

На правах рукописи

Могучева Анна Алексеевна

**ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ
НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1421**

Специальность 05.16.01

Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА – 2010

Работа выполнена в Белгородском государственном университете

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, Кайбышев Рустам Оскарович

Научный консультант:

доктор технических наук, Колобнев Николай Иванович (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ)

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор, Портной Владимир Кимович, (МИСиС)

доктор технических наук, Волкова Екатерина Федоровна,
(ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ)

Ведущая организация: ОАО «Всероссийский институт легких сплавов», г. Москва

Защита состоится «24» июня 2010 г. в 15.30

на заседании диссертационного совета Д 212.132.08 при федеральном государственном образовательном учреждении «Национальный Исследовательский Технологический Университет «МИСиС», 1190049, г. Москва, Ленинский проспект д.4, ауд. Б-2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного образовательного учреждения «Национальный Исследовательский Технологический Университет «МИСиС».

Автореферат разослан « » мая 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Мухин С.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Свариваемые сплавы системы Al-Li-Mg-Sc-Zr являются перспективными материалами для самолетных конструкций, так как обладают малой плотностью, повышенным модулем упругости и достаточно высокой прочностью. Однако широкому использованию полуфабрикатов из сплавов системы Al-Li-Mg-Sc-Zr в авиастроении препятствует ряд нерешенных проблем, к которым относятся низкая термическая стабильность, ограниченная технологическая пластичность и невысокие служебные свойства в крупнозернистом состоянии, ярко выраженная анизотропия механических свойств. Это затрудняет производство из них целого ряда деталей планера самолета требуемого качества. Известно, что формирование в алюминиевых сплавах системы Al-Li рекристаллизованной ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры (размер зерна меньше 10 мкм) позволяет получить высокие характеристики прочности, пластичности и трещиностойкости, и, самое главное, изотропность механических свойств. Другим следствием формирования УМЗ структуры в полуфабрикатах из алюминиевых сплавов, содержащих Sc и/или Zr, является экстраординарное повышение технологической пластичности, что позволяет, как прокатывать тонкие листы из этих материалов, так и изготавливать из этих листов сложные по конфигурации детали методом пневмоформовки в состоянии сверхпластичности (СП). К моменту постановки данной работы на основе литературных данных и комплексных лабораторных исследований было установлено, что наиболее эффективным методом формирования УМЗ структуры в сплавах системы Al-Li-Mg-Sc-Zr является интенсивная пластическая деформация (ИПД), реализуемая посредством равноканального углового прессования (РКУП).

Алюминиевые сплавы, легированные литием, относятся к термически упрочняемым алюминиевым сплавам, в которых сложные фазовые превращения развиваются при термической обработке. Состояние сплава, определяемое характером зеренной структуры, полнотой прохождения рекристаллизации, распределением вторых фаз оказывает сильное влияние на характеристики трещиностойкости и сопротивление циклическим нагрузкам. В свою очередь эти ресурсные характеристики определяют саму возможность использования сплавов системы Al-Li-Mg как конструкционных материалов в авиастроении.

Следует отметить, что к настоящему времени в литературе практически отсутствуют данные по комплексу служебных механических свойств и термической стабильности алюминиевого сплава 1421 системы Al-Li-Mg-Sc-Zr с УМЗ структурой, что сдерживает применение сплава в промышленности. Известно, что размер зерен в сплавах Al-Li-Mg-Sc-Zr влияет на стадийность фазовых превращений при старении, однако, их особенности изучены недостаточно.

Недостаток информации требует проведения ряда дополнительных исследований, направленных на изучение структурных изменений в сплаве

1421 системы Al-Li-Mg-Sc-Zr в процессе ИПД и, самое главное, при последующей термической обработке. Необходимо знать закономерности рекристаллизации при нагреве под закалку, а также механизмы влияния УМЗ структуры на кинетику распада пересыщенного твердого раствора этих сплавов. Структурные изменения во время пластической деформации и термической обработки сплавов системы Al-Li-Mg-Sc-Zr влияют на характеристики прочности, пластичности, трещиностойкости и сопротивление циклическим нагрузкам. Поэтому их детальное исследование и установление связи между структурой и механическими свойствами представляет не только научное, но и большое практическое значение.

Цель работы заключалась в изучении процессов структурообразования промышленного сплава системы Al-Li-Mg-Sc-Zr в процессе ИПД и последующей термической обработки, а также в определении закономерностей изменения механических свойств сплава в зависимости от характеристик структуры и фазового состава.

В качестве материала исследования был выбран промышленный алюминиевый сплав системы Al-Li-Mg-Sc-Zr марки 1421. Интенсивную пластическую деформацию (ИПД) материала осуществляли методом равноканального углового прессования (РКУП) и методом РКУП с последующей изотермической прокаткой (ИП).

Для достижения поставленной цели решали следующие **задачи**:

1 Исследовать влияние степени ИПД методом РКУП на зеренную структуру, фазовый состав и механические свойства сплава 1421, включая характеристики прочности и пластичности, предел усталостной выносливости и вязкость разрушения;

2 Определить влияние термической обработки на УМЗ структуру и свойства сплава 1421, подвергнутого ИПД. Выявить закономерности рекристаллизации при нагреве под закалку сплава 1421 с УМЗ структурой и рассмотреть особенности старения этого материала;

3 Выяснить влияние изотермической прокатки на зеренную структуру и механические свойства заготовок сплава 1421, предварительно подвергнутого РКУП.

Научная новизна

Показано, что сочетание РКУП и ИП приводит к увеличению скорости трансформации малоугловых границ в высокоугловые границы в процессе ИПД, что обеспечивает формирование зеренной структуры при меньших степенях деформации, чем при РКУП.

Выявлено, что однородная УМЗ структура в сплаве 1421 термически устойчива и сохраняется при нагреве под закалку за счет стабилизирующего влияния наноразмерных когерентных частиц $Al_3(Sc,Zr)$. В полуфабрикатах этого сплава с однородной УМЗ структурой (~2 мкм) развивается

собираетельная рекристаллизация, которая, однако, не приводит к значимому росту зерен. Это обеспечивает достижение сверхвысоких сверхпластических удлинений (2700%) и возможность применения стандартной упрочняющей термической обработки сплава 1421 с УМЗ структурой.

Установлено, что формирующаяся в процессе РКУП в сплаве 1421 УМЗ структура сильно влияет на процессы старения. На ранней стадии старения происходит выделение фазы δ' (Al_3Li) в теле зерен. Фазу $\text{S}_1(\text{Al}_2\text{LiMg})$, располагающуюся по межзеренным границам, не удастся полностью растворить при нагреве под закалку, что приводит к интенсивному увеличению, как ее удельного объема, так и размера частиц S_1 -фазы при старении. В зависимости от числа проходов увеличение времени старения приводит к увеличению объемной доли S_1 -фазы до ~20% за счет растворения δ' -фазы, что снижает прочностные свойства.

