

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 539.12.04

ПОЛЯК Наталья Ипполитовна

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И МИКРОТВЕРДОСТЬ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И МЕДИ, ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ КРИПТОНА

01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Минск –2006

Работа выполнена в Белорусском государственном университете

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, доцент
Жукова Светлана Ивановна,
Белорусский государственный университет,
кафедра физики твердого тела.

Официальные оппоненты – доктор физико-математических наук, профессор
Квасов Николай Трофимович
Учреждение образования «Белорусский
государственный университет
информатики и радиоэлектроники»,
кафедра общей физики;

кандидат физико-математических наук, доцент
Поплавский Василий Владимирович,
Учреждение образования
«Белорусский государственный
технологический университет»,
кафедра физики.

Оппонирующая организация – Государственное научное учреждение
«Объединенный институт физики твердого
тела и полупроводников
Национальной Академии наук Беларуси».

Защита состоится 23 июня 2006 г. в 14 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.16 при Белорусском государственном университете (220030, г. Минск, пр-т Независимости, 4, Белгосуниверситет, ауд. 319 физического факультета, тел. ученого секретаря: 209-55-58).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан « 19 » мая 2006 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций,
доцент

В.Ф. Стельмах

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Одним из наиболее перспективных классов металлических материалов, обладающих в ряде случаев уникальными свойствами, являются дисперсионно твердеющие сплавы. Обладая повышенными технологическими характеристиками, эти сплавы нашли широкое применение в авиастроении и технике, в том числе атомной и космической. Актуальным научным направлением исследований является радиационная физика дисперсионно твердеющих сплавов. В связи с развитием атомной техники особое значение приобрело решение проблем радиационной стабильности их структурно-фазового состояния и свойств, необходимость повышения и прогнозирования которой обусловило проведение имитационных экспериментов с использованием пучков высокоэнергетических ионов. Такие эксперименты позволяют изучать радиационные эффекты, ожидаемые в условиях работы ядерных реакторов. Важным является и вопрос о стабильности дисперсионно твердеющих сплавов, используемых в космической технике и авиастроении.

Высокоэнергетическая ионная имплантация (ВЭИИ) представляет практический интерес также и в качестве самостоятельного метода обработки материалов, поскольку модифицируются поверхностные слои толщиной на несколько порядков выше по сравнению с имплантацией ионов низких и средних энергий.

Несмотря на достаточно большое количество публикаций по исследованию структурно-фазовых превращений в дисперсионно твердеющих сплавах под воздействием облучения высокоэнергетическими частицами, необходимо отметить, что целостная картина этих изменений пока далека от понимания, что связано с различными условиями проведения экспериментов (температура, доза, вид излучения), многообразием исследуемых материалов и, кроме того, в большинстве работ получены только качественные результаты. Из опубликованных данных следует, что при ВЭИИ, нейтронном и электронном облучениях стимулируются процессы распада пересыщенного твердого раствора с зарождением включений новой фазы, происходит ускорение этого процесса по сравнению с термической обработкой, наблюдается изменение формы включений, их растворение. Вместе с тем число исследований с использованием пучков ионов МэВ-ных энергий весьма ограничено. Известно лишь несколько работ, проведенных при высоких температурах и (или) дозах имплантации на сталях, сплавах на основе железа, никеля, ванадия. Необходимо отметить, что в экспериментах по высокотемпературному облучению трудно разделить обычные термические, радиационно-стимулированные и радиационно-индуцированные процессы, в связи с чем особую значимость приобретают исследования структурно-фазовых превращений при низкотемпературном (~ 300 К) облучении, когда термическими процессами можно пренебречь.

Сложные структурно-фазовые превращения, развивающиеся в дисперсионно твердеющих сплавах при облучении, обуславливают изменение их свойств. Особый интерес представляет исследование прочностных свойств та-

ких сплавов, поскольку их изменение при ВЭИИ обусловлено не только процессами дефектообразования, но главным образом эволюцией структурно-фазового состояния. Имеющиеся литературные данные по модификации физико-механических свойств дисперсионно твердеющих сплавов не всегда сопоставимы и единый подход к описанию механизмов, контролирующих их изменение, отсутствует.

