УТВЕРЖДАЮ
Директор ИПСМ РАН
_____ Р.М. Имаев
«22» 11 2022 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Эсмаили Гайумабади Маджида
«Формирование микрозеренной структуры и сверхпластичного состояния в сплавах системы Al-Mg-Si, легированных переходными металлами»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.6.1 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

Актуальность работы

Разработка новых конструкционных материалов, как и новых технологий их получения и обработки, не теряет актуальности в связи с постоянно растущими потребностями в повышении эффективности и снижении себестоимости выпуска промышленной продукции. Большинству из озвученных критериев соответствует сверхпластическая формовка. Известно, что для такой формовки алюминиевых изделий в промышленности преимущественно используются листы из сплавов на основе двух систем - Al-Mg и Al-Zn-Mg. При этом большинство сплавов первой группы, такие как 1560, и 5083, демонстрируют сравнительно невысокие прочностные свойства и средние параметры сверхпластичности. А высокопрочные сплавы второй группы такие, как 7475 и В95, для реализации высокопрочного состояния требуют после формовки проведения финальной упрочняющей термообработки - закалки и старения, что зачастую приводит к незапланированному изменению геометрии изделий. Перспективными, с точки зрения себестоимости получаемых изделий, в том числе и за счет низкого содержания легирующих элементов и снижения доли брака при минимизации коробления, являются листы из сплавов, способных к фиксации пересыщенного алюминиевого твердого раствора при охлаждении на воздухе. К ним относятся авиали - низколегированные термоупрочняемые сплавы системы Al-Mg-Si. Однако, помимо низкой прочности, для этих сплавов характерна низкая термическая стабильность структуры и, как следствие, демонстрация ими слабого эффекта сверхпластичности. Многообещающим подходом представляется введение в авиали ряда переходных/редкоземельных металлов,

способствующих измельчению и стабилизации зерен. В связи с этим, диссертационная работа Эсмаили Г.М. представляется актуальной и практически значимой.

Структура и основное содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов по главам, общих выводов и списка литературы. Объем работы: 108 страниц, включая 56 рисунков и 6 таблиц. Список литературы содержит 194 наименования. Информация, приведенная в автореферате, соответствует основному содержанию диссертации и дает полное представление о её научных положениях, результатах и основных выводах.

По материалам диссертации опубликованы 3 статьи из списка ВАК (в высокорейтинговых научных журналах из базы Web of Science/Scopus). Материал диссертации докладывался на международном форуме молодых ученых.

Во **введении** автор обосновывает актуальность темы диссертационной работы, формулирует ее цели и задачи, описывает научную новизну, указывает практическую значимость полученных результатов, приводит основные положения, выносимые на защиту, а также методологию исследований и личный вклад автора.

В **первой главе** представлен аналитический обзор литературы по теме исследования. Определена проблематика, описаны уровень и достижения современных исследований, приведены сделанные по ним основные заключения. Обсуждены достижения работ на сплавах 6ххх серии, особенности их структурного и механического поведения в зависимости от состава и условий деформирования в состоянии сверхпластичности, а также после упрочняющей термообработки.

Во **второй главе** подробно описаны методы проведенных экспериментов, в том числе получения объектов исследования и изучения их микроструктурного, механического и коррозионного поведения. Представлены режимы получения и обработки сплавов, краткое описание исследовательского оборудования, и особенности выполнения экспериментов.

В **третьей главе** приведены данные качественного и количественного анализа фазового состава и микроструктуры сплавов на всех этапах получения листов. Проанализированы изменения твердости литых сплавов в результате отжига, обоснован выбор режимов двухступенчатой гомогенизации. Определен круг легирующих элементов и установлен эффект их введения на фазовый состав и размеры его составляющих до и после гомогенизации.

В **четвертой главе** проанализированы кривые растяжения в широком температурно-скоростном диапазоне, определены показатели сверхпластичности сплавов

в зависимости от состава. Прослежена эволюция микроструктуры, представлены результаты оценки параметров статической прочности при комнатной температуре, а также сопротивления коррозии.

В **заключении** диссертационной работы сформулированы шесть основных выводов.