Практическая значимость

Определены оптимальные режимы РКУП, позволяющие получать однородную УМЗ структуру (~1 мкм) в сплаве 1421 при относительно небольших степенях деформации. Методом РКУП получена УМЗ структура в массивных заготовках сплава 1421.

Установлено, что нагрев до температуры закалки ($T=450^\circ\text{C}$) не оказывает заметного влияния на деформированную структуру сплава 1421, сформировавшуюся в процессе РКУП. Однако формирование УМЗ структуры в сплаве 1421 изменяет кинетику распада пересыщенного твердого раствора.

Показано, что сочетание РКУП с прямоугольной формой каналов и последующей ИП позволяет получать однородную УМЗ структуру (~1-2 мкм) в листах сплава 1421 при меньших степенях суммарной деформации, чем только за счет РКУП. Листы демонстрируют высокие сверхпластические свойства с максимальным удлинением до разрушения ~2700% при температуре 450°C и начальной скорости деформации $1,4 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ с коэффициентом скоростной чувствительности ~0,57. Такие экстраординарные свойства связаны с высокой стабильностью УМЗ структуры в процессе сверхпластической деформации (СПД). Определены оптимальные температурно-скоростные параметры СПД листов с УМЗ структурой.

Определены механические свойства полуфабрикатов и листов из сплава 1421 с УМЗ структурой. При комнатной температуре прочностные свойства изотропны; величины прочности и пластичности соответствуют стандартным свойствам сплава 1421.

Получены значения вязкости разрушения $K_{IC}=22,7 \text{ МПа} \times \text{м}^{1/2}$ и циклической прочности $\sigma_{-1}=185 \text{ МПа}$ для сплава 1421 с УМЗ структурой.

На защиту выносятся:

1 Формирование УМЗ структуры в сплаве 1421 в процессе РКУП и ИП;

2 Влияние термической обработки на структуру и механические свойства сплава 1421 с УМЗ структурой;

3 Механические свойства: предел прочности, предел текучести, относительное удлинение; предел выносливости и вязкость разрушения сплава 1421 с УМЗ структурой;

4 Влияние равноканального углового прессования и последующей изотермической прокатки на структуру, статические и сверхпластические свойства сплава 1421.

Диссертационная работа выполнялась в рамках проекта МНТЦ (Международного научно-технического центра) №2011; федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» государственный контракт № П770.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы были представлены на II международной школе «Физического материаловедение» и XVIII Уральской школе металловедов-термистов (г. Тольятти, Россия, 2006 г.); XVII Петербургских чтениях по проблемам прочности (г. Санкт-Петербург, Россия, 2007); XVIII Петербургских чтениях по проблемам прочности и роста кристаллов (г. Санкт - Петербург, Россия, 21-24 октября 2008 г.); Всероссийской школе-семинаре молодых ученых и преподавателей «Функциональные и конструкционные наноматериалы» (г. Белгород, Россия, 8-15 ноября 2008 г.); международном форуме по нанотехнологиям (г. Москва, Россия, 3-5 декабря 2008 г.); Всероссийской молодежной школе-конференции «Современные проблемы металловедения» (г. Пицунда, Абхазия, 18-22 мая 2009 г.); XVII Международной конференции «Физика прочности и пластичности материалов» (г. Самара, Россия, 23-25 июня 2009 г.); международной конференции ICSMA15 (г. Дрезден, Германия, 16-21 августа 2009 г.); международной конференции Thermec'09 (г. Берлин, Германия, 25-29 августа 2009 г.); Международной научно-технической конференции «Современные проблемы металловедения сплавов цветных металлов» (г. Москва, 1-2 октября 2009 г.); Всероссийской конференции «Проведение научных исследований в области индустрии наносистем и материалов» (г. Белгород, 16-20 ноября 2009 г.).

Вклад автора. Соискатель лично проводил исследования процессов структурообразования в сплаве, оценивал механические свойства после различных видов термомеханической обработки, а также анализ и интерпретацию результатов экспериментов. Автор принимал активное участие в написании статей.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается использованием нескольких методов исследования микроструктуры сплава, таких как оптическая металлография, растровая и электронная микроскопия, EBSD анализ (анализ картин микродифракции отраженных электронов). Механические свойства сплава были изучены после различных режимов

термомеханической обработки на образцах одинакового типа и размера. Интерпретация результатов механических испытаний основывалась на данных микроструктурных исследований, а также результатов фрактографического анализа.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражено в 8 работах, из них - 3 статьи в изданиях, включенных в перечень журналов ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и списка литературы. Работа изложена на 120 страницах, содержит 35 рисунков, 8 таблиц. Список литературы включает 200 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации. Сформулированы ее цель, научная новизна и практическая значимость.

ГЛАВА 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В данной главе рассмотрена природа сплавов системы Al-Li-Mg-Sc-Zr, отмечены их достоинства и недостатки. Подробно описаны наиболее распространенные на сегодняшний день методы ИПД, используемые для формирования в материалах и, главным образом, алюминиевых сплавах УМЗ структуры. Показано, что наилучшим методом ИПД для обработки алюминиевых сплавов является РКУП. Показано, что алюминиевые сплавы с УМЗ микроструктурой, полученной методом РКУ прессования, проявляют высокоскоростную и низкотемпературную СП. Вследствие недостатка экспериментальных данных остаются неясными механизмы усталостного разрушения материалов с УМЗ структурой. На основе анализа литературных данных сформулированы задачи диссертационной работы.

ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала исследования выбран высокопрочный алюминиевый сплав системы Al-Li-Mg-Sc-Zr марки 1421. Химический состав сплава представлен в таблице 1.

Таблица 1 - Химический состав сплава 1421

Основа	Содержание химических элементов, вес. %								
	Легирующие элементы				Примеси				
Al	Mg	Li	Sc	Zr	Ti	Cu	Cr	Fe	Na
	5,1	2,1	0,17	0,08	<0,1	0,03	0,05	0,1	0,014

Слитки диаметром 400 мм промышленного алюминиевого сплава 1421 были получены полунепрерывным литьем, гомогенизированы при температуре 425°C в течение 12 часов, затем были проэкструдированы при температуре 360-390°C со скоростью прессования 0,03 м/мин для получения прутка диаметром 140 мм.

РКУП заготовок из сплава 1421 в форме плит (125×125×25 мм) осуществляли в оснастке с прямоугольным сечением каналов, пересекающихся под углом 90°. Прессование плит осуществляли при температуре 325°C до истинной степени деформации $\varepsilon \sim 2,3$ и $\varepsilon \sim 4,6$, что соответствует количеству проходов РКУП 2 и 4, по маршруту D (при переходе от одного прохода РКУП к другому, плиты последовательно поворачивали на угол +90° вокруг нормали к наибольшей площади сечения заготовки, дополнительно для повышения однородности структуры, заготовки вращали на 180° вокруг продольной оси) и до истинной степени деформации $\varepsilon \sim 9,2$ за 8 проходов по маршруту С (с поворотом заготовки на 180° после каждого прохода через канал матрицы).