Ранее на кафедре физики твердого тела Белгосуниверситета исследовались структурно-фазовые превращения и изменения прочностных свойств дисперсионно твердеющих алюминиевых сплавов (Д16, АК4, АМг) в результате имплантации малых доз ионов неона с энергией 26,7 МэВ при температурах, близких к комнатной. Был обнаружен эффект начального разупрочнения, степень которого уменьшалась с ростом дозы имплантации. Поскольку каждый из сплавов находился в различном исходном структурно-фазовом состоянии, целесообразно исследовать один сплав с различным фазовым составом. Учитывая сложность процессов, происходящих при взаимодействии высокоэнергетических частиц с многокомпонентными дисперсионно твердеющими сплавами, необходимо исследование бинарных сплавов в качестве модельных.

Полученные данные будут способствовать развитию представлений о закономерностях и механизмах структурно-фазовых изменений в дисперсионно твердеющих сплавах, необходимых при разработке технологических процессов создания материалов, применяемых в условиях радиационного воздействия.

Связь работы с крупными научными программами, темами. Диссертационная работа выполнена в Белорусском государственном университете в рамках республиканских научно-исследовательских программ “Структура”: “Исследование структур и фазовых превращений в поверхностных слоях металлов, сплавов и магнетиков при воздействии концентрированных потоков энергии” (1995-2000 г.г.); “Кристаллофизика”: “Изменение структурно-фазового состояния металлов и сплавов в неравновесных условиях” (2001-2005 г.г.), а также НИР, выполняемых учреждениями и организациями Республики Беларусь совместно с Объединенным институтом ядерных исследований (ОИЯИ), г. Дубна, Россия: “Радиационные эффекты и модификация материалов, радиологические и радиоизотопные исследования на ускорителях ЛЯР” (1996-2005 г.г.).

Цель исследования. Целью работы являлось установление закономерностей изменения структуры, фазового состава и микротвердости дисперсионно твердеющих алюминиевых и медного сплавов в результате имплантации малых доз ($\sim 10^{14}$ см⁻²) высокоэнергетических ионов криптона в зависимости от исходного структурно-фазового состояния.

В соответствии с поставленной целью решались следующие основные задачи:

- определение влияния ВЭИИ на микротвердость и параметры тонкой структуры сплавов в различных исходных структурно-фазовых состояниях;
- изучение эволюции структурно-фазового состояния сплавов при ВЭИИ в зависимости от типа упрочняющих включений;

– установление закономерностей изменения микротвердости и параметров тонкой структуры бериллиевой бронзы при пострадиационном изотермическом отжиге.

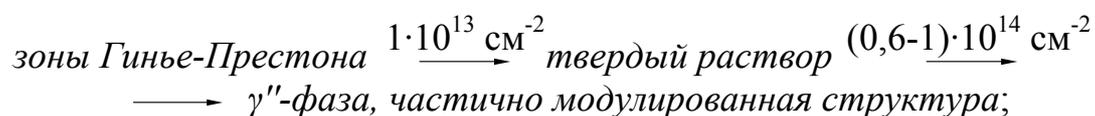
Объект исследования. В качестве объектов исследования выбраны дисперсионно твердеющие сплавы на основе алюминия (Al-4%Cu, Д16) и меди (БрБ2). Выбор этих сплавов обусловлен тем, что они являются типичными представителями дисперсионно твердеющих сплавов, широко используемых в промышленности.

Предмет исследования. Предметом исследования являются структурно-фазовое состояние алюминиевых и медных сплавов до и после облучения высокоэнергетическими ионами, кинетика старения сплава БрБ2 при пострадиационном изотермическом отжиге, микротвердость сплавов.

