



**Уральский
федеральный
университет**

имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ)

ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, тел.: +7 (343) 375-45-07
контакт-центр: +7 (343) 375-44-44, 8-800-100-50-44 (звонок бесплатный)
e-mail: rector@urfu.ru, www.urfu.ru
ОКПО 02069208, ОГРН 1026604939855, ИНН/КПП 6660003190/667001001

17.11.2023 № 01.0904/855
На № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке УрФУ

Германенко А.В.

« _____ » 2023г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

по диссертационной работе **Быкадорова А.Н.** «Исследование теплового расширения Al-Li сплавов, трип-сталей и композитных покрытий ZrO_2/Al_2O_3 », представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5. – Порошковая металлургия и композиционные материалы

Актуальность работы.

Термический коэффициент линейного расширения (ТКЛР) является важной характеристикой любых конструкционных материалов, обладающих гетерогенностью на макро- или микроуровнях. К первым относятся композиционные материалы и покрытия, а ко вторым многофазные материалы, состоящие в основном из твердых растворов как стали и титановые сплавы или содержащие дисперсные частицы интерметаллидных фаз как алюминиевые сплавы. Несоответствие ТКЛР фаз или компонентов таких гетерогенных материалов приводит к высоким внутренним напряжениям при термических воздействиях и могут стать причиной разрушения изделия.

В сталях, в которых величина ТКЛР аустенита значительно выше, чем мартенсита, происходит формирование в нем при охлаждении высоких растягивающих напряжений. Известен эффект влияния изменения фазового состава трип-сталей на разницу величин ТКЛР аустенита и мартенсита, что

может оказывать влияние на формирование в трип-сталях остаточных напряжений, которые играют важную роль в проявлении трип-эффекта. Особенно сложные проблемы возникают в материалах с некубической решеткой, которые характеризуются анизотропией ТКЛР, которая может привести к несовместности деформации зерен разных ориентаций даже в однофазных сплавах.

Следует отметить, что экспериментальное определение ТКЛР методом высокотемпературной рентгеновской съемки имеет значительные преимущества по отношению к дилатометрии, поскольку позволяет проводить измерение ТКЛР различных фаз в многофазных системах, а также в тонких поверхностных слоях и покрытиях. Уникальное преимущество дифракционного метода определения ТКЛР заключается также и в том, что он дает возможность определять монокристалльные характеристики сплавов из экспериментов на поликристаллах. Так для сплавов магния, титана и циркония можно определить влияние легирования на анизотропию сил связи измерив величины ТКЛР вдоль осей «а» и «с» на поликристалле. Чтобы получить такую информацию из определения упругих свойств необходимо иметь монокристаллы.

В этой связи является актуальной диссертационная работа Быкадорова А.Н., в которой поставлена задача определения закономерностей процессов теплового расширения в сплавах системы Al-Cu-Li, трип-сталях и многофазных покрытиях и оценки значений ТКЛР в этих материалов методом высокотемпературной рентгенографии.

Общая характеристика работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 179 наименований, изложена на 133 страницах машинописного текста, содержит 39 рисунков и 8 таблиц. В диссертации исследовали тепловое расширение Al-Cu-Li сплавов, при этом анализировали корреляции характеристик ТКЛР с упругими и прочностными свойствами сплавов с целью расширения возможностей метода измерения ТКЛР для прогнозирования структурно-фазового состояния и свойств этих сплавов. Изучены закономерности термического расширения в α - и γ -фазах трип-стали ВНС9-Ш и стали близкого состава, которая не относится к трип-сталям с целью выявления особенностей термических характеристик именно трип-

сталей. Методом высокотемпературной рентгеновской съемки определяли ТКЛР в трехфазных оксидных покрытиях, полученных совместным магнетронным распылением мишеней Al и Zr в аргоно-кислородной среде с целью прогнозирования поведения этих оксидов в многослойных покрытиях.

Научная новизна.

Научная новизна диссертационной работы Быкадорова А.Н. заключается в том, что впервые для сплавов системы Al-Cu-Li установлены закономерности влияния основных легирующих элементов на упругие свойства сплавов системы Al-Cu-Li. При этом показано, что повышение относительного содержания лития по сравнению с медью приводит к повышению модуля Юнга из-за увеличения суммарной доли интерметаллидов и снижению прочностных характеристик из-за уменьшения количества Γ_1 -фазы, эффекту упрочнения которой значительно выше, чем δ' -фазы.

Важные результаты получены при измерении ТКЛР сплавов Al-Cu-Li, состоящих из α -твердого раствора и интерметаллидных фаз. Эти результаты показали, что с повышением количества интерметаллидных фаз снижается величина ТКЛР сплавов, которая определялась по изменению с температурой периода решетки твердого раствора, что является демонстрацией того факта, что величина ТКЛР многофазных сплавов и композитов есть результат сложного взаимодействия компонентов смеси.

Ценным вкладом в методику оценки ТКЛР для кристаллов с тетрагональной и гексагональной решетками является предложенное в работе использование известного представления ТКЛР в виде тензора 2-го ранга. Это соотношение до этого не использовали с этой целью и такой подход позволил повысить точность оценки ТКЛР фаз, принадлежащих к тетрагональной и гексагональной сингонии и обладающие анизотропией термического расширения.