Прокатку сплава 1421 с УМЗ структурой проводили в изотермических условиях при температуре 325°C. Нагрев заготовок осуществляли в печах сопротивления с точностью поддержания температуры не менее $\pm 10^\circ\text{C}$. Заготовки размером 115×115×15 мм³ прокатывали до толщины 1,8 мм, что соответствовало суммарной степени обжатия $\sim 88\%$. В дальнейшем, для удобства изложения, состояния сплава 1421, деформированные РКУП до 2, 4 и 8 проходов с последующей изотермической прокаткой, обозначим как состояния I, II и III, соответственно.

Перед испытаниями на растяжение образцы подвергали термической обработке (ТО), состоящей из закалки и последующего старения. Температура нагрева под закалку составляла 450°C, выдержка при этой температуре 2 ч, охлаждение в масле. Старение проводили при температуре 120°C в течении 5 ч.

Механические испытания на растяжение плоских образцов с размером рабочей части 1,5×3×6 мм проводили на универсальной испытательной машине «Instron 5882». По результатам испытания образцов при комнатной и повышенных температурах оценивали предел текучести ($\sigma_{0.2}$), предел прочности (σ_B) и относительное удлинение (δ) по методикам, описанным в ГОСТ 1497-84 и ГОСТ 9651-84, соответственно.

Испытания на циклическую трещиностойкость проводили на сервогидравлической испытательной машине «Instron 8801» на компактных образцах, подвергнутых РКУП, с толщиной 20 мм с боковой сквозной прорезью, согласно ASTM E647-95. Нагружение образцов осуществляли по синусоидальной форме цикла с частотой 5 Гц и коэффициентом асимметрии цикла $R=0,1$.

Испытания на усталость материала выполняли в условиях окружающей среды на машине RRMoore для усталостных испытаний, согласно ГОСТ 25.502-79. В качестве способа нагружения был использован консольный

изгиб с симметричным циклом нагружения и частотой нагружения 25 Гц. Использовали гладкие образцы круглого сечения Ø5 мм и длиной 40 мм.

Металлографический анализ осуществляли на оптическом микроскопе Olympus GX71 и растровом электронном микроскопе Quanta 200 3D. Тонкую микроструктуру сплава 1421 наблюдали в просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) JEM-2100. Фрактографические исследования, разориентировку границ зерен определяли с использованием растрового электронного микроскопа Quanta 200 3D с приставками для локального химического анализа и определения разориентировок для анализа картин микродифракции отраженных электронов.

ГЛАВА 3 СТРУКТУРА СПЛАВА ПОСЛЕ РКУП И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

В данной главе рассмотрено формирование микроструктуры в процессе РКУП и влияние последующей термической обработки (ТО) на структуру.

Пруток сплава 1421 в состоянии поставки имел неоднородную бимодальную микроструктуру, которая состояла из крупных нерекристаллизованных зерен со средним размером ~171 мкм в продольном и ~21 мкм в поперечном направлениях, вытянутых в направлении оси деформации, и расположенных по их границам мелких равноосных зерен размером ~5 мкм (рис. 1 (а)). Методом локального химического анализа и анализа параметров кристаллической решетки по дифракционным картинам было выявлено присутствие в исходной структуре частиц трех типов: S_1 -фазы (Al_2LiMg), фазы $Al_3(Sc,Zr)$ (рис. 1 (б)) и δ' -фаза (Al_3Li) (рис. 1 (в)). Частицы S_1 - фазы имеют форму пластин размером ~0,7 мкм в продольном и ~0,3 мкм в поперечном направлении. Дисперсные частицы $Al_3(Sc,Zr)$ имеют равноосную форму и средний размер ~20 нм.

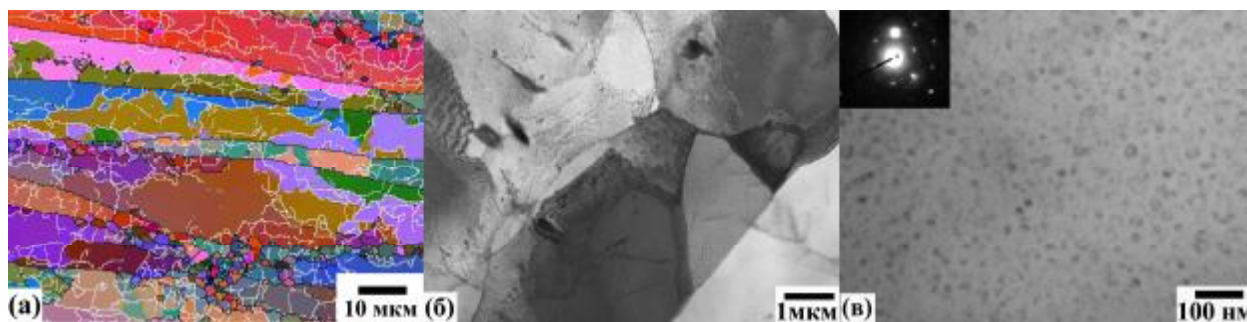


Рисунок 1 - Микроструктура сплава 1421 в состоянии поставки

Микроструктурные исследования показали, что в результате РКУП при температуре 325°C после 2 проходов в материале формируется частично рекристаллизованная структура, занимающая ~20% объема материала (рис. 2 (а)). Рекристаллизованные зерна имеют равноосную форму и средний размер ~2,9 мкм, удельная доля высокоугловых границ (ВУГ) составляет ~48%, средний угол разориентировки – 21°. После ТО объем

рекристаллизованной структуры достигает ~30% со средним размером рекристаллизованных зерен ~3,2 мкм (рис. 2 (б)). При этом средний угол разориентировки и удельная доля ВУГ составляет 19° и 43%, соответственно. Объемная доля S_1 -фазы (Al_2LiMg) составляет 5%. Отметим, что строчечные выделения S_1 -фазы наблюдаются по высокоугловым границам зерен в направлении под углом 45° к оси прессования. Высокая плотность дисперсных выделений δ' - фазы (Al_3Li), со средним размером 6 нм, была обнаружена внутри зерен методом анализа изображения ПЭМ в темном поле.

С увеличением количества проходов РКУП до четырех доля ВУГ составляет ~71%, средний угол разориентировки - 30°. Объем рекристаллизованной структуры достигает ~75%, при среднем размере зерна 1 мкм (рис. 2 (в)). Средний размер рекристаллизованных зерен после ТО равен 1,6 мкм (рис. 2 (г)). Удельная доля ВУГ составляет ~79%, средний угол разориентировки границ – 33°. Наблюдается существенное увеличение объемной доли S_1 -фазы до 12%, объемная доля упрочняющей δ' - фазы была незначительна.