Методология и методы проведенного исследования. Сложный характер структурно-фазовых превращений в дисперсионно твердеющих сплавах обусловил применение комплекса современных методов исследования структуры, фазового состава, механических свойств. Решение поставленных задач осуществлялось с помощью следующих методов исследования: просвечивающей электронной микроскопии для изучения структуры и фазового состава модифицированных слоев; растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа для анализа топографии и элементного состава приповерхностных слоев; рентгеноструктурного анализа тонкой структуры и фазового состава имплантированных слоев; металлографического анализа микроструктуры; измерения величины микротвердости; использования программы SRIM для построения концентрационных профилей имплантированных ионов и пространственных распределений потерь энергии ионов при прохождении через мишень; пострадиационного изотермического отжига для исследования кинетики повторного старения.

Научная новизна и значимость полученных результатов. В результате выполнения работы впервые проведено комплексное исследование влияния имплантации малых доз ($\sim 10^{14}$ см⁻²) высокоэнергетических ионов криптона при температурах близких к комнатной на структуру, фазовый состав и микротвердость дисперсионно твердеющих алюминиевых (Д16, Al-4вес.% Cu) и медного (БрБ2) сплавов, находящихся в различных исходных структурно-фазовых состояниях.

- Впервые установлены обусловленные структурно-фазовыми превращениями особенности и закономерности изменения микротвердости сплавов при имплантации в зависимости от их исходного состояния.
- Впервые показано, что изменение структурно-фазового состояния бериллиевой бронзы при имплантации происходит по следующим схемам: для сплава, содержащего зоны Гинье-Престона:



для сплава с модулированной структурой:

зоны Гинье-Престона, γ' -фаза, модулированная структура $(1-6) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$
 $\longrightarrow \gamma'$ -фаза, модулированная структура $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \longrightarrow \gamma''-, \gamma'-, \gamma\text{-фазы}.$

- Впервые обнаружено формирование модулированной структуры в бериллиевой бронзе при имплантации.
- Впервые апробирована методика двухступенчатого изотермического отжига для анализа модифицированного имплантацией фазового состава бериллиевой бронзы.

Практическая, экономическая и социальная значимость полученных результатов. Результаты комплексного исследования, полученные в работе, дают важную информацию, развивающую и углубляющую знания о механизмах структурно-фазовых превращений в модельных (бинарных) и технических (сложнолегированных) стареющих сплавах, что позволяет прогнозировать изменение их свойств в условиях воздействия частиц высоких энергий.

Установленные закономерности изменения структуры, фазового состава и механических свойств дисперсионно твердеющих сплавов при высокоэнергетической ионной имплантации позволяют усовершенствовать технологии получения материалов с заданными свойствами, используемых в машиностроении (сплавы на основе меди и алюминия), реакторной, авиационной и космической технике (сплавы на основе алюминия). Сочетание термической обработки и ВЭИИ позволяет оптимизировать имеющиеся традиционные виды обработки дисперсионно твердеющих конструкционных материалов.

Полученные результаты исследований структурно-фазовых превращений в технически важных сплавах при ВЭИИ позволяют сократить объем дорогостоящих и, в то же время, вредных для здоровья человека реакторных испытаний.

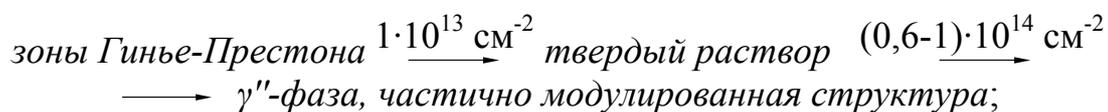
Результаты комплексного исследования, полученные в работе, представляют научный и практический интерес для научных организаций и промышленных предприятий, специализирующихся в области радиационного материаловедения, термической обработки, физики металлов.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

