

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию КНЯЗЕВА Максима Игоревича «Разработка количественных методов исследования фазового состава, текстуры и анизотропии свойств алюминий-литиевых сплавов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Диссертация Князева М.И. имеет методический характер и посвящена разработке количественных методов исследования сплавов системы Al-Li, находящихся в настоящее время все более широкое применение в аэрокосмической технике благодаря уникальному сочетанию низкой плотности, значительной прочности и высоких упругих модулей. **Целью работы** являлась разработка количественных методов исследования и выявление закономерностей формирования фазового состава, текстуры и анизотропии механических свойств в сплавах системы Al-Li для повышения стабильности служебных характеристик изделий авиационной техники из этих сплавов.

### Актуальность диссертационной работы

На основе анализа многочисленных литературных данных обоснована актуальность диссертации, направленной на совершенствование количественного фазового анализа сплавов и методики построения обратных текстурных полюсных фигур применительно к этим сплавам для повышения стабильности и однородности механических свойств материалов авиационной техники. Алюминий-литиевые сплавы обладают целым рядом преимуществ по сравнению с алюминиевыми сплавами на основе других систем: их плотность ниже в среднем на 10%, а модуль упругости выше на  $\approx 12\%$ , при этом алюминий-литиевые сплавы могут иметь весьма высокие прочностные характеристики при хороших показателях трещиностойкости и коррозионной стойкости. Несмотря на все эти достоинства, сплавы Al-Li до сих пор находят недостаточно широкое применение, во многом из-за термической нестабильности, которая проявляется в снижении пластичности и вязкости разрушения при длительных низкотемпературных нагревах, а также пониженной технологичности.

Важную роль в формировании комплекса свойств сплавов алюминий-литий играют интерметаллидные фазы, выделяющиеся в сплавах в процессах деформации и термической обработки и во многом определяющие как достоинства, так и недостатки сплавов. В частности, в рассматриваемых в диссертации сплавах систем Al-Li, Al-Cu-Li, Al-Mg-Li могут образовываться следующие интерметаллидные фазы: (1) неравновесная  $\delta$ -фаза ( $Al_3Li$ ) с кубической структурой; (2)  $T_1$ -фаза ( $Al_2CuLi$ ) с гексагональной решеткой; (3) метастабильная  $\theta$ -фаза ( $Al_2Cu$ ) с тетрагональной решеткой; (4)  $T_2$ -фаза ( $Al_6CuLi$ ) с кубической решеткой; (5)  $S'$ -фаза ( $Al_2CuMg$ ) с

орторомбической решеткой; (б) метастабильная  $\beta'$ -фаза ( $\text{Al}_3\text{Zr}$ ) с кубической решеткой. Для всех этих интерметаллидных фаз при использовании просвечивающей электронной микроскопии и микродифракции определены параметры решетки и ориентационные соотношения с  $\alpha$ -матрицей. Приведенный неполный перечень интерметаллидных фаз, образующихся в двойных и тройных алюминиевых сплавах, дает представление о чрезвычайной сложности системы, исследуемой в диссертации Князева М.И.

Существует насущная необходимость в создании надежной методики количественного фазового анализа алюминий-литиевых сплавов в связи с обязательностью поддержания стабильности их механических свойств на весь период их службы, чего трудно добиться при недостаточной длительности старения сплава, обеспечивающем требуемый уровень упрочнения. Однако до сих пор нет полной ясности в вопросах приоритета тех или иных интерметаллидов в этих сплавах с точки зрения вызываемого ими упрочнения, что объясняет интенсивность поиска новых эффективных композиций, продолжающуюся уже несколько десятков лет, прежде всего в США и России. Именно комплексный характер проблем производства и применения алюминий-литиевых сплавов требует для своего решения развития количественных методов исследования и контроля структурно-фазового состояния этих сплавов и поиска на этой основе надежных корреляций между характеристиками структуры и служебными свойствами.