В результате РКУП до 8 проходов сплава 1421 при температуре 325°С увеличивается однородность микроструктуры (рис. 2 (д)), при этом размер зерен не изменяется (2 мкм). Доля ВУГ достигает ~75%; средний угол разориентировки границ 32°. Объемная доля рекристаллизованной структуры после РКУП с последующей ТО составляет ~68% со средним размером зерна 1,7 мкм (рис. 2 (е)), удельная доля ВУГ ~70%. Средний угол разориентировки - 29°. Имеет место увеличение объемной доли S_1 -фазы до 18%, при этом выделений δ' - фазы не наблюдается.

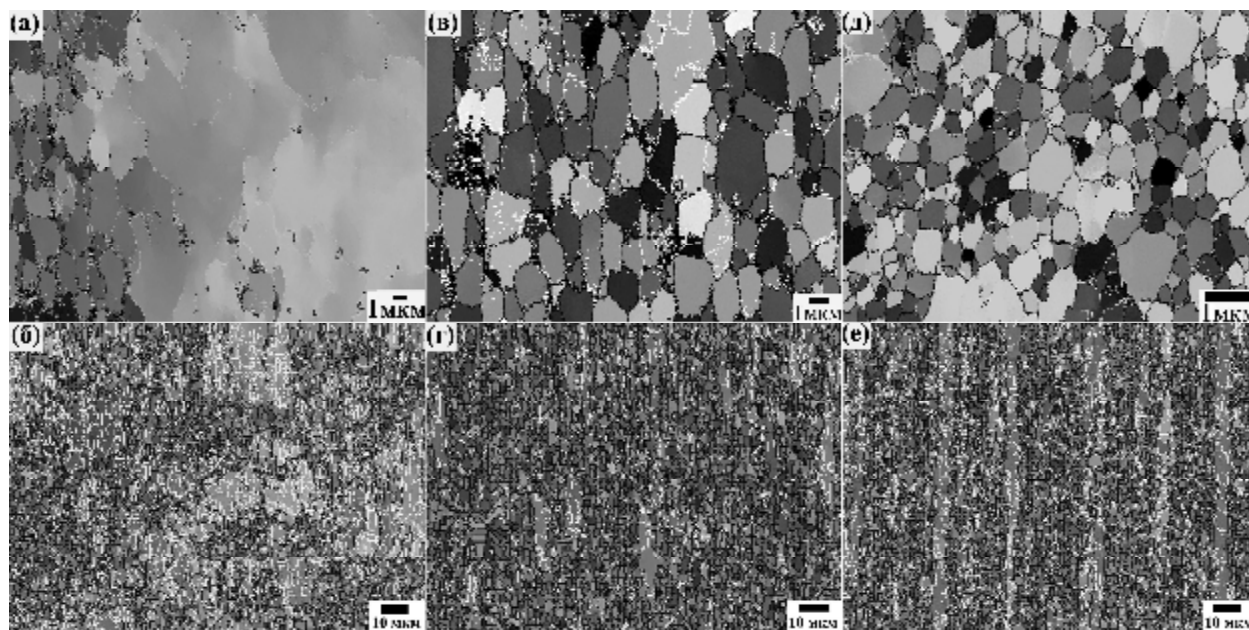


Рисунок 2 - Микроструктура сплава 1421 после РКУП а – $\varepsilon=2,3$;
в – $\varepsilon=4,6$; д - $\varepsilon=9,2$ после РКУП и последующей ТО б – $\varepsilon=2,3$; г – $\varepsilon=4,6$;
е – $\varepsilon=9,2$

Исследование микроструктурных изменений, развивающихся в сплаве 1421, показало, что при маршруте D до 2 проходов наблюдалась высокая неоднородность распределения мелких зерен по сечению заготовки. РКУП заготовок типа плита из сплава 1421 по маршруту D до 4 проходов при $T=325^{\circ}\text{C}$ показало, что при данном маршруте за меньшее количество проходов РКУП формируется более однородная по сечению заготовки мелкозернистая структура с размером и объемной долей мелких зерен $\sim 1,6$ мкм и 75%, соответственно. После РКУП до 8 проходов средний размер зерен не изменяется и остается на уровне $\sim 1,7$ мкм.

Нагрев до температуры закалки ($T=450^{\circ}\text{C}$) не оказывает заметного влияния на деформированную структуру сплава 1421, сформировавшуюся в процессе РКУП. Формирование ультрамелкозернистой структуры (~ 1 мкм) в сплаве 1421 РКУП изменяет характер старения. При температуре старения 120°C происходит гетерогенная коагуляция крупных частиц стабильной S_1 -фазы (Al_2LiMg) по высокоугловым границам зерен, с увеличением времени старения происходит увеличение объемной доли S_1 -фазы за счет растворения упрочняющей δ' -фазы. Увеличение количества проходов РКУП приводит к увеличению удельного объема S_1 -фазы при старении. Это связано с тем, что эту фазу полностью не удастся растворить при закалке. Соответственно, метастабильная по отношению к ней δ' -фаза, если и успеет выделиться при старении, неминуемо будет растворяться с увеличением времени старения. Для получения максимального дисперсионного упрочнения при старении целесообразно получать УМЗ структуру в сплавах системы Al-Li-Mg-Sc-Zr с содержанием магния не выше 4,5%, что обеспечивает полное растворение S_1 -фазы при нагреве под закалку до 450°C .

ГЛАВА 4 МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА Al-Li-Mg СПЛАВА, ПОДВЕРГНУТОГО РКУП

В данной главе приводятся результаты исследований механических свойств прессованных заготовок из сплава 1421 с УМЗ структурой при статическом и циклическом нагружении. Рассматривается природа усталостного разрушения образцов сплава 1421, подвергнутых РКУП.

Сравнение диаграмм растяжения при комнатной температуре образцов сплава 1421, подвергнутых РКУП с последующей ТО, показывает, что инженерные кривые напряжение-степень деформации после РКУП до 2 и 4 проходов совпадают, однако пластичность материала после РКУП до 4 проходов больше на 4-6%. Видно, что деформация сопровождается упрочнением, но после РКУП до 8 проходов скорость упрочнения падает быстрее.