Диссертация является законченной работой, обобщившей результаты, полученные лично автором или в соавторстве. Развитие изученных в работе подходов может быть в дальнейшем реализовано в рамках научно-исследовательских работ НИТУ «МИСиС», ИМЕТ РАН, ОАО «ВИЛС», НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, а также промышленных предприятий Русал, АО Арконик СМЗ.

Достоверность полученных результатов и их обоснованность обеспечены большим объемом выполненных экспериментов с применением широкого спектра современного оборудования и аттестованных методов анализа, воспроизводимостью результатов, а также необходимой статистической выборкой данных.

Замечания по диссертационной работе:

1. В тексте автореферата и диссертации отмечается много неточностей, описок и орфографических ошибок. Вероятно, это связано с трудностями изложения материала иностранным автором на русском языке. Неточности начинаются с названия работы. Вследствие того, что вся работа построена на одном базовом сплаве не тройной, а четвертной системы Al-Mg-Si-Cu, то правильнее было бы ее и указать.
2. Обозначения на рисунках выполнены на английском языке (латиницей), а подписи к рисункам - то на русском (кириллицей), то на английском, как и ссылки на рисунки по тексту, что зачастую затрудняет их правильную трактовку и анализ. В подписях нескольких рисунков в реферате и диссертации перепутаны обозначения фаз и сплавов. Например, на рис. 33 диссертации и рис. 4 реферата «Светло-серые частицы Al_9FeNi (A-типа)» и «Темные частицы Mg_2Si (B-типа)» указаны с точностью до наоборот; на рис. 52c и рис. 55a диссертации, а также 11c и 13a автореферата структуру разных сплавов иллюстрирует одно и то же изображение.
3. Есть досадные пропуски. Так в оглавлении диссертации пропущены некоторые разделы, например, Глава 1, пункт 1.3. В автореферате пропущен рис. 10. Отсутствует расшифровка нескольких изображений, приведенных как в реферате, так и диссертации, например, рис. 11d,e,f в автореферате и рис. 52 d,e,f в диссертации.

4. Для обозначения одних и тех же процессов и характеристик структуры использованы разные термины, как и есть неточности в использовании общепринятых терминов. Например, термомеханическая и термодеформационная обработка; микрозернистая и мелкозеренная структура; частично рекристаллизованная и частично нерекристаллизованная структура, малоугловые границы зерен.

5. Положительное впечатление создает представленный список использованной литературы из почти двухсот работ. Однако при этом обзор литературы выполнен местами излишне лаконично и во многом однобоко, так как основан на подходах и цитировании преимущественно англоязычных публикаций ряда зарубежных ученых и руководителя. Незаслуженно забыта роль ушедших и здравствующих отечественных исследователей в области сверхпластичности, в том числе из МИСиС и ИПСМ РАН, как и ряда российских ученых из других научных и учебных заведений, являвшихся пионерами и остающимися лидерами в области исследования эффекта сверхпластичности.

6. К сожалению, в работе не анализировалось развитие пор в сплавах при сверхпластичности, хотя пористость является одним из основных факторов, определяющих ресурс их пластичности как при повышенных, так и комнатной температурах. Видимо именно с уменьшением порообразования при сверхпластичности следовало бы связать и обнаруженный автором положительный эффект снижения содержания Si на удлинения.

К наиболее важным и новым результатам работы, определяющим ее научный и практический уровень, считаем возможным отнести следующие:

Научная новизна

1. На примере сплава Al-1.2Mg-0.7Si-1.0Cu (% масс) показано, что для реализации высокоскоростной сверхпластичности (при скоростях деформации выше $5x10^{-3}$ c^{-1}) в сплавах системы Al-Mg-Si-Cu необходимо сформировать бимодальное распределение вторых фаз по размерам за счет введения переходных металлов, в том числе никеля и железа, что активизирует процессы измельчения зерен до и при сверхпластической деформации. При этом достаточным и эффективным является совместное введение железа и никеля в количестве, необходимом для образования грубых частиц фазы Al_9FeNi с объемной долей 4-5%.