В этой связи диссертация Князева М.И. безусловно актуальна, поскольку направлена на разработку количественных методов оценки фазового состава, текстуры и анизотропии свойств сплавов системы Al-Li.

### **Научная новизна работы**

Содержащиеся в диссертации Князева М.И. методические разработки явились основой для экспериментальных результатов, обуславливающих научную новизну работы. Прежде всего это относится к методике расчета количества  $T_1$  и  $\delta'$ - фаз в Al-Cu-Li сплавах на основании измерения параметров решетки  $\alpha$ -твердого раствора, в результате применения которой показано, что в Al-Cu-Li сплавах соотношение между  $\delta'$ - и  $T_1$ - фазами определяется атомными долями лития и меди. Научная новизна результатов работы Князева М.И. касается, как правило, особенностей выделения интерметаллидных фаз при термообработке алюминий-литиевых сплавов и их упрочняющего воздействия, что и вызывает наиболее многочисленные вопросы при рассмотрении тематики диссертации. Предложен критерий фазовой стабильности сплавов системы Al-Li, основанный на оценке возможных вариаций количества  $\delta'$ - фазы для сплава данного химического состава. На основе анализа формирования фазового состава и текстуры в сплавах Al-Cu-Li при деформации и термической обработке выявлены количественные закономерности влияния различных интерметаллидных фаз на механические свойства сплавов и их анизотропию.

Предложена новая классификация Al-Li-Mg(Cu) – сплавов, которые следует разделить на 5 групп, различающихся отношением долей двойной  $\delta'$ -фазы и тройных  $S_1$ - или  $T_1$ - фаз, изменяющимся в широких пределах от 2 до 17. С помощью измерения угловой полуширины сверхструктурной линии  $\delta'$ -фазы по формуле Селякова -Шерера рассчитаны размеры частиц  $\delta'$ -фазы и впервые экспериментально показано, что в результате трехступенчатого старения происходит увеличение размера этих частиц от  $\sim 10$  до  $\sim 20$  нм. Тем самым обоснован новый механизм упрочнения при старении сплавов Al-Cu-Li с содержанием лития  $>1,5\%$ , основанный на том, что эффект упрочнения, обусловленный выделением упорядоченных частиц, пропорционален соответствующему увеличению их размера, и это обеспечивает значительный упрочняющий эффект при старении даже при неизменной фракции  $\delta'$ -фазы. Показано, что анизотропию прочностных свойств Al-Li сплавов можно оценивать на основании вычисления усредненных факторов Закса для  $\alpha$ -твердого раствора и  $\delta'$ -фазы с учетом количественных текстурных данных, почерпнутых из обратных текстурных полюсных фигур.

### **Практическая значимость работы**

Практическая значимость диссертации Князева М.И. становится очевидной при рассмотрении возможных приложений полученных результатов в рамках конкретных технологических исследований применительно к российским алюминиевым сплавам. В частности, выведены уравнения для расчета количества  $S_1$ - ( $Al_2MgLi$ ),  $T_1$ - ( $Al_2CuLi$ ) и  $\delta'(Al_3Li)$ -фаз в российских и зарубежных сплавах 1420, 1424, 5090 (сплавы Al-Mg-Li) и 1440, 1460, 1461, 1441, 1469, 2090, 2094, 2095, 8090, (сплавы Al-Cu-Li). Показано, что старение при 120 и 140 $^{\circ}C$  сопровождается выделением  $\theta'$  –фазы, количество которой после старения при 140 $^{\circ}C$  существенно выше, а при 150 $^{\circ}C$  выделением из твердого раствора медьсодержащих  $T_1$  и  $\theta'$  –фаз. Дельта-штрих фаза присутствует в сплаве на всех стадиях термообработки, включая закалку, в значительных количествах, что затрудняет оценку ее вклада в упрочняющий эффект старения. Исследования текстуры показали, что в среднем слое плиты толщиной 0,3-0,35Т наблюдается одинаковая для матрицы и  $\delta'$ -фазы интенсивная однокомпонентная текстура с расположением плоскости  $\{011\}$  параллельно плоскости плиты с доминированием текстуры «латуни»  $\{110\}\langle 112\rangle$ . В результате проведенных экспериментальных работ показано, что неоднородность и анизотропия механических свойств плит из сплава В-1461 формируются на стадии прокатки и возможности их коррекции в результате термообработки ограничены. Расчетным методом с использованием модели дисперсионного упрочнения за счет выделения упорядоченной  $\delta'$ - фазы показано, что обнаруженное увеличение размера частиц соответствует повышению прочности на 80-100 МПа, что близко к значениям упрочнения сплава В-1461. В результате исследования неоднородности механических свойств в различных зонах и направлениях плит толщиной 80 мм из сплава В-1461