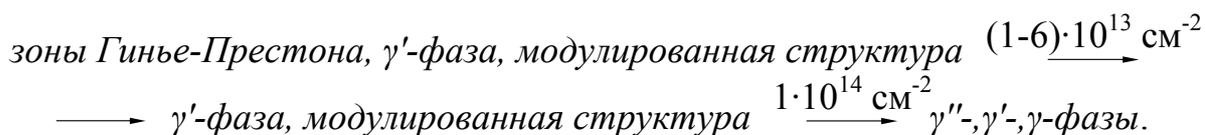
1. Особенности и закономерности изменения микротвердости дисперсионно твердеющих алюминиевых (Д16, Al-4вес.% Cu) и медного (БрБ2) сплавов при имплантации малых доз ($\sim 10^{14} \text{ см}^{-2}$) высокоэнергетических ионов криптона ($E=245 \text{ МэВ}$) в зависимости от исходного структурно-фазового состояния, заключающиеся в начальном уменьшении микротвердости и последующем увеличении ее значения с ростом дозы имплантации для сплавов, содержащих зоны Гинье-Престона, и увеличении микротвердости с ростом дозы имплантации для сплавов, содержащих равновесные включения упрочняющих фаз, что обусловлено структурно-фазовыми превращениями, приводящими к изменению величины микронапряжений в кристаллической решетке матрицы сплава.

2. Установленные последовательности структурно-фазовых превращений, обуславливающие изменение микротвердости бериллиевой бронзы БрБ2 с различным исходным состоянием при имплантации высокоэнергетических ионов Кг:

для сплава, содержащего зоны Гинье-Престона:



для сплава с модулированной структурой:



3. Формирование модулированной структуры в приповерхностных слоях толщиной несколько микрометров дисперсионно твердеющего сплава БрБ2 при имплантации малых доз высокоэнергетических ионов Кг, заключающееся в радиационно-стимулированном распаде пересыщенного твердого раствора с выделением периодически расположенных упрочняющих включений, что позволяет реализовывать системы с повышенной прочностью, коррозионной стойкостью, износостойкостью.

Личный вклад соискателя. Работа по подготовке образцов исследуемых сплавов, исследованию структуры, фазового состава, измерению микротвердости, и изучению кинетики их старения при пострadiационном отжиге, обработка полученных результатов и их обсуждение были проделаны соискателем. Работа выполнялась под научным руководством кандидата физико-математических наук С.И. Жуковой, которая сформулировала цель и задачи исследования, и с которой обсуждались полученные результаты. В.М. Анищик также принимал участие в обсуждении результатов. Л.А. Васильева оказала методическую помощь при получении электронно-микроскопических данных. А.Ю. Дидык и В.А. Скуратов (ОИЯИ, г. Дубна) оказали помощь в проведении имплантации.

Апробация результатов диссертации. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах и конференциях:

- III Международной конференции «Физика плазмы и плазменные технологии» (Минск, 2000 г.);
- VI Межгосударственном семинаре «Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий» (Обнинск, 2001 г.);
- VI – X Республиканских конференциях студентов, магистрантов и аспирантов «Физика конденсированных сред» (Гродно, 1998 – 2002 г.г.);
- 56-ой международной научно-технической конференции профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов БНТУ (Минск, 2003 г.);

- XIII Российском симпозиуме по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел (Черноголовка, 2003 г.);
- XXIX, XXXIII - XXXV Международных конференциях по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 1999 г., 2003 – 2005 г.г.);
- IV–VI Международных конференциях «Взаимодействие излучений с твердым телом» (Минск, 2001 г., 2003 г., 2005 г.);
- Международной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела» (Минск, 2005 г.).

Результаты диссертационной работы обсуждались на научных семинарах кафедры физики твердого тела Белгосуниверситета (2003 г., 2005 г.).

Опубликованность результатов. Результаты исследований, приведенные в диссертационной работе, опубликованы в 24 научных работах, из которых 6 статей в научных журналах и изданиях, 7 статей в сборниках научных трудов и материалов конференций, 11 тезисов докладов конференций. Общий объем опубликованных материалов составляет 68 страниц.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав основного текста, заключения, списка использованных источников. Полный объем диссертации составляет 129 страниц. Диссертация содержит 38 рисунков, представленных на 26 страницах, 14 таблиц, представленных на 5 страницах. Список цитируемой литературы содержит 198 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении и общей характеристике работы обоснованы актуальность темы диссертации, сформулированы цель, задачи работы и основные положения, выносимые на защиту, определены новизна, научная и практическая значимость результатов.