2. Для формирования мелкозернистой структуры с наименьшим размером зерна и наилучшими показателями сверхпластичности сплава Al-1.2Mg-0.7Si-1.0Cu (% масс), в

том числе с добавками железа и никеля, оптимальным является одновременное введение Sc и Zr в соотношении 1 к 2, например 0.1 и 0.2 масс.%. Увеличение содержания скандия до 0.2 масс.% приводит к снижению относительного удлинения и смещению его максимума в сторону более высоких температур и низких скоростей деформации, что вызвано сдерживанием динамической рекристаллизации наноразмерными дисперсоидами $(Al,Si)_3(Sc,Zr)$.

3. Для сплава Al-1.2Mg-0.7Si-1.0Cu (% масс) с добавками Fe, Ni, Zr и Sc обнаружено, что уменьшение содержания кремния до 0.3 масс.% приводит к улучшению показателей сверхпластичности.

4. Установлено, что добавка в сплав Al-1.2Mg-0.7Si-1.0Cu (% масс) 0,5 масс.% Y одновременно со Sc и Zr усиливает модифицирующий эффект и заметно уменьшает размер литого зерна.

Практическая значимость

1. Показано, что для одновременного достижения сверхпластичности с удлинениями более 400% при скоростях выше 5×10^{-3} $с^{-1}$ и повышения прочности при комнатной температуре листов из сплавов системы Al-Mg-Si-Cu эффективным является совместное легирование дисперсиодообразующими элементами, например Zr и Sc в пределах 0.2-0.4 масс %, с формированием наноразмерных алюминидов фазы L12 размером ~10 нм, и эвтектикообразующими элементами, такими как Fe и Ni до 1% каждого, с формированием крупных микронных частиц кристаллизационного происхождения. Легирование никелем (без железа), иттрием и эрбием обеспечивает заявляемые показатели сверхпластичности, но снижает прочность сплава из-за формирования нерастворимых при гомогенизации фаз с основными легирующими элементами - медью и кремнием, обеспечивающими упрочняющий эффект при старении.

2. Предложен состав сплава на основе системы Al-Mg-Si-Cu (Al, 1.2% мас. Mg, 0.7% мас. Si, 1.0 мас. %. Cu, 1.0 % мас. Fe, 1.0 % мас. Ni, 0.2 мас. %. Zr, 0.1% мас. Sc) для производства листов с частично рекристаллизованной структурой, обеспечивающей сверхпластичное состояние в широком интервале температур (от 440 до 520°C) и при скоростях до 5×10^{-2} $с^{-1}$. При этом листы демонстрируют максимальные удлинения до 680% при температуре всего 440°C и скорости деформации 1×10^{-2} $с^{-1}$, что на два порядка выше, чем у промышленных сплавов этой системы. Кроме того, листы после закалки и старения демонстрируют пределы текучести и прочности 340 и 400 МПа, соответственно, относительное удлинение ~7% и удовлетворительное сопротивление коррозии.

Несмотря на представленные замечания, считаем, что основные положения, выносимые на защиту, обоснованы и достоверны. Замечания не снижают общее положительное впечатление от работы, ее уровень соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, установленным «Положением о порядке присуждения ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук в Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС», а ее автор Эсмаили Гайумабади Маджид достоин присуждения искомой ученой степени по специальности 2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Доклад Эсмаили Гайумабади Маджида по диссертационной работе был заслушан на научном семинаре ИПСМ РАН (протокол № 8 от 17.11.2022 г.) и получил одобрение участников семинара. Присутствовали 16 человек, из них докторов наук 4, кандидатов наук 7. Отмечена важность и перспективность проведенных исследований, а также соответствие объема и качества полученных результатов требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Маркушев Михаил Вячеславович
Доктор технических наук, с.н.с.
Главный научный сотрудник, заведующий лабораторией
«Материаловедение и технологии легких сплавов» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук

Докторская диссертация защищена в 2008 г.
по специальности Материаловедение (машиностроение)
Адрес организации: 450001 г. Уфа, ул. С. Халтурина 39 Институт проблем сверхпластичности металлов РАН (ИПСМ РАН)

Рабочий телефон: (347) 2823856
Адрес электронной почты: mvmark@imsp.ru

Я, Маркушев Михаил Вячеславович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, их дальнейшую обработку.

Подпись Маркушева М.В. удостоверяю
Начальник ОК Сосунина Г.П.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук
ОТДЕЛ КАДРОВ