сведения о структуре и объеме диссертации; определен личный вклад автора; указаны данные апробации работы на конференциях и семинарах, а также информация о публикациях, в том числе из списка ВАК.

В первой главе диссертационной работы рассмотрено влияние микролегирования на фазовый состав Al-Cu-Mg-Ag сплавов. Проанализированы имеющиеся на сегодняшний день данные о структуре и морфологии Ω -фазы, механизме ее зарождения и роста, а также последовательности выделения фаз в Al-Cu-Mg-Ag сплавах в процессе старения. Описаны основные механизмы упрочнения алюминиевых сплавов после термомеханической обработки. Рассмотрено влияние промежуточной пластической деформации при комнатной температуре на фазовый состав Al-Cu-Mg-Ag сплавов после старения. Уделено внимание влиянию РКУП, как метода больших пластических деформаций, на эволюцию микроструктуры и фазового состава термоупрочняемых алюминиевых сплавов.

Во второй главе диссертационной работы обоснован выбор материала и методик исследований, описаны методы термической и термомеханической обработок. Подробно описаны используемые в ходе исследований методики, в том числе растровая и просвечивающая электронная микроскопия, методы элементного и фазового анализа, а также методик рентгенофазового анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии.

В третьей главе диссертационной работы рассмотрены особенности структуры и фазового состава Al-Cu-Mg-Ag сплава с микродобавками Sc, Zr и Ge после литья, а также выявлены общие закономерности их эволюции в процессе гомогенизационного отжига. Установлено, что двухступенчатая гомогенизация приводит к образованию частиц W-фазы ($Al_{8-x}Cu_{4+x}Sc$) по границам зерен, которые растут за счет как растворения содержащих Sc частиц θ -фазы, так и обеднения Sc прилегающих областей пересыщенного твердого

раствора. Данный факт приводит к неравномерному распределению когерентных частиц $\text{Al}_3\text{Sc}/\text{Al}_3(\text{Sc,Zr})$ в объеме материала. При кристаллизации Al-Cu-Mg-Ag сплава с микродобавкой Ge выделяется фаза Mg_2Ge , которая не растворяется при последующем гомогенизационном отжиге.

В четвертой главе диссертации рассмотрена эволюция микроструктуры и фазового состава Al-Cu-Mg-Ag сплава с микродобавками Sc, Zr и Ge в процессе ТМО, включающей промежуточную деформацию при комнатной и повышенных температурах ($T \sim 0,4 \dots 0,5 T_{\text{пл}}$). Термомеханические обработки, включающие пластическую деформацию при комнатной температуре, приводят к и изменению последовательности выделения фаз в Al-Cu-Mg-Ag сплаве в процессе старения: при комнатной температуре: ПТР \rightarrow зоны ГПБ, при 190°C : ПТР $\rightarrow \Omega + \theta' + \text{S}'$. Изменение последовательности выделения фаз при статическом старении связано с растворением кластеров Ag-Mg с Cu в процессе пластической деформации. Установлено также, что в процессе больших пластических деформаций Al-Cu-Mg-Ag сплава методом РКУП при повышенных температурах ($T \sim 0,4 \dots 0,5 T_{\text{пл}}$) процесс непрерывной динамической рекристаллизации инициируется формированием геометрически необходимых границ (ГНГ) после первого прохода. С данным процессом связано образование текстурных α - и β -волокон, тогда как быстрое увеличение среднего угла разориентировки границ, объемной доли рекристаллизованных зерен, плотности ВУГ после второго и последующих проходов коррелирует с появлением неустойчивых ориентаций между устойчивыми текстурными компонентами B_θ/\bar{B}_θ , что обеспечивает образование непрерывного γ -волокна.

В пятой главе проводятся исследования механических свойств Al-Cu-Mg-Ag сплава после ТМО, включающей большие пластические деформации, а также оценка вкладов различных механизмов упрочнения в общую прочность материала. Установлено, что после РКУП при повышенных температурах ($T \sim 0,4 \dots 0,5 T_{\text{пл}}$) с увеличением степени деформации имеет место снижение механических свойств исходно закаленного Al-Cu-Mg-Ag сплава, которое связано, главным образом, с уменьшением вклада от дисперсионного механизма упрочнения. Уменьшение вклада от дисперсионного механизма упрочнения не компенсирует увеличение от зернограницного и деформационного механизмов упрочнения. Оптимальное сочетание прочности и пластичности сплава системы Al-Cu-Mg-Ag обеспечивает обработка Т840, а максимальную жаропрочность обеспечивает обработка Т6.