Первая глава носит обзорный характер. В ней изложены литературные данные, посвященные исследованию влияния облучения высокоэнергетическими частицами на дефектообразование, структурно-фазовое состояние и физико-механические свойства металлов и сплавов. Отмечена малочисленность публикаций, посвященных ВЭИИ в дисперсионно твердеющие сплавы. Показано, что имеющиеся данные не всегда сопоставимы в связи с различными условиями проведения экспериментов (температура, доза), многообразием исследуемых материалов. В большинстве работ получены только качественные результаты. Общим для этих работ является проведение экспериментов в основном при высоких температурах и (или) дозах имплантации.

Во второй главе приводится описание объектов и рассмотрены методы их исследования, примененные в диссертационной работе.

Материалом для исследования служили дисперсионно твердеющие сплавы на основе алюминия (Д16, Al-4%Cu) и меди (БрБ2). Сплавы Д16 и БрБ2 изготавливались в заводских условиях, сплав Al-4%Cu выплавлялся в лабораторных

условиях. Для получения сплава Al-4%Cu использовался алюминий особой чистоты (марки А999) и электролитическая медь. Рабочие поверхности образцов механически шлифовались, а затем подвергались электрополировке.

С целью получения различного фазового состава сплавы подвергались термообработке. Закалка сплавов Д16, Al-4%Cu и БрБ2 проводилась при температурах $T=763 \pm 10$ К, 813 ± 10 К и 1053 ± 10 К, соответственно. Формирование зон Гинье-Престона (ГП) в сплаве Д16 осуществлялось при $T=300$ К (3 мес), в сплаве БрБ2 – при $T=473 \pm 10$ К (1 час). Включения промежуточных фаз в сплавах Д16 и БрБ2 создавались при $T=458 \pm 10$ К (10 часов) и 623 ± 10 К (1 час), соответственно. Для получения включений равновесных фаз образцы сплавов Д16 и Al-4%Cu выдерживались, соответственно, при $T=458 \pm 10$ К (80 час) и 776 ± 10 К (8 час).

Облучение образцов ионами Кг с энергией 245 МэВ в интервале доз $5 \cdot 10^{12}$ – $3 \cdot 10^{14}$ см⁻² (алюминиевые сплавы) и $1 \cdot 10^{13}$ – $1 \cdot 10^{14}$ см⁻² (медный сплав) проводилось в ЛЯР ОИЯИ (г. Дубна) на ускорителе У-400 ($T_{\text{импл}} \approx 300$ К). Расчет пространственных распределений имплантированных ионов и потерь энергии выполнялся с помощью компьютерной программы SRIM. Проективный пробег ионов Кг в сплаве БрБ2 составил 13 мкм, в сплавах Д16 и Al-4%Cu – 28 мкм.

С помощью просвечивающего электронного микроскопа JEM-200 (при напряжении 200 кВ) были изучены структура и фазовый состав модифицированных слоев. Одностороннее электролитическое утонение фольг осуществлялось струйным методом. Для анализа топографии и элементного состава слоев использовался растровый электронный микроскоп LEO 1455 VP с рентгеноспектральным микроанализатором RÖNTEC. Рентгеноструктурный анализ тонкой структуры и фазовый анализ имплантированных слоев выполнены на дифрактометре ДРОН-3 в медном излучении. Измерения величины микротвердости по Виккерсу проводились на микротвердомере ПМТ-3. Для исследования кинетики повторного старения проводился изотермический отжиг сплава БрБ2: при $T=623$ К (сплав с зонами Гинье-Престона) и $T=673$ К (сплав с включениями промежуточных фаз). Суммарное время отжига составило 60 мин, при этом измерялась микротвердость и определялись параметры тонкой структуры.

