

## ОТЗЫВ

**Официального оппонента на диссертацию Князева М.И. «Разработка количественных методов исследования фазового состава, текстуры и анизотропии свойств алюминий-литиевых сплавов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 - Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»**

### **Актуальность темы диссертации**

Сплавы системы Al-Li находят широкое применение в авиакосмической технике благодаря высоким механическим свойствам и низкой плотности. Первые Al-Li сплав разработан Alcoa в 1960 г. (система Al-Cu-Li), а в 1969 г академик И.Н. Фридляндер запатентовал в США самый легкий алюминиевый сплав 01420 системы Al-Mg-Li. В 80-е годы были усовершенствованы составы сплавов и созданы сплавы 2-го поколения. Основной проблемой для этих сплавов стали анизотропия механических свойств и охрупчивание при длительных эксплуатационных нагревах, что стимулировало создание 3-го поколения сплавов с увеличенным отношением Cu/Li по сравнению со сплавами 2-го поколения, а также микролегированными Ag и Zn. Это сплав 2099 и российский сплав В-1461.

Повышенный интерес к сплавам системы Al-Cu-Li обусловлен новой перспективой их применения в качестве компонентов слоистых алюмокомпозитов (СИАЛов) в связи с их низкой плотностью, а также более высокими по сравнению с другими алюминиевыми сплавами значениями модуля упругости, величина которого связана с количеством интерметаллидных фаз, прежде всего  $\delta'$ -фазы. Несмотря на все достоинства Al-Cu-Li сплавов по сравнению с традиционными алюминиевыми сплавами их применение встречается с проблемами как технологического, так и эксплуатационного плана, которые связывают с наличием многочисленных трудно контролируемых интерметаллидных фаз, более выраженной по

сравнению с другими алюминиевыми сплавами анизотропией свойств, а также неоднородностью их механических свойств по сечению полуфабрикатов. Поэтому для оптимизации служебных характеристик Al-Li сплавов необходимо развитие количественных методов исследования и контроля фазового состава и кристаллографической текстуры, чему посвящена диссертационная работа Князева М.И. и чем определяется ее актуальность.

### **Характеристика научной новизны работы**

Наиболее существенным вкладом в материаловедение алюминий-литиевых сплавов является разработка методики расчета количественного соотношения интерметаллидных фаз ( $T_1$ ,  $S_1$  и  $\delta'$ - фазы) для Al-Cu-Li и Al-Mg-Li сплавов на основании экспериментального измерения параметров решетки  $\alpha$ -твердого раствора. Достоинством методики является тот факт, что она основана на очевидных соотношениях между химическим составом сплава и величиной периода решетки, которая зависит только от состава твердого раствора. При фазовых превращениях происходит изменение состава твердого раствора, что сопровождается соответствующими изменениями периода его решетки. Тем не менее, несмотря на кажущуюся простоту этой методики до сих пор она не была предложена для практического применения, хотя на этом принципе основаны методики построения линий ограниченной растворимости в твердом состоянии при построении диаграмм состояния. В работе показано, что разработанная методика может успешно использоваться для интерпретации результатов исследований влияния термической и термомеханической обработок на фазовый состав сплавов, а также при оптимизации их составов в поисковых работах.

В диссертации 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). Расчетным методом показано, что в сплавах соотношение между  $\delta'$ - фазой и тройными фазами определяется атомными долями лития и меди для Al-Cu-Li сплавов, показано также, что в сплавах Al-



Cu-Li доля  $\delta'$ - фазы значительно выше, чем тройной  $T_1$ -фазы. Предложен критерий фазовой стабильности сплавов системы Al-Li, основанный на оценке возможных вариаций количества  $\delta'$ - фазы для сплава данного химического состава.

В работе предложена новая классификация сплавов Al-Li, которая основана на относительной атомной концентрации лития и меди в сплавах Al-Cu-Li и лития и магния для сплавов Al-Mg-Li. Достоинством этой классификации является то, что она основана на объективном критерии, который легко рассчитывается из химического состава сплава и поэтому может применяться, например, для прогнозирования служебных свойств разрабатываемых новых сплавов на основе анализа корреляций состава и свойств уже существующих сплавов.

Новым научным результатом является установленные закономерности поведения сплавов системы Al-Cu-Li при многоступенчатом старении и выявленные при этом механизмы упрочнения при выделении интерметаллидных фаз. В работе показано, что основной упрочняющий эффект происходит на заключительных двух стадиях старения (140 и 150<sup>0</sup>С) за счет увеличения размеров частиц  $\delta'$ - фазы, а также выделения  $T_1$  и  $\theta'$  –фаз, при этом вклад от выделения  $\delta'$ - фазы доминирует даже в том случае, когда ее количество не увеличивается. Показано, что деформация растяжением после закалки и первая стадия старения (120<sup>0</sup>С) не дает непосредственного упрочнения, но формирует оптимальное структурно-фазовое состояние сплава, обеспечивающего максимальный упрочняющий эффект на заключительных этапах старения. Важно отметить, что эти закономерности подтверждены экспериментально не только фазовым анализом по периоду решетки твердого раствора, но и по наличию и интенсивности рефлексов интерметаллидов, которые удалось обнаружить непосредственно на рентгенограммах.

