



САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY

УТВЕРЖДАЮ

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»

И.о. ректора Самарского университета
к.э.н., доцент

Д.Е. Пашков

ул. Московское шоссе, д. 34, г. Самара, 443086
Тел.: +7 (846) 335-18-26, факс: +7 (846) 335-18-36
Сайт: www.ssau.ru, e-mail: ssau@ssau.ru
ОКПО 02068410, ОГРН 1026301168310,
ИНН 6316000632, КПП 631601001



11 2025 г.

104-6415 № 20.11.2025

На № _____ от _____

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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 темы диссертации

Одним из основных направлений снижения веса конструкций изделий авиакосмической техники является применение алюминий-литиевых сплавов, которые обладают уникальными характеристиками прочности, жесткости и вязкости разрушения. Значительную перспективу в использовании новых материалов в авиации связывают также со слоистыми алюмокомпозитами – СИАлами (GLARE), которые отличаются от алюминиевых сплавов пониженной на 10-15% плотностью ($2,4 \text{ г/см}^3$), высокой прочностью ($\sigma_B > 600 \text{ МПа}$) и уникальные показатели сопротивления развитию усталостного разрушения и жаростойкости. Серьезным недостатком СИАлов являются низкие упругие свойства, модуль Юнга которых заметно уступает алюминию ($< 60 \text{ ГПа}$). Применение сплавов системы Al-Cu-Li может существенно повысить величину модуля Юнга СИАлов и расширить его применение в авиационных конструкциях, для многих из которых требуются высокие упругие свойства. Одной из серьезных проблем применения алюминий-литиевых сплавов в СИАлах является выраженная анизотропия свойств, которую связывают с особенностями формирования текстуры и фазового состава в листах этих сплавов.

Высокие прочностные свойства сплавов Al-Cu-Li связывают с T1-фазой, поэтому основой создания сплавов 3-го поколения являлось повышение отношения Cu/Li по сравнению со сплавами 2-го поколения. Кроме того, пониженное относительное содержание лития должно было снизить анизотропию свойств. Высокие упругие свойства сплавов Al-Cu-Li связывают с большим количеством интерметаллидов, однако вклад каждой из интерметаллидных фаз в высокий модуль упругости сплавов системы Al-Cu-Li, в отличие от

прочностных свойств, до сих пор неизвестен, что затрудняет поиск составов сплавов с повышенными упругими свойствами.

В этой связи, тема диссертационной работы Прокопенко Д.А., в которой на основе совершенствования количественных методов определения фазового состава и текстуры отечественных сплавов системы Al-Cu-Li решены задачи выявления закономерностей формирования анизотропии упругих и прочностных свойств этих сплавов для повышения надежности их применения в изделиях авиационной техники, является актуальной.

Общая характеристика работы

Экспериментальной части работы предшествовал обстоятельный литературный обзор, в котором отмечено, что практически отсутствуют исследования анизотропии упругих свойств сплавов с литием, а также оценка количественного вклада интерметаллидных фаз в уникально высокий модуль Юнга сплавов с литием, который обусловлен влиянием интерметаллидных фаз.

Текстура листов сплавов 1441, В-1461 и В-1469 системы Al-Cu-Li и сплавов В-1480 и В-1481 системы Al-Cu-Li-Ag определена с помощью обратных полюсных фигур, которые получали съемкой сборных образцов с плоскостью съемки, нормальной долевому, поперечному и под углом 45° к направлению прокатки в плоскости листа. Для интерпретации анизотропии прочностных свойств использовали расчеты факторов Закса, которые являются обратными значениями факторов Шмида для системы октаэдрического скольжения.

Количественный фазовый анализ сплавов выполняли в соответствии с методикой, основанной на измерении периода решетки α -твердого раствора, при этом для учета неоднородности состава по толщине листов и по ориентировке кристаллитов методика была усовершенствована усреднением по кристаллографическим ориентировкам с использованием полюсных плотностей рефлексов, взятых в виде весовых множителей. Эта методика позволила впервые установить, что усредненная по трем направлениям в листе величина модуля Юнга пропорциональна суммарному количеству интерметаллидов δ' и T1-фаз. На основе количественного фазового анализа, экспериментально определенных модулей Юнга и правила аддитивности впервые в сплавах системы Al-Cu-Li оценены значения модуля Юнга интерметаллидов, которые в сочетании с количественным фазовым анализом могут быть использованы для прогнозирования модулей Юнга разрабатываемых сплавов системы Al-Cu-Li.

Исследование закономерностей анизотропии механических свойств листов Al-Cu-Li сплавов показало, что минимальные значения пределов текучести и прочности и максимальные значения относительного удлинения получены в плоскости листов в направлении под углом 45° к направлению прокатки. Максимальные показатели анизотропии характерны для относительного удлинения, коэффициент плоскостной анизотропии (КПА) которого равен 10-40%, а минимальные показатели анизотропии получены для предела прочности (КПА=5-7%). Сопоставление анизотропии, полученной расчетом из текстурных данных с экспериментальными данными, показало совпадение для минимума прочности в направлении под углом 45° к направлению прокатки, но завышенные расчетные значения прочности для поперечного и заниженные для продольного направления, что можно объяснить разницей в размере зерна, который больше в продольном направлении, чем в поперечном к направлению прокатки.