В третьей главе представлены результаты исследования влияния имплантации на параметры тонкой структуры и микротвердость сплавов на основе алюминия – Д16 и Al-4%Cu.

Обнаружено, что микротвердость сплава Д16, содержащего зоны ГП, после имплантации изменяется немонотонно: после дозы $1 \cdot 10^{14}$ см⁻² ее значение уменьшается, после $3 \cdot 10^{14}$ см⁻² - возрастает. Величина уширения дифракционной линии 422 также сначала уменьшается, а затем возрастает (рис. 1а).

Микротвердость и величина уширения дифракционной линии 422 сплава с равновесными включениями после имплантации монотонно увеличиваются с ростом дозы имплантации (рис. 1б).

Рентгеноструктурный анализ сплава Д16, содержащего зоны ГП, показал, что при имплантации до дозы $1 \cdot 10^{13}$ см⁻² за уширение дифракционной линии

422 ответственны только микронапряжения, при этом их величина уменьшается. С увеличением дозы до $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ наряду с микронапряжениями за уширение дифракционной линии 422 ответственны также и области когерентного рассеяния, но их вклад в уширение невелик. Имплантация до дозы $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ приводит к возрастанию микронапряжений.

Нарушение исходного структурно-фазового состояния стареющих сплавов при ВЭИИ приводит к изменению их прочностных свойств, при этом результирующий эффект имплантации зависит от баланса конкурирующих процессов, приводящих к упрочнению либо разупрочнению. Так, растворение первичных дисперсных включений приводит к разупрочнению, в то же время образование новых дисперсных включений и генерация радиационных дефектов способствуют упрочнению.

Первоначальное уменьшение микротвердости сплава Д16, содержащего зоны ГП, при имплантации обусловлено стимулированными имплантацией процессами растворения зон ГП в результате замещающих столкновений, последующее увеличение ее значения - радиационно-стимулированными процессами старения, приводящими к образованию новых зон ГП либо высокодисперсных включений промежуточных фаз.

Увеличение микротвердости сплава Д16 с включениями равновесных фаз

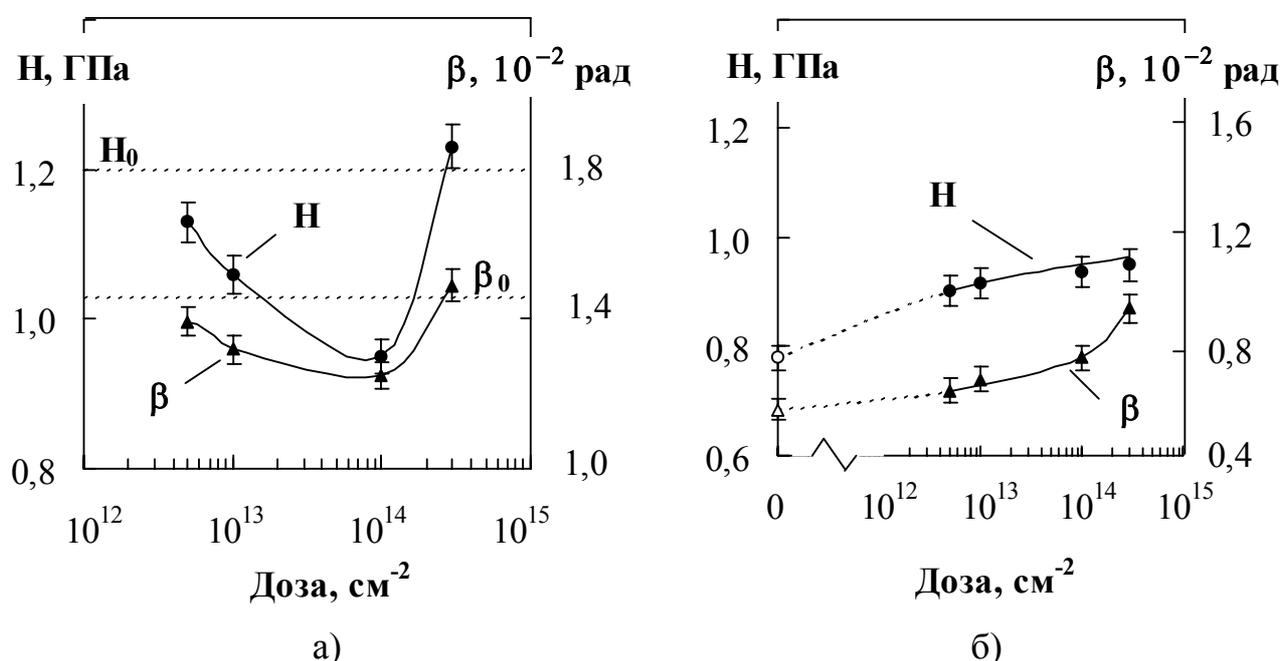


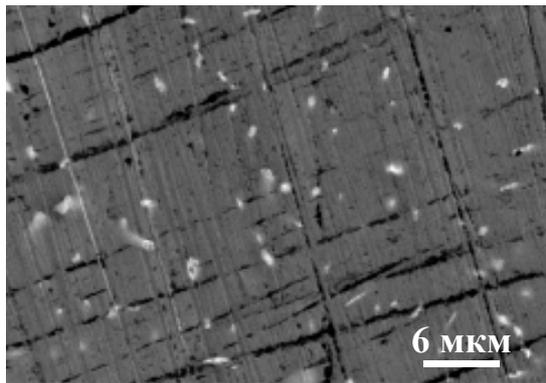
Рис. 1. Дозовые зависимости микротвердости H и уширения β_{422} сплава Д16 с зонами ГП (а) и с включениями равновесных фаз (б)

при имплантации связано с процессами радиационно-стимулированного частичного растворения включений, при этом их дисперсность увеличивается. Подтверждением этому служит уменьшение интенсивности принадлежащих включениям дифракционных линий. Обогащение матричного твердого раствора медью и магнием способствует развитию процессов старения сплава с обра-

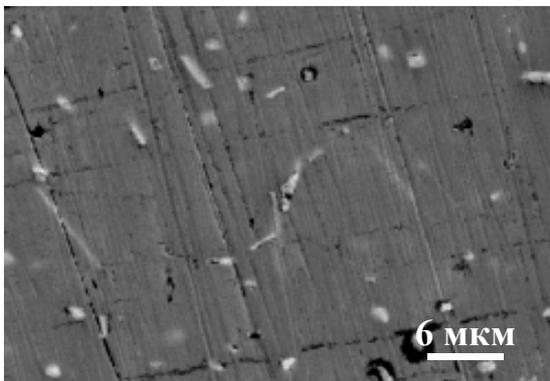
зованием новых дисперсных включений, при этом величина микронапряжений в матрице сплава повышается, что приводит к росту величин β и H (рис. 1б).

Микротвердость двойного дисперсионно твердеющего сплава Al-4вес.%Cu, как и многокомпонентного сплава Д16 с включениями равновесных фаз, в результате имплантации монотонно увеличивается.

Обнаружено, что в исходном состоянии сплав Al-4вес.%Cu содержит равновесные включения θ -фазы (CuAl_2) сферической (средний размер ~ 1 мкм) и пластинчатой ($\sim 4...7$ мкм) формы (рис. 2а). Имплантация приводит к уменьшению общего числа включений и их объемной доли, в сплаве появляются включения с размерами 7-9 мкм (рис. 2б).



а)



б)

Рис. 2. Микроструктура сплава Al-4 вес.% Cu до (а) и после имплантации 10^{14} см $^{-2}$ (б)

увеличению микротвердости сплава.