## **Практическая значимость работы**

Практическая значимость работы заключается прежде всего с усовершенствованием метода обратных полюсных фигур (ОПФ), которое распространяется не только на Al-Li сплавы, но и на любые другие сплавы с ГЦК решеткой. Метод ОПФ широко используется в исследовательской практике вузов и заводских лабораторий и поэтому повышение информативности метода является практически важным результатом. Метод количественного фазового анализа также может найти широкое применение в исследованиях сплавов системы Al-Li в вузах, научных институтах и заводских лабораториях, а также в учебной работе. Важно отметить, что автором разработана и прошла регистрацию соответствующая расчетная программа.

Важным практическим результатом является и тот факт, что в результате экспериментального определения текстуры и сопоставления результатов механических испытаний с расчетными из текстурных данных факторами анизотропии установлено, что эта анизотропия, также как и неоднородность свойств по сечению плиты из сплава В-1461 обусловлена текстурой. При этом показано, что текстура в плитах сплава формируется целиком в процессе прокатки и последующая термическая обработка ее не изменяет. Из этого следует, что корректировка режима термической обработки не может повлиять на анизотропию и неоднородность свойств, что дает четкое направление усилий для оптимизации механических свойств полуфабрикатов.

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

Достоверность результатов и выводов работы обеспечивается использованием современных методик исследования, их совершенствованием применительно к особенностям сплавов алюминий-литий, а также разработкой новых эффективных количественных методик. Также в этой связи следует отметить хорошее совпадение результатов расчетов анизотропии свойств текстурированных образцов с результатами испытаний, что свидетельствует об адекватности используемых физических моделей.



### **Замечания по диссертации:**

1. Предложенная автором методика количественного фазового анализа основана на условии, что период решетки твердого раствора зависит только от его состава, однако при этом игнорируется возможное влияние на период решетки остаточных макронапряжений, которые формируются при деформационных и термических воздействиях на материал.

2. Приведенные в работе примеры применения предложенных методик относятся к деформированным полуфабрикатам из сплава 1420 (система Al-Mg-Li) и В-1461 (Al-Cu-Li), при этом в работе нет никаких указаний насколько разработанные методики применимы к сплавам этих систем в литом состоянии.

3. Результаты испытаний на растяжение плиты из сплава В-1461 показали, что в среднем сечении прочность на 40-50 МПа выше, чем в подповерхностном слое, однако измерение твердости показало напротив самые низкие величины именно в среднем сечении и это противоречие никак не комментировалось в работе, хотя этот эффект наблюдается после всех режимов старения, что свидетельствует о том, что это закономерность.

4. Во второй главе в качестве материалов, используемых в работе, указывались сплавы В-1461 и 1420, а в приведенных далее исследованиях их значительно больше. Хотелось бы более подробной их характеристики.

5. В третьей главе на стр. 105 автор утверждает, что коррозионная стойкость сплавов Al-Cu-Li ухудшается с повышением содержания меди. С этим трудно не согласиться. Но далее по тексту: «... но она может быть улучшена путем выбора оптимального режима термической обработки». Подтверждения этому в тексте работы я не нашел. Также как и подтверждения, что сплавы Al-Cu-Mg-Li более технологичны, чем сплавы Al-Mg-Li.

Сделанные замечания носят дискуссионных, рекомендательный либо технический характер и не влияют на общую положительную оценку диссертации официальным оппонентом.

## Заключение

Диссертация Князева Максима Дмитриевича является завершенной научной квалификационной работой, которую можно рассматривать как ценный вклад в исследовательскую практику изучения сплавов системы Al-Li, дающий возможность повысить эффективность исследований и разработок в этой области материаловедения авиационных материалов, имеет важное научное и практическое значение.

Автореферат и опубликованные работы отражают основное содержание диссертации.

Диссертация Князева М.И. полностью отвечает требованиям п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней в редакции Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Официальный оппонент

Никитин Сергей Леонидович

Федеральное государственное унитарное

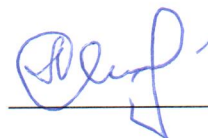
Предприятие «Научно-исследовательская часть

«МАТИ» Российского государственного технологического

института имени К.Э. Циолковского»

директор,

доктор технических наук, профессор



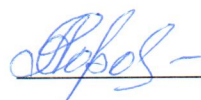
Никитин С.Л.

103767, г.Москва, ул. Петровка, д.27

[post@nich-mati.ru](mailto:post@nich-mati.ru); 8 (495)417-50-75

Подпись Никитина С.Л. удостоверяю

Начальник отдела кадров



Сорокина А.С.