Результаты оценки параметров прочности и пластичности сплава 1421, после РКУП с последующей ТО, приведены в таблице 2. Следует отметить, что на прочностные свойства УМЗ материалов влияет не только средний размер зерна, но, главным образом, природа, размер и распределение дисперсных частиц. В сплаве 1421 пластинчатые выделения фазы Al_2LiMg , формирующиеся главным образом на границах зерен, снижают эффект

старения. По мере развития процессов старения эти частицы растут, упрочняющая δ' - фаза, когерентные частицы которой однородно распределены в теле зерен, растворяются, что и приводит к падению прочности. Высокая прочность достигается в том случае, если по объему зерен гомогенно выделяется δ' - фаза с когерентными границами.

Таблица 2 – Механические свойства сплава 1421 после РКУП и последующей ТО при комнатной температуре

Состояние сплава 1421	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
Состояние поставки + ТО	400	522	14
РКУП 2 прохода + ТО	329	480	11
РКУП 4 прохода + ТО	371	483	15
РКУП 8 проходов + ТО	314	398	16

Сплав, деформированный до 2 проходов, демонстрирует более низкие показатели прочности и пластичности, чем после 4 проходов, так как структура сплава состоит из более крупных зерен и содержит строчечные скопления S_1 -фазы, расположенные под углом 45° к оси растяжения, то есть они совпадают с направлением действия максимальных сдвиговых напряжений. Понижение прочностных характеристик сплава после РКУП до 8 проходов связано с увеличением объемной доли S_1 -фазы.

Показано, что сплав после 4 проходов демонстрирует наиболее высокие механические свойства. По всей видимости, это связано с оптимальным сочетанием структурного упрочнения, связанного с размером зерен, и дисперсионного упрочнения, связанного, главным образом, с когерентными частицами δ' - фазы в теле зерен.

Известно, что ультрамелкозернистая структура позволяет повышать динамические свойства. На рисунке 2 показана кривая усталости исследуемого сплава 1421 с УМЗ структурой. Количество циклов до разрушения линейно уменьшается с увеличением амплитуды напряжений. Ввиду отсутствия на кривой усталости горизонтального участка, что характерно для многих цветных металлов и сплавов, ограниченный предел выносливости исследуемого сплава определяли на базе 10^7 циклов. Циклическая прочность сплава при числе циклов 10^7 составила 185 МПа.

Критический коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} был вычислен по результатам статических испытаний образцов, подвергнутых РКУП до степени деформации $\sim 4,6$, с усталостной трещиной, и составил $22,7 \text{ МПа} \times \text{м}^{1/2}$. В сплаве 1421 были достигнуты механические свойства $\sigma_{0,2}=371 \text{ МПа}$ и $\sigma_B=483 \text{ МПа}$, в то время как в сплаве 1420 близком по химическому составу предел текучести значительно ниже и составил $\sigma_{0,2}=280 \text{ МПа}$, тогда как значения предела прочности $\sigma_B=460 \text{ МПа}$ и $K_{IC}=25 \text{ МПа} \times \text{м}^{1/2}$ существенно не изменились.

На изломе плоского прямоугольного образца с краевой трещиной видны концентрические линии, характерные для усталостного разрушения. Эти данные подтверждаются фрактографией, представленной на рисунке 4. В сплаве 1421 усталостная трещина распространяется в основном межзеренно с отдельными участками вязкого разрушения. Зарождение множества трещин, на образцах после 4 проходов РКУП, происходит также на крупных частицах первичной фазы $Al_3(Sc, Zr)$.

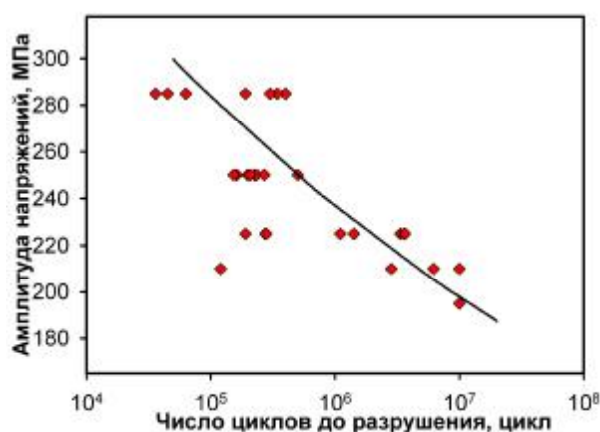


Рисунок 3 – S-N кривая после РКУП сплава 1421

Морфология изломов свидетельствует об интеркристаллитном характере разрушения материала, на это указывает фасеточный вид излома с размером фасеток близком к размеру зерен. Усталостная трещина постепенно перестает чувствовать границы зерен. Это подтверждает структурно-нечувствительный характер ее распространения по отношению к размеру зерна на стадии линейного роста.

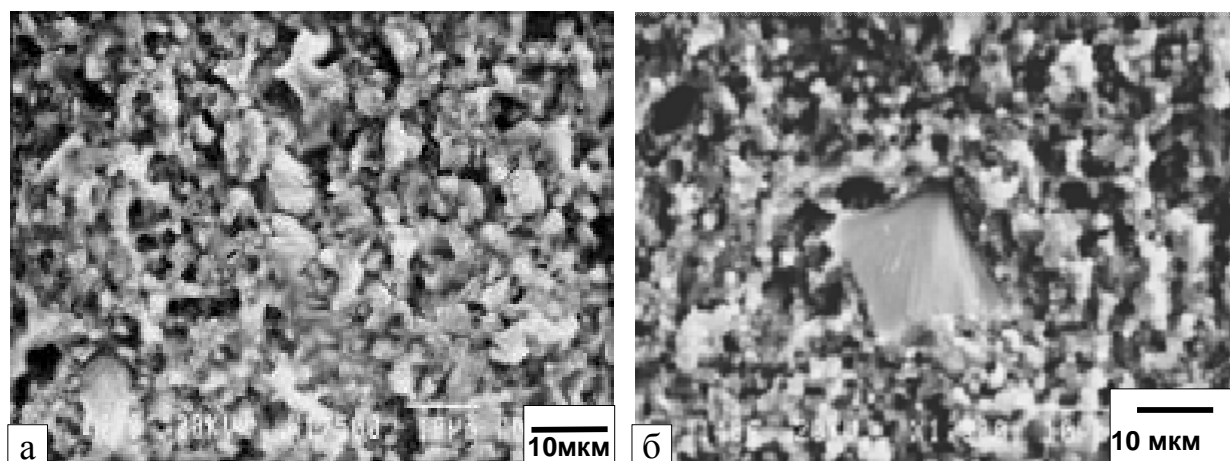


Рисунок 4 – Фрактография усталостного разрушения образцов после 4 проходов РКУП

Результаты данного исследования показывают, что интеркристаллитное разрушение образцов имеет место при малых величинах коэффициента интенсивности напряжений и сопровождается слабой извилистостью пути усталостной трещины. Это обуславливает меньшее сопротивление росту усталостной трещины. При высоких значениях коэффициента интенсивности напряжений происходит смешанный тип разрушения. Из фрактографии видно наличие небольшого количества нерекристаллизованных областей, на которых происходит переход от интеркристаллитного к транскристаллитному усталостному разрушению. Однако основным механизмом является межкристаллитное разрушение. Размеры бороздок приблизительно коррелируют с размерами нерекристаллизованных областей. Наличие грубых первичных частиц также способствует хрупкому разрушению.