Для описания изменения структурно-фазового состояния дисперсионно твердеющих сплавов при высокоэнергетической имплантации ионов Kr при комнатной температуре в зависимости от типа упрочняющих сплав включений предлагается модель, учитывающая конкурирующие процессы фазовых изменений при малых дозах имплантации ($\sim 10^{14}$ см $^{-2}$). Фазовые превращения, стимулированные имплантацией, вызывают изменение величины микронапряжений в кристаллической решетке матрицы сплава и обуславливают изменение его микротвердости: растворение включений по механизму замещающих

При имплантации происходит радиационно-стимулированное частичное растворение включений θ -фазы в результате динамических перестроек при развитии каскада смещений во включении. Значительное уменьшение интенсивности дифракционных линий, соответствующих θ -фазе, после имплантации подтверждает ее частичное растворение.

Растворение θ -фазы, приводящее к пересыщению α -твердого раствора сплава и его распаду, и рост включений являются конкурирующими процессами, ответственными за изменение прочностных свойств: первый процесс приводит к его упрочнению, второй - к разупрочнению. При используемых нами режимах имплантации превалирует эффект растворения включений. Пересыщение матричного твердого раствора атомами меди способствует развитию радиационно-стимулированных процессов старения с образованием мелкодисперсных упрочняющих фаз, наличие полей упругих напряжений вокруг которых приводит к

столкновений, приводящее к пересыщению матричного твердого раствора легирующими элементами, и распад твердого раствора с выделением дополнительных дисперсных включений. Протекание этих процессов обусловлено характерным для высокоэнергетической ионной имплантации высоким уровнем возбуждения электронной подсистемы, связанным с увеличением сечения взаимодействия в процессе электронного торможения, что стимулирует генерацию вторичных высокоэнергетических электронов.

В четвертой главе приведены результаты исследования структурно-фазового состояния и микротвердость бериллиевой бронзы БрБ2, имплантированной в различных исходных состояниях.

Исследования с помощью просвечивающей электронной микроскопии показали, что после закалки при $T=1053$ К и старения при 473 К в течение 1 ч в α -

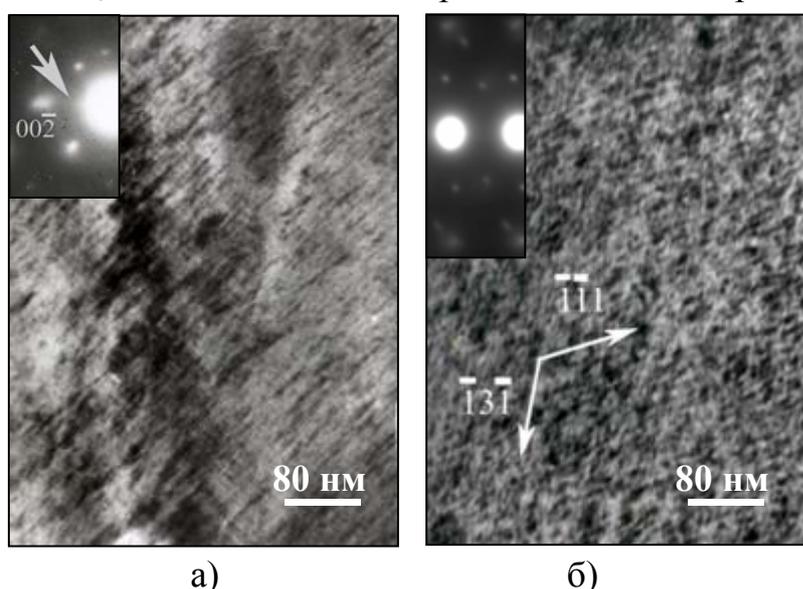


Рис. 3. Электронные микрофотографии структуры бериллиевой бронзы БрБ2 и соответствующие им КМД до (а) и после имплантации дозой $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$

твердом растворе содержатся тонкие (1-2 атомных слоя) зоны ГП, когерентно связанные с матрицей сплава по плоскостям $\{001\}$, при этом на светлоскопических изображениях наблюдается структура типