

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Прокопенко Дениса Алексеевича

«Исследование влияния текстуры и фазового состава на анизотропию механических свойств сплавов системы Al-Cu-Li», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

Актуальность работы

Сплавы системы Al-Cu-Li обладают высокими показателями удельной прочности, а по удельной жесткости не имеют соперников среди всех алюминиевых сплавов. Однако использованию указанных преимуществ в значительной степени препятствует анизотропия механических свойств, которая для сплавов Al-Cu-Li выше, чем у всех остальных алюминиевых сплавов, при том, что текстуры у них почти не отличаются. Высокие прочностные характеристики в Al-Cu-Li сплавах обуславливает $T_1(Al_2CuLi)$ -фаза, которая дает эффект упрочнения в несколько раз выше, чем $\delta'(Al_3Li)$ фаза, поэтому основной особенностью Al-Cu-Li высокопрочных сплавов 3-го поколения являлось высокое отношение Cu/Li. Однако до сих пор неизвестно соотношение модулей упругости этих фаз, что не дает возможности вести целенаправленный поиск составов, обеспечивающих сбалансированный уровень их прочностных и упругих свойств. Необходимо отметить, что работ, посвященных анизотропии прочностных свойств отечественных Al-Cu-Li сплавов немного, а исследования анизотропии упругих свойств полностью отсутствуют.

Таким образом, диссертационная работа Прокопенко Д.А., направленная на исследование закономерностей формирования кристаллографической текстуры, фазового состава и анизотропии упругих и механических свойств сплавов Al-Cu-Li для повышения надежности их применения в авиационной технике несомненно является актуальной.

Общая характеристика работы

В диссертации исследовали текстуру, фазовый состав и анизотропию упругих и механических свойств в листах сплавов системы Al-Cu-Li 1441, В-1461 и В-1469 и сплавов В-1480 и В-1481 системы Al-Cu-Li-Ag. Показано, что в сплавах 1441, В-1461, В-1469 и В-1480 формируется выраженная текстура типа латуни, для которой характерно расположение самого прочного и жесткого для Al сплавов направления $\langle 111 \rangle$ в поперечном прокатке направлении, а наименее прочных жестких кристаллографических направлений в 45° направлении.

В диссертации применительно к тонким текстурированным листам с учетом неоднородности состава по толщине листов и по ориентировке кристаллитов усовершенствована методика количественного фазового анализа, основанная на измерении периода решетки твердого раствора. Для усреднения величина периодов решетки по толщине листа использовали сборные образцы, а ориентационную неоднородность учитывали с использованием полюсных плотностей в качестве весовых множителей. Эта методика позволила установить, что усредненная по трем направлениям в листе величина модуля Юнга пропорциональна суммарному количеству интерметаллидов δ' и T_1 -фаз. Впервые определены значения модуля Юнга интерметаллидов δ' и T_1 в сплавах системы Al-Cu-Li. В отличие от прочностных характеристик, которые существенно выше для T_1 -фазы величины модулей Юнга δ' - и T_1 -фаз близки и составляют 93–123 ГПа для δ' -фазы и 115-123 ГПа для T_1 -фазы.

Это очень важный результат, поскольку из-за существенно более высокой атомной доли лития по сравнению с медью в этих сплавах количество δ' -фазы существенно превосходит T_1 -фазу. Поэтому вклад лития в величину модуля Юнга существенно превосходит вклад меди. Это наиболее наглядно демонстрирует рис.3.7 и табл.3.15 диссертации, из которых видно, что увеличение содержания лития на 0,7% и снижение содержания меди на 2% в среднепрочном сплаве 1441 по сравнению с высокопрочным сплавом В-1469 приводит к увеличению количества интерметаллидов с 10 до 18%, а модуля Юнга (экспериментального) на 4ГПа. При этом, если не снижать количество меди, то повысится не только удельная жесткость, но и удельная прочность нового сплава. В любом случае следует ожидать, что в 4-м поколении сплавов Al-Cu-Li эти результаты будут использованы.

Научная новизна диссертационной работы Прокопенко Д.А. не вызывает сомнения и заключается в следующем:

1. Использование методики количественного фазового анализа показало, что интегральная величина модуля Юнга в листах сплавов системы Al-Cu-Li пропорциональна суммарному количеству интерметаллидов δ' (Al_3Li) и T_1 (Al_2CuLi), при этом основной вклад дает δ' -фаза.
2. Впервые определены значения модуля Юнга интерметаллидов в сплавах системы Al-Cu-Li, показано, что уникально высокие значения модуля Юнга сплавов системы Al-Cu-Li обусловлены большим количеством в них интерметаллидных фаз с более высокими упругими свойствами по сравнению с α -твердым раствором.
3. Для сплавов системы Al-Cu-Li найдена корреляция между отношением Cu и Li в атомных % и количеством интерметаллидных фаз, что дает возможность прогнозировать фазовый состав разрабатываемых Al-Cu-Li сплавов.