ГЛАВА 5 ПОЛУЧЕНИЕ СВЕРХПЛАСТИЧНЫХ ЛИСТОВ ИЗ Al-Li-Mg СПЛАВА И ИХ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

В данной главе рассмотрено влияние УМЗ структуры, сформированной РКУП и последующей изотермической прокаткой (ИП) на сверхпластические характеристики сплава 1421. Оценены механические свойства при комнатной и повышенных температурах листовых заготовок из сплава 1421, полученных РКУП и последующей ИП. Показано, что изотермическая прокатка при выбранных температурно-деформационных параметрах не только сохраняет сформированную при РКУП мелкозернистую структуру, но и делает ее распределение по объему сплава более равномерным.

Сочетание РКУП до степени деформации $\varepsilon \sim 2,3$ с последующей ИП обеспечивает формирование частично рекристаллизованной структуры (рис. 5 (а)), занимающей 77% объема материала. Рекристаллизованные зерна имеют равноосную форму и средний размер 1,6 мкм, удельная доля высокоугловых границ (ВУГ) составляет 59%, удельная доля кристаллитов, со всех сторон окруженных ВУГ, $\sim 30\%$, малоугловыми границами (МУГ) $\sim 12\%$. Удельный объем кристаллитов, окруженных как ВУГ, так МУГ, наибольший (58%). Средний угол разориентировки равен 25° .

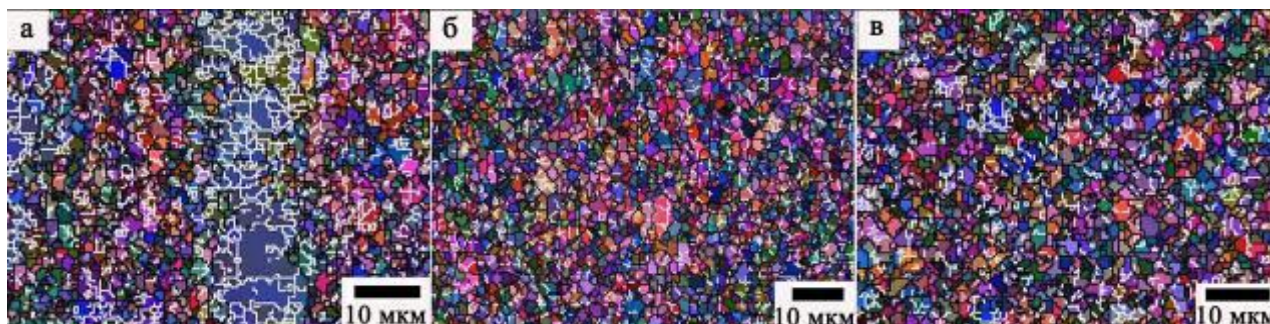


Рисунок 5 – Микроструктура листов сплава 1421 в состоянии I – а, в состоянии II – б, в состоянии III – в

Из рисунка 5 (б) видно, что РКУП до 4 проходов и последующая ИП приводят к увеличению однородности зеренной структуры. Объем рекристаллизованной структуры достигает 93%, при среднем размере зерна 1,3 мкм. ВУГ занимают 78% объема материала, удельная доля кристаллитов, со всех сторон окруженных ВУГ, составляет 50%, тогда как доля кристаллитов с МУГ не превышает 1%. То есть, зерна, окруженные ВУГ, составляют большинство. Средний угол разориентировки равен 32°.

С увеличением степени деформации РКУП до $\varepsilon \sim 9,2$ с последующей ИП средний размер зерен практически не изменяется (1,6 мкм), так же, как и доли зерен, полностью окруженных ВУГ и МУГ, составляющие 51% и 2%, соответственно (рис. 5 (в)). Средний угол разориентировки границ зерен достигает 36°, объемная доля ВУГ 85%. Стоит отметить, что доля ВУГ в состоянии III, такая же, как в сплаве, деформированном традиционным РКУП до 16 проходов при той же температуре.

Изучение сверхпластичных свойств листов сплава 1421 с различными структурами показало, что все состояния демонстрируют высокие характеристики сверхпластичности. При температуре 350°C и начальной скорости деформации $\dot{\varepsilon} = 1,4 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ относительные удлинения составляют ~871%, 1481%, 1079% в состояниях I, II и III сплава 1421, соответственно (рис. 6 (а)). Максимальное удлинение до разрушения 2700% наблюдалось в состоянии III сплава 1421 при температуре 450°C и скорости деформации $\dot{\varepsilon} = 1,4 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ (рис. 6 (б)). Стоит отметить, что в сплаве, подвергнутом РКУП с прямоугольной формой каналов (рис. 6 (в)) стадии установившегося течения не наблюдалось. При низких температурах и высоких скоростях деформации, после достижения максимума, напряжение течения непрерывно уменьшается вплоть до момента разрушения. Разрушение этих образцов происходит из-за неустановившегося пластического течения. Увеличение температуры или понижение скорости деформации приводит к уменьшению стадии установившегося пластического течения.

Хотя показатели относительного удлинения листов сплава 1421 при температуре 350°C во всех трех состояниях ниже, чем в этом же сплаве, подвергнутом РКУП до 16 проходов, в котором относительное удлинение достигает 1700% при тех же условиях испытаний, относительное удлинение образцов листов во всех трех состояниях превышает 600%, что достаточно для промышленной пневмоформовки. Таким образом, ИП после РКУП обеспечивает необходимые сверхпластические свойства, несмотря на существенное уменьшение количества проходов при РКУП.

На кривой σ - ε (рис. 6 (а)) максимальное значение напряжения течения в состоянии I достигается после небольших степеней деформации; интенсивное разупрочнение материала начинается сразу после пика напряжений течения; установившаяся стадия пластического течения при температуре испытания 350°C не наблюдается.

Следует отметить, что величина коэффициента скоростной чувствительности m примерно одинакова для всех трех состояний листов (рис. 5 (а)). Известно, что равномерное сверхпластическое течение

обеспечивается как скоростной чувствительностью напряжений течения, так и деформационным упрочнением. В принципе, величина $m \sim 0.4$ должна обеспечивать достаточную однородность сверхпластического течения листов в состоянии I. Однако интенсивное разупрочнение приводит к тому, что в результате локализации пластического течения происходит разрушение. То есть, данный материал демонстрирует не совсем стабильное сверхпластическое течение, которое приемлемо для пневмоформовки, но приведет к разнотолщинности.