обнаружено, что прочностные характеристики максимальны в медианном сечении (пределы прочности и текучести 570 и 540 МПа). Показано, что величина твердости (HRB) увеличивается от 70 единиц для старения при 120<sup>0</sup>С, 20 час. до 85 единиц для трехступенчатого режима старения 120<sup>0</sup>С, 20 час.+140<sup>0</sup>С, 24 час. +150<sup>0</sup>С, 24час, при этом в отличие от прочности на растяжение значения твердости не меняются по сечению плиты, что свидетельствует о том, что неоднородность и анизотропия свойств на растяжение обусловлены сочетанием кристаллографической и механической текстуры.

Показано, что роль Т<sub>1</sub>-фазы как основного упрочнителя Al-Cu-Li сплавов преувеличена, в особенности для сплавов с содержанием лития >1,5%, для которых доминирует эффект упрочнения за счет упорядоченной δ'- фазы. В качестве приложений приведены методические разработки и соответствующие расчетные программы для количественного фазового анализа и оценки анизотропии упругих и прочностных свойств текстурированных полуфабрикатов Al-Li сплавов.

### **Достоверность результатов и выводов работы**

Достоверность результатов, рекомендаций и выводов работы обеспечивается квалифицированным использованием существующих методических подходов и их усовершенствованием применительно к особенностям материала исследования. Здесь можно упомянуть в частности повышение информативности метода обратных полюсных фигур. Также следует отметить, что в ряде случаев метод количественного фазового анализа на основе измерения периодов решетки дополняется непосредственным измерением интенсивности сверхструктурных рефлексов от интерметаллидных фаз непосредственно наблюдаемых на рентгенограммах. Важным в этом плане является сопоставление результатов определения анизотропии и неоднородности прочностных свойств с рассчитанными из текстурных данных. Хорошее соответствие результатов такого сопоставления свидетельствует о достоверности экспериментальных данных и одновременно об адекватности используемых в расчетах моделей деформационного поведения исследуемых образцов.

### **Замечания по работе**

Диссертация Князева М.И. не лишена недостатков, среди которых надо отметить следующие, связанные, как правило, с отсутствием необходимых пояснений по ряду принципиальных вопросов:

(1) Используемая диссертантом методика количественного определения фазового состава сплавов и рентгеновский метод построения обратных полюсных фигур не являются взаимно независимыми, поскольку параметры кристаллической решетки, оцениваемые по угловому положению рентгеновских линий, в текстурированном материале характеризуются некоторой анизотропией, что отражается на получаемых величинах фазового состава, и в то же время измеряемые

интенсивности рентгеновских линий контролируют вид обратной текстурной полюсной фигуры. Поэтому предложенный метод количественного определения фазового состава сплавов для своего обоснования требует анализа допусаемых при этом ошибок.

(2) Остается открытым вопрос о происхождении текстуры в интерметаллидных фазах и о возможности их пластической деформации. Казалось бы, совпадение текстур исходной матрицы и образующихся при старении сплава интерметаллидных фаз однозначно свидетельствует о когерентном выделении интерметаллидных частиц, имеющих, по крайней мере, кубическую решетку. Но в явном виде этот вопрос в диссертации не обсуждается.