4. Сопоставление анизотропии, полученной расчетом из текстурных данных текстурной и экспериментом показало, что расчеты объясняют минимум прочности в 45°-ном направлении, но дают завышенные значения прочности для поперечного и заниженные для продольного направлений, что можно объяснить с позиций закона Холла-Петча, поскольку для продольных образцов эффективный размер зерна существенно меньше, а прочность выше, чем для поперечных образцов.

Рекомендации по практическому использованию основных результатов работы

1. Показано, что пределы текучести в долевом и поперечном направлениях сплава В-1480 значительно выше, чем для сплава, однако минимальные показатели для обоих сплавов равны (в 45°-ном направлении), что демонстрирует необходимость учета текстурного фактора и анизотропии при оценке прочности изделия и необходимость испытаний листов сплавов Al-Cu-Li в 45°-ном направлении.

2. В отличие от прочностных характеристик, которые существенно выше для T_1 -фазы величины модулей Юнга δ' - и T_1 -фаз, впервые оцененные в работе близки и составляют 93–123 ГПа для δ' -фазы и 115–123 ГПа для T_1 -фазы, что необходимо использовать при выборе составов новых сплавов системы Al-Cu-Li со сбалансированными упругими и прочностными свойствами.

Достоверность полученных результатов обеспечена использованием современного поверенного оборудования с лицензионным программным обеспечением, проведением испытаний в соответствии с ГОСТ, применением эффективных новых методических решений, а также использованием для интерпретации экспериментальных данных современных теоретических подходов.

Замечания

1. Несмотря на то, что одной из основных задач данного исследования является количественный анализ фазового состава, не приводится диаграмма состояния системы Al-Cu-Li, которая является базовой для выбранных алюминий-литиевых сплавов. В обзоре литературы этой диаграмме следовало уделить достаточное внимание, поскольку она определяет формирование ключевого тройного соединения Al_2CuLi (T_1).
2. В табл.2.1 следовало бы привести не только основные легирующие элементы исследованных сплавов, но также малые добавки и примеси (в частности, железа и кремния).

3. Поскольку выбранные алюминий-литиевые сплавы (1441, В-1461, В-1469, В-1480, В-1481) не входят в ГОСТ 4784-2019 (базовый для деформируемых алюминиевых сплавов), следовало бы указать нормативную документацию, определяющую их химический состав.
4. Требуется уточнения состав пересыщенного алюминиевого твердого раствора перед старением. Не ясно, полностью или частично в него вошли медь, литий и магний в процессе нагрева под закалку.
5. В разделе 1.6 (заключение по литературному обзору) указано, что повышенная анизотропия свойств сплавов с литием связана с большим количеством интерметаллидных фаз, однако при определении модулей Юнга интерметаллидов из данных об анизотропии модулей Юнга сплавов учитывалась только анизотропия твердого раствора, а интерметаллиды считали изотропными. В этом случае увеличение количества интерметаллидов должно наоборот снижать анизотропию.
6. Поскольку фазы δ' (Al_3Li) и T_1 (Al_2CuLi), на которые сфокусировано данное исследование, являются наноразмерными продуктами распада пересыщенного алюминиевого твердого раствора, следовало бы привести характерные структуры, полученные методом просвечивающей электронной микроскопии.
7. Структурные исследования, направленные на анализ зеренной структуры (в частности, на выявление степени рекристаллизации), также следовало бы привести более детально.
8. На рис.4.1, 5.5 и в табл.5.4 отсутствуют ошибки экспериментальных значений механических свойств.

Сделанные замечания не снижают научной и практической ценности диссертации и общей высокой оценки работы.

Диссертационная работа Прокопенко Дениса Алексеевича выполнена на высоком научно-техническом уровне. Она представляет собой самостоятельную законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены научно-обоснованные технические решения по совершенствованию методик количественных исследований закономерностей влияния кристаллографической текстуры и фазового состава на анизотропию упругих и механических свойств

сплавов системы Al–Cu–Li для повышения надежности их применения в изделиях авиационной техники.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на 6 международных научно-технических конференциях, опубликованы в 7 статьях в изданиях, входящих в перечень ВАК, из которых 3 в журналах, включенных в международные системы цитирования. Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.п. 9-16 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор Прокопенко Денис Алексеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

Официальный оппонент,
доктор технических наук, профессор,



Белов Николай Александрович

20.11.2025 г.

д.т.н., профессор, главный научный сотрудник кафедры обработки металлов давлением ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МИСИС»

Подпись Белова Н. А. удостоверяю

Тел.: +7-910-4765857

E-mail: belov.na@misis.ru

Адрес организации: 119049, г. Москва, Ленинский пр., д. 4