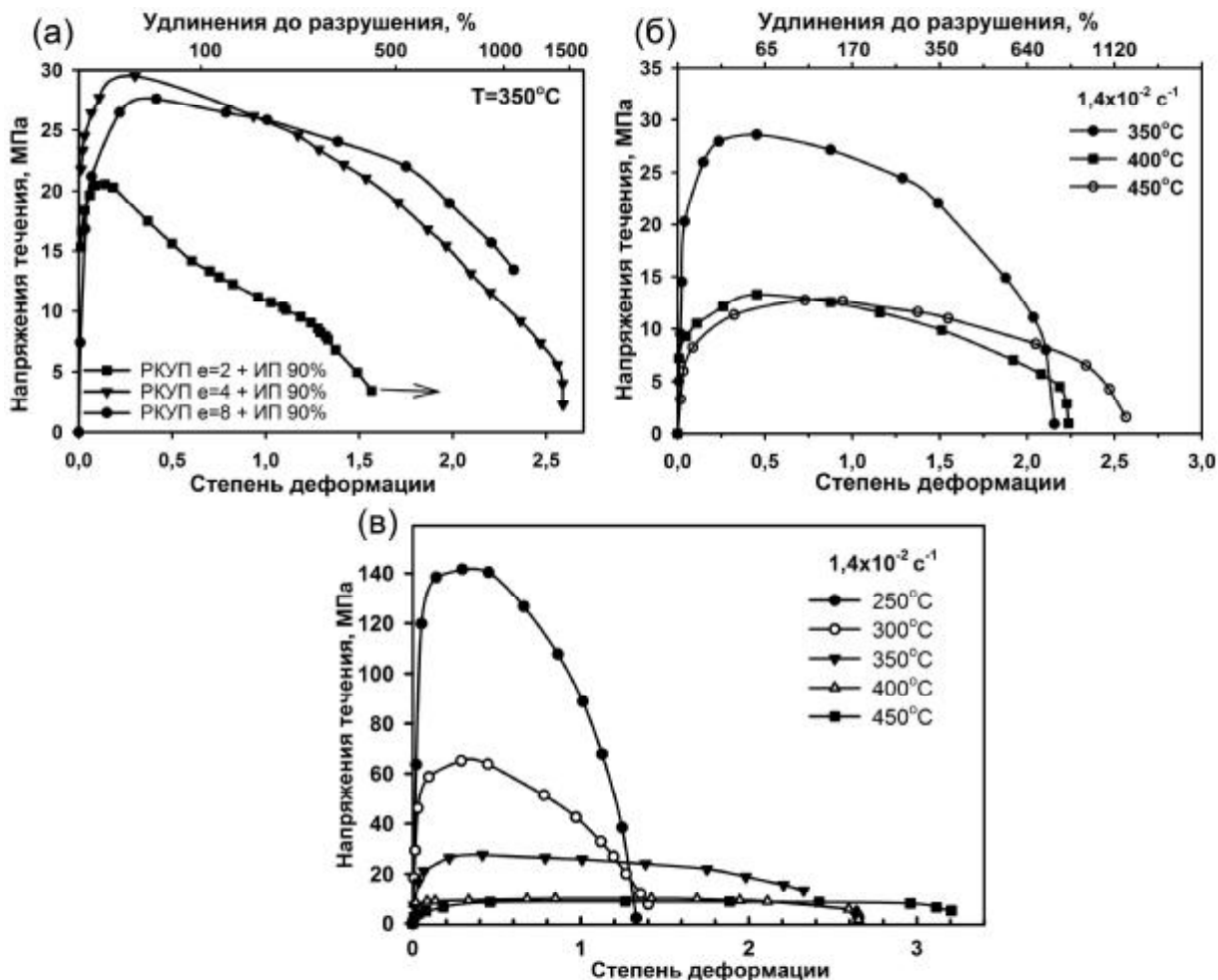


Рисунок 6 – Диаграммы растяжения образцов сплава 1421 при постоянной скорости деформации $1,4 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$: (а) - при температуре 350°C, (б) - состояние III при разных температурах испытания, (в) – после 8 проходов РКУП

Листы в состоянии II и III, напротив, демонстрируют ярко выраженное деформационное упрочнение до степеней деформации $\epsilon \sim 0,4$ (Рис. 6 (а)). После достижения максимума, пластическое течение тоже не переходит на установившуюся стадию; имеет место небольшое разупрочнение вплоть до степеней деформации $\geq 1,5$ (Рис. 6 (а)). После этого начинается интенсивное разупрочнение материала. Следует отметить, высокий коэффициент скоростной чувствительности обеспечивает высокую устойчивость материала против образования шейки, и, тем самым, достигаются большие

относительные удлинения. Однако зависимость коэффициента m от степени деформации для состояний II и III при больших степенях различна (Рис. 7). В состоянии II наблюдается рост коэффициента m , а в состоянии III его катастрофическое падение. В обоих состояниях сплава 1421 листы демонстрируют устойчивость против локализации сверхпластической деформации. Однако, равномерность сверхпластической деформации в состоянии II существенно выше. Можно прогнозировать, что использование листов сплава 1421 в состоянии II обеспечит минимальную разнотолщинность при пневмоформовке. Именно увеличение коэффициента m в состоянии II при больших степенях деформации обеспечивает достижение максимального удлинения.

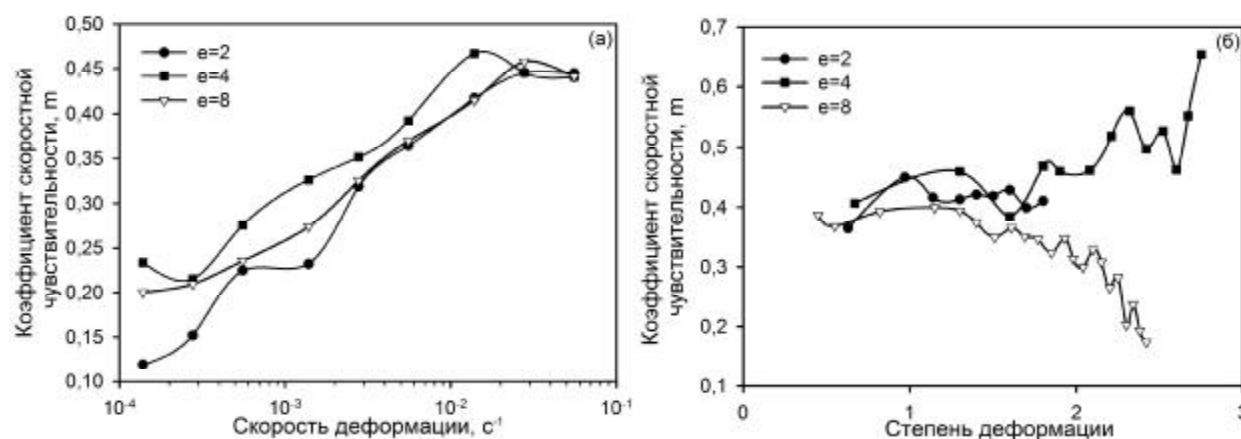


Рисунок 7 – Влияние скорости деформации на коэффициент скоростной чувствительности (а) и влияние степени деформации на коэффициент скоростной чувствительности листов в различных состояниях (б)

Листы во всех трех состояниях сплава 1421 демонстрируют низкотемпературную сверхпластичность, разница в скоростях деформации, при которых достигаются максимальные величины m и δ несущественны. Из анализа рис. 5а видно, что пневмоформовку всех трех типов листов этого сплава следует вести при температуре 350°C и скорости деформации $\dot{\epsilon}=1,4 \times 10^{-2} \text{ c}^{-1}$, которая практически совпадает с максимально возможной по техническим условиям скоростью сверхпластической пневмоформовки.

Необходимым условием достижения сверхвысоких удлинений в сплаве 1421 является формирование однородной микроструктуры, которая может быть получена в процессе РКУП и последующей ИП. Структура, состоящая из равноосных зерен, обеспечивает аккомодацию зернограницного проскальзывания, и, как следствие, высокие значения коэффициента скоростной чувствительности и, соответственно, высокие сверхпластические удлинения. Для достижения максимальных характеристик сверхпластичности для сплавов системы Al-Li помимо формирования УМЗ структуры важна ее однородность. Из полученных данных следует, что наиболее однородная структура формируется в состоянии II.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1 РКУП до степени деформации $\varepsilon \sim 4,6$ алюминиевого сплава 1421 при температуре 325°C обеспечивает образование УМЗ структуры. Присутствующие в сплаве когерентные $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ частицы предотвращают интенсивное переползание и аннигиляцию дислокаций, а также миграцию границ зерен и тем самым обеспечивают высокую термическую стабильность формирующейся структуры при нагреве под закалку.

2 Установлено, что формирование УМЗ структуры в сплаве 1421 методом РКУП меняет характер старения. Старение при $T=120^\circ\text{C}$ сопровождается гетерогенной коагуляцией крупных частиц стабильной S_1 -фазы (Al_2LiMg) по высокоугловым границам зерен. Увеличение степени деформации при РКУП приводит к росту объемной доли S_1 -фазы за счет растворения упрочняющей δ' -фазы. Это связано с тем, что при нагреве под закалку до 450°C в сплаве 1421 с высоким содержанием магния ($>4,5\%$) не удается полностью растворить S_1 -фазу.

3 РКУП при температуре 325°C по маршруту D до 4 проходов позволяет сформировать в массивных заготовках сплава 1421 однородную УМЗ структуру с размером и объемной долей мелких зерен $\sim 1,6$ мкм и $\sim 70\%$, соответственно.

4 РКУП до степени деформации $\sim 4,6$ способствует существенному повышению пластичности исходно горячепрессованного сплава 1421. Относительное удлинение возрастает от 20 до 30%, предел прочности при этом сохраняется на уровне 400 МПа. Последующая термообработка приводит к повышению предела прочности до 480 МПа.

5 Получение ультрамелкозернистой структуры методом РКУП не приводит к существенному улучшению усталостных свойств алюминиевого сплава 1421 по сравнению с относительно крупнозернистой микроструктурой, полученной после традиционного горячего прессования.

6 Стабилизация значений вязкости разрушения достигается путем использования полуфабрикатов с полностью рекристаллизованной структурой. Критический коэффициент интенсивности напряжений сплава с полностью рекристаллизованной структурой составляет $\sim 22,7 \text{ МПа} \times \text{м}^{1/2}$.

7 Сочетание РКУП с небольшим числом проходов (4) с последующей ИП позволяет изготавливать из алюминиевого сплава 1421 тонкие листы с однородной УМЗ структурой, которые демонстрируют рекордные характеристики сверхпластичности $\sim 1481\%$ при температуре 350°C .

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Могучева, А.А. «Структура и свойства алюминиевого сплава 1421 после РКУ прессования и изотермической прокатки» / А.А. Могучева, Р.О. Кайбышев // Физика металлов и металловедение. – 2008. – Т.106, №4. – С. 1-10.

2. Могучева, А.А. «Сверхвысокие сверхпластические удлинения в сплаве алюминий-литий» / А.А. Могучева, Р.О. Кайбышев // Доклады Академии наук. – 2008. Т. 421, №4. -С. 1-3.

3. Mogucheva, A. Effect of Intense Plastic Straining and Subsequent Heat Treatment on Mechanical Properties of an Al-Li-Mg-Sc-Zr Alloy / A. Mogucheva, R. Kaibyshev // Advanced Materials Research. – 2010. - Vols. 89-91, - pp 389-394.

4. Могучева, А.А. «Влияние микроструктуры на прочность промышленного алюминиевого сплава 1421» / А.А. Могучева, Р.О. Кайбышев // XVIII Петербургские чтения по проблемам прочности и роста кристаллов: сборник материалов, 21-24 октября 2008 г. / СПб. - г. Санкт-Петербург, 2008. - С. 259-260.

5. Могучева, А.А. Сверхпластичность в нанофазном алюминиевом сплаве системы Al-Li-Mg с ультрамелкозернистой структуре / А.А. Могучева, Р.О. Кайбышев // Всероссийская школа - семинар "Функциональные и конструкционные наноматериалы": Сборник материалов, 8 – 15 ноября 2008 г. / БелГУ. - Белгород. - С. 68-69.

6. Могучева, А.А. Влияние структуры на свойства алюминиевого сплава 1421, подвергнутого равноканальному угловому прессованию / А.А. Могучева // Всероссийская молодежная – школа конференция «Современные проблемы металловедения»: Сборник трудов, 18-22 мая, 2009 г. / МИСиС. - Пицунда, Абхазия, 2009. - С.184-190.

7. Могучева, А.А. Сверхпластичность алюминиевого сплава 1421, подвергнутого интенсивной пластической деформации / А.А. Могучева // Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы металловедения сплавов цветных металлов»: Сборник научных трудов, 1-2 октября 2009 г. / МИСиС. - Москва, 2009. С.124-128.

8. Могучева, А.А. Влияние структуры на механические свойства сплава 1421 / А.А. Могучева // Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодежи «Проведение научных исследований в области индустрии наносистем материалов»: материалы, 16-20 ноября 2009 г. / БелГУ. - Белгород, 2009. – С.278-280.

Подписано в печать 18.05.2010. Гарнитура Times New Roman.

Формат 60×84/16. Усл. п. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 91.

Оригинал-макет подготовлен и тиражирован в издательстве

Белгородского государственного университета

308015, г. Белгород, ул. Победы, 85