(3) Вопрос о развитии в условиях прокатки при повышенных температурах в приповерхностных слоях плиты из алюминиевого сплава текстуры, типичной для ОЦК металлов, требует более обстоятельного анализа, чем сделанная вскользь ссылка на возможное проникновение сдвиговой деформации вглубь прокатываемого материала. В то же время в другом месте автор допускает, что системы скольжения, действующие в поверхностных слоях плиты, отличаются от действующих в ее внутреннем слое. Но для этого нужно, чтобы вблизи поверхности плиты действовали бы какие-то факторы, блокирующие процессы скольжения: например, измельчающая зерно динамическая рекристаллизация или интерметаллидные предвыделения на подстуживаемой валками поверхности. Так или иначе, в диссертации, которая в значительной мере посвящена текстурным исследованиям, было бы желательно подробнее остановиться на этом вопросе.

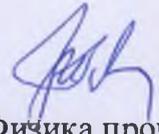
(4) При описании процедуры обработки прокатанных плит для выделения в них интерметаллидных фаз диссертант неоднократно упоминает об их растяжении - при этом иногда речь идет о «правке растяжением», иногда просто о «растяжке», иногда о растяжении со степенью деформации до 20% с остаточной деформацией 2-3% (?), - но нигде не поясняется, какую роль это растяжение играет при старении сплава. Возможно, эмпирическое наблюдение, касающееся влияния деформации растяжением на выделение интерметаллидов, отражает некую закономерность, для изучения которой данная диссертация могла бы быть оптимальна.

(5) К сожалению, в диссертации использован весьма ограниченный набор рентгеновских методов исследования, в то время как имевшееся в распоряжении автора оборудование позволяло без особого труда расширить их число, применив давно разработанные в НИЯУ МИФИ экспрессный метод построения точных обратных текстурных полюсных фигур с помощью кривых наклона образца или метод определения размера зерен с заданными ориентациями по флуктуациям интенсивности рентгеновского рассеяния. Применение этих и ряда других методов способствовало бы расширению и совершенствованию базы экспериментальных данных, на которых основывается анализ изучаемых процессов.

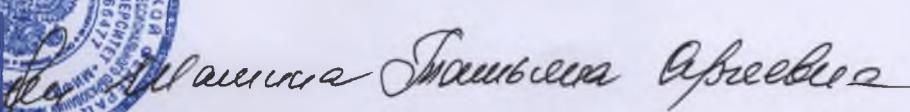
(6) В текстах диссертации и автореферата имеются грамматические ошибки, свидетельствующие о поспешности их написания.

Учитывая, что диссертация Князева М.И. представлена на соискание ученой степени кандидата технических наук, а не физико-математических, и не претендует на доскональное исследование физических аспектов процессов, протекающих в алюминиевых сплавах при их технологической обработке, сделанные замечания могут рассматриваться всего лишь в качестве рекомендаций по совершенствованию представленного в диссертации рассмотрения и по усилению в нем теоретической компоненты.

В целом работа Князева М.И. является заметным вкладом в изучение сплавов системы Al-Cu-Li, дающим возможность повысить эффективность разработок в этой перспективной области материаловедения авиационных материалов, и в этой связи удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов. Автореферат и опубликованные работы автора отражают основные результаты его диссертации. По объему представленных в работе экспериментальных данных, по их научной новизне и практической значимости Князев М.И. за разработку количественных методов исследования фазового состава, текстуры и анизотропии свойств алюминий-литиевых сплавов заслуживает присуждения ему искомой ученой степени.

Официальный оппонент  Дерлович Юрий Анатольевич,  
доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Физика прочности»  
Национального Исследовательского Ядерного Университета (МИФИ)

Подпись удостоверен  
Заместитель начальника отдела  
документационного обеспечения  
НИЯУ МИФИ

  
Почтовый адрес: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31

ГУ ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Электронный адрес: [yuperl@mail.ru](mailto:yuperl@mail.ru)