Интересные результаты получены при исследовании кристаллографической текстуры, фазового состава и анизотропии упругих и прочностных свойств сплавов В-1481, имеющих близкие составы, но сильно отличающиеся по текстуре и анизотропии свойств. Пределы текучести в направлении прокатки (НП) и поперечном направлении (ПН) сплава В-1480 и значительно выше, чем для сплава В-1481 (соответственно $\sigma_{0,2}$ (В-1480)=560 и $\sigma_{0,2}$ (В-1481)=480 МПа в НП и $\sigma_{0,2}$ (В-1480)=530 и $\sigma_{0,2}$ (В-1481)=480 МПа в ПН), однако минимальные показатели для обоих сплавов одинаковые ($\sigma_{0,2}$ (В-1480)= $\sigma_{0,2}$ (В-1481)=470 МПа) в направлении под углом 45° к направлению прокатки. Важно, что испытания образцов, вырезанных под углом 45° к направлению прокатки, не используются при стандартной схеме испытаний в долевом или поперечном направлениях, которые дадут для листов из сплава В-1480 существенно завышенные прочностные свойства.

Научная новизна

Количественный фазовый анализ позволил установить, что усредненная по трем направлениям в плоскости листа величина модуля Юнга пропорциональна суммарному содержанию интерметаллидов (δ' и Т1), при этом основной вклад дает δ' -фаза.

Впервые определены модули Юнга δ' и Т1 интерметаллидных фаз в сплавах Al-Cu-Li, которые на 50-70% выше, чем у твердого раствора, что в сочетании с большим количеством в сплавах интерметаллидных фаз объясняет уникально высокие значения модуля Юнга сплавов системы Al-Cu-Li.

Для сплавов Al-Cu-Li найдена корреляция между отношением Cu и Li в атомных % и количеством интерметаллидных фаз, что позволяет прогнозировать фазовый состав новых Al-Cu-Li сплавов.

Сопоставление анизотропии, полученной расчетом из текстурных данных ориентационных факторов Закса и результатами механических испытаний показало, что расчеты объясняют минимум прочности образцов, вырезанных под углом 45°, но дают завышенные значения прочностных характеристик для поперечного направления и заниженные значения прочностных характеристик для продольного направления, что можно объяснить тем, что эффективный размер зерна и прочность выше, чем для поперечных образцов.

Практическая значимость работы

Показано, что пределы текучести в долевом и поперечном направлениях сплава В-1480 значительно выше, чем для сплава В-1481, однако минимальные показатели для обоих сплавов в направлении под углом 45° не отличаются, что демонстрирует необходимость учета текстурного фактора и анизотропии при оценке прочности изделия и необходимость проведения для листов сплавов Al-Cu-Li испытаний в направлении под углом 45°.

Впервые оцененные в работе величины модулей Юнга для δ' - и Т1-фаз, которые находятся на одном уровне, показали, что при выборе составов сплавов с повышенными упругими свойствами необходимо увеличивать количество лития, который обеспечивает существенно большее количество интерметаллидов по сравнению с медью.

Достоверность полученных результатов полученных результатов обеспечена использованием современного поверенного оборудования с лицензионным программным обеспечением, проведением испытаний и измерений в соответствии с ГОСТ, применением эффективных нестандартных методических решений, хорошим совпадением экспериментальных данных и теоретических расчетов,

Замечания

1. В сплавах системы Al-Cu-Li кроме T1-фазы присутствуют другие медьсодержащие фазы, например равновесная Θ -фаза и метастабильные Θ' и Θ'' -фазы, которые никак не учитываются при количественном фазовом анализе, в котором рассмотрены, кроме твердого раствора, только две интерметаллидные фазы δ' - и T1.

2. В методике количественного фазового анализа содержание меди в твердом растворе определяли с помощью закона Вегарда, при этом ничего не сказано об определении в твердом растворе содержания лития, от чего непосредственно зависят количества обеих интерметаллидных фаз.

3. В 5 главе при исследовании близких по химическому составу сплавов, в сплаве В-1480 обнаружена выраженная текстура и анизотропия свойств, а в сплаве В-1481 текстура и анизотропия свойств отсутствуют, что связывают с рекристаллизацией. Однако в Al и его сплавах рекристаллизация приводит к выраженной кубической текстуре, которая характеризуется высокой анизотропией свойств.

4. В диссертации текстурный вклад в анизотропию свойств оценивали съемкой сборных образцов для трех сечений долевым, поперечном и диагональном направлениях, поскольку рентгеновская съемка от таких образцов усредняет послойную неоднородность текстуры, что кажется целесообразным с позиций интерпретации анизотропии свойств, однако в дополнении к этому послойное исследование текстуры могло бы дать ценную информацию о механизме формирования текстуры прокатки листов.

5. В литературном обзоре большинство рисунков представлено с английскими комментариями, без перевода специфических терминов и аббревиатур.

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

Диссертационная работа Прокопенко Д.А. выполнена на высоком научно-техническом уровне. Она представляет собой самостоятельную законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены научно-обоснованные технические решения по совершенствованию методов количественного фазового анализа и текстурных параметров применительно к исследованиям 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.

Заключение.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа отвечает критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, изложенным в пп. 9-14 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.

Отзыв на диссертацию подготовлен по результатам рассмотрения диссертационной работы на заседании кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (протокол №3 от 23.10.2025).

Авторы отзыва дают согласие на обработку персональных данных.

Заведующий кафедрой технологии металлов и авиационного
материаловедения Самарского университета,
доктор технических наук (2.6.17 Материаловедение), доцент
Телефон: 8 (846) 2674640
Электронная почта: nosova.ea@ssau.ru



Носова Екатерина Александровна

Отзыв составили:

Заведующий кафедрой обработки металлов
давлением Самарского университета,
доктор технических наук (2.5, доцент
Телефон: +8 (846) 3340904
Электронная почта: erisov@ssau.ru



Ерисов Ярослав Александрович

Сведения об организации:

Полное наименование: федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С. П. Королева»

Сокращенное наименование: Самарский университет

Почтовый адрес: 443086, Самарская область, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34

Тел.: +7 (846) 267-43-22, адрес электронной почты: ssau@ssau.ru