Научная новизна диссертационной работы

В диссертационной работе впервые получены следующие научные результаты:

1. Установлено, что при литье Al-Cu-Mg-Ag сплава с микролегирующими добавками Sc, Zr и Ge при кристаллизации происходит выделение содержащей Sc θ -фазы по границам ячеек; около 60% Sc и весь Zr фиксируются в пересыщенном твердом растворе (ПТР). При гомогенизационном отжиге сплава образуются крупные частицы W-фазы ($\text{Al}_{8-x}\text{Cu}_{4+x}\text{Sc}$) по границам зерен, которые растут за счет растворения содержащей Sc θ -фазы и обеднения Sc областей твердого раствора, прилегающих к частицам W-фазы. Ge при кристаллизации выделяется в виде частиц фазы Mg_2Ge , которая не растворяется при последующей термической обработке.

2. Показано, что в процессе больших пластических деформаций Al-Cu-Mg-Ag сплава методом РКУП при повышенных температурах ($T \sim 0,4 \dots 0,5 T_{\text{пл}}$) процесс непрерывной динамической рекристаллизации (НДР) начинается благодаря формированию геометрически необходимых границ (ГНГ). С данным процессом связано формирование текстурных α - и β -волокон, тогда как быстрое увеличение среднего угла разориентировки границ, объемной доли рекристаллизованных зерен, плотности высокоугловых границ (ВУГ) коррелируют с появлением неустойчивых ориентаций между устойчивыми текстурными компонентами V_θ/\bar{V}_θ , что обеспечивает образование прерывистого γ -волокна.

3. Установлено, что пластическая деформация методом РКУП Al-Cu-Mg-Ag сплава при повышенных температурах приводит к ускорению распада ПТР и к трансформации Ω в θ -фазу по механизму *in situ* превращения. В процессе деформации РКУП при повышенных температурах ($T \sim 0,4 \dots 0,5 T_{\text{пл}}$) последовательность фазовых превращений имеет вид: $\text{ПТР} \rightarrow \Omega \rightarrow \theta + \text{S} + \beta(\text{MgAg}) + \text{U}(\text{AlMgAg}) + (\text{Ag})$. Такое изменение фазового состава сопровождается уменьшением прочности Al-Cu-Mg-Ag сплава в результате снижения вклада дисперсионного механизма упрочнения, несмотря на увеличение вклада зернограницного и деформационного механизмов упрочнений.

4. Установлено, что высокие механические свойства сплава после обработок Т8ХХ связаны с тем, что деформация при комнатной температуре приводит к растворению кластеров Mg-Ag, что делает невозможным последующее гетерогенное зарождение на них частиц Ω -фазы, и облегчает выделение θ' - и $\text{S}'(\text{Type I/S1})$ -фаз на дислокациях. При этом

последовательность выделения фаз в процессе старения при комнатной температуре имеет вид: ПТР→зоны Гинье-Престона-Багаряцкого (ГПБ), а при 190°C: ПТР→ Ω +S''→ Ω +S'(Type I/S1)+ θ' . Обработка T840 обеспечивает максимальную прочность за счет увеличения дисперсности пластин Ω -фазы, которые выделяются исключительно гомогенно. Образование деформационных полос при прокатке с обжатиями >40% инициирует формирование зернограницных утолщенных пластин Ω -фазы, что ведет к появлению анизотропии механических свойств.

5. Показано, что промежуточная пластическая деформация методом прокатки при комнатной температуре приводит к снижению сопротивления ползучести Al-Cu-Mg-Ag сплава при температуре 150°C. В состоянии T840 падение пределов ползучести и длительной прочности при 150°C на базах испытания 100 и 1000 часов достигает 30-35%. Это связано с диспергированием пластин Ω -фазы, что облегчает трансформацию Ω → θ в процессе ползучести/или продолжительного старения. Наивысшая долговременная прочность и предел ползучести достигаются при обработке T6 (без промежуточной деформации).

Практическая значимость диссертационной работы

Результаты диссертационной работы представляют высокую практическую значимость. На основе проведенных исследований микроструктуры и фазового состава Al-Cu-Mg-Ag сплава с микродобавками Sc, Zr и Ge в литом и гомогенизированном состояниях обоснована целесообразность введения Zr в сплавы данной системы и показано, что введение Sc и Ge нецелесообразно.

Диссертационная работа представляет собой целостное законченное исследование, результату которого могут быть использованы для оптимизации режимов термомеханических обработок (ТМО) Al-Cu-Mg-Ag сплавов в зависимости от условий эксплуатации готовых изделий. Установлены режимы ТМО Al-Cu-Mg-Ag сплава для достижения максимальной прочности на растяжение – обработка T840, или получения максимальных характеристик жаропрочности – обработка T6.

На основании полученных результатов исследований разработан способ термомеханической обработки, обеспечивающий повышение технологической пластичности объемных полуфабрикатов из Al-Cu-Mg-Ag сплавов, который защищен патентом RU 2534909.

Результаты анализа закономерностей эволюции микроструктуры, фазового состава и механических свойств после ТМО, включающей большие

пластические деформации методом холодной прокатки, использованы при выполнении совместного проекта ОАО «УМПО» (г. Уфа) и ФГБОУ ВПО УГАТУ (г. Уфа) «Разработка и промышленное освоение координируемых технологий высокоточного формообразования и поверхностного упрочнения ответственных деталей из Al-сплавов с повышенной конструкционной энергоэффективностью», реализуемого по Договору №40/10-30976/НЧ-НЧ-01-13-ХГ при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор №02.G25.31.0010 между ОАО «УМПО» и Министерством образования и науки РФ).

Достоверность полученных результатов диссертационной работы

Достоверность полученных результатов диссертационной работы не вызывает сомнений, что в первую очередь связано с использованием современного апробированного научно-методического аппарата, а также наблюдением закономерностей эволюции микроструктуры, фазового состава и механических свойств, совпадающих с общепризнанными литературными данными исследований термоупрочняемых алюминиевых сплавов аналогичных систем легирования.

Замечания по диссертационной работе

К замечаниям следует отнести:

1. В литературном обзоре к диссертационной работе отсутствует описание комплекса механических свойств алюминиевых сплавов системы Al-Cu-Mg-Ag после ТМО в зависимости от содержания основных легирующих элементов, а также причины выбора исследуемого сплава с заданным соотношением содержания легирующих компонентов.
2. На стр. 129 диссертации указан термин «аллотропная» применительно к трансформации Ω -фазы в θ -фазу. Применение данного прилагательного для описания процесса трансформации $\Omega \rightarrow \theta$ является некорректным, поскольку термин «аллотропия» применяется только для описания существования двух и более простых (!) веществ одного и того же химического элемента, различных по строению и свойствам, тогда как Ω и θ фазы являются соединениями, состоящими из двух и более элементов.
3. На стр. 74, п. 4.2.1. в словосочетании «...отжиг при 520°C в течение 1 часа и ...» термин «отжиг» является некорректным. Правильно употреблять термин «обработка на твердый раствор».

4. По тексту в целом вместо часто встречающегося термина «предел прочности» лучше использовать термин «временное сопротивление», указанное в ГОСТе.
5. Стр. 102, 129, термин «трубочная диффузия» является некорректным. Видимо имеется в виду диффузия по дислокационным трубкам.

Общая оценка диссертационной работы

Отмеченные недостатки, выявленные в процессе знакомства с диссертационной работой М.Р. Газизова, носят частный характер и не колеблют общего весьма позитивного впечатления от нее. Представленная диссертация является законченной квалификационной работой, выполненной соискателем ученой степени на актуальную тему. В целом по уровню решаемых задач, научной новизне, практической значимости и объему полученных результатов диссертационная работа Газизова М.Р. на тему «Влияние литья и термомеханической обработки на структуру и механические свойства сплава Al-Cu-Mg-Ag» удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов. Основные результаты диссертационной работы отражены в 14 работах, из них – 13 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, и 1 патент. Материалы диссертации доложены на российских и международных конференциях и семинарах. Поставленные в работе цель и задачи полностью достигнуты, а основные результаты отражены в выводах. В целом диссертационная работа и автореферат написаны понятным научным языком, имеют четко прослеживаемую логику изложения. Автореферат и публикации полно отражают содержание диссертационной работы. Результаты диссертационного исследования получены либо автором лично, либо при его непосредственном участии.

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решены актуальные проблемы, имеющие важное научное и практическое значение. Диссертационная работа Газизова Марата Разифовича соответствует паспорту специальности 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов» (п. 1 «Изучение взаимосвязи химического и фазового составов (характеризуемых различными типами диаграмм), в том числе диаграммами состояния с физическими, механическими, химическими и другими свойствами сплавов», п. 2 «Теоретические и экспериментальные

исследования фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах, происходящих при различных внешних воздействиях», п. 3 «теоретические и экспериментальные исследования влияния структуры (типа, количества и характера распределения дефектов кристаллического строения) на физические, химические, механические, технологические и эксплуатационные свойства металлов и сплавов»).

Работа отвечает требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» утвержденном Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а Газизов Марат Разифович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Настоящий отзыв составлен зам. заведующего кафедрой по научной работе кафедры «Материаловедение и технология обработки материалов» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «МАТИ – Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского» доктором технических наук, профессором М.Ю. Коллеровым, обсужден и одобрен на заседании кафедры «Материаловедение и технология обработки материалов» «25» 05 2015 года (протокол № 9/15)

Зам. заведующего кафедрой «Материаловедение и технология обработки материалов», доктор технических наук, профессор



М.Ю. Коллеров