Следует отметить также оригинальность решения проблемы поиска корреляций между изотропными в металле с кубической решеткой величинами ТКЛР и анизотропными упругими и прочностными свойствами усреднением последних по результатам их измерения в трех направлениях листа.

Практическая значимость работы.

Обнаруженные корреляционные зависимости ТКЛР с упругими прочностными свойствами позволяют выбрать наиболее рациональные способы оптимизации упругих и прочностных свойств сплавов, а также способы достижения требуемого баланса этих свойств в различных компонентах конструкций, прежде всего летательных аппаратов.

Для холоднокатаных Fe-Cr-Ni сталей с однофазной мартенситной структурой обнаружена обратная пропорциональность между периодами решетки и величинами ТКЛР, при этом для трип-стали ВНС9-Ш характерны максимальные значения периодов решетки и минимальные значения ТКЛР близкие к значениям ТКЛР тугоплавких металлов. Эти результаты могут быть использованы в качестве критерия отбора сталей с максимально выраженным трип-эффектом.

Полученные методом высокотемпературной рентгенографии значения ТКЛР в оксидных фазах многофазных магнетронных покрытий дают возможность прогнозирования поведения этих оксидов в многослойных покрытиях. Результаты диссертации используются в ООО Научно-технический центр «СИЛАТЕ» при выполнении работ по нанесению износостойких покрытий на оснастку и инструменты порошкового производства.

Достоверность результатов и выводов.

Обоснованность установленных в работе количественных корреляций между термическими, упругими и прочностными свойствами современных сплавов системы Al-Cu-Li не вызывает сомнений, поскольку автором тщательно и на современном методическом и научном уровнях проводится сопоставление экспериментальных значений этих свойств с учетом анизотропии упругих и прочностных свойств в листовых полуфабрикатах.

Достоверность метода оценки анизотропии характеристик ТКЛР для фаз с тетрагональной и гексагональной решетками обеспечивается использованием тензорного метода, который позволяет повысить точность оценки ТКЛР в направлениях осей «а» и «с» этих фаз.

Замечания по работе

1. В качестве научной новизны предложен тензорный подход к оценке ТКЛР для фаз с тетрагональной и гексагональной решетками и показано его

преимущество по сравнению с традиционным методом определения параметров «а» и «с» для каждой температуры рентгеновской съемкой с использованием двух разных рефлексов, однако, если выбрать рефлексы, каждый из которых зависит только от одного параметра «а» или «с» преимущество тензорного метода не так очевидно.

2. Использование оригинальной методики оценки количества интерметаллидных фаз в сплавах системы Al-Cu-Li позволило найти количественные корреляции фазового состава с упругими свойствами и сделать вывод, что влияние δ' -фазы на упругие свойства сопоставимо с T_1 -фазой, однако количественное соотношение их модулей Юнга не установлено, что снижает эффективность поиска сплавов с максимальными упругими свойствами.

3. В работе подчеркивается, что для многофазных сплавов эффективную величину ТКЛР нельзя оценивать исходя из принципа аддитивности, однако в работе нет экспериментальных подтверждений этого из-за отсутствия данных дилатометрии.

4. В автореферате (стр.19) и диссертации (стр. 107) в таблице приведены колонки для значений ТКЛР для осей «а», «b» и «с», при этом в таблице приведены данные для фаз с кубической, тетрагональной и гексагональной решетками, для которых не требуется колонка для оси «b». Вероятно, предполагалось присутствие фазы с ромбической решеткой, которую по какой-то причине оставили, а колонка осталась, также как упоминание о ромбической фазе на стр.8 автореферата.

Сделанные замечания имеют дискуссионный или уточняющий характер и не снижают общей высокой оценки диссертации. Диссертационная работа Быкадорова А.Н. выполнена на высоком научно-техническом уровне. Она представляет собой самостоятельную законченную научно-квалификационную работу, в которой решены важные задачи по формированию новых научных подходов к исследованию термических свойств Al-Cu-Li сплавов, трип-сталей и многофазных покрытий с целью прогнозирования и оптимизации структурно-фазового состояния и свойств этих материалов. Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на 9 научно-технических конференциях, опубликованы в 8 печатных работах, в том числе 2 статьях в ведущих

рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК и систему цитирования RSCI. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в авиакосмической технике и медицине. Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации.

По научному уровню полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор Быкадоров Артем Никитич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5. – Порошковая металлургия и композиционные материалы.

Отзыв рассмотрен на заседании кафедры «Термообработка и физика металлов»

ФГАОУ ВО Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

протокол № 11 от 16 ноября 2023 года. На заседании присутствовало 26 членов из 32. Результаты голосования: «за» - 26, против – нет, воздержавшихся - нет.

Зав. Кафедрой

«Термообработка и физика металлов»

д.т.н., профессор

Попов Артемий Александрович

620002, Уральский федеральный округ, Свердловская область, Екатеринбург, ул. Мира, 19

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Электронный адрес: <https://urfu.ru>

Телефон: +7 (343) 375-44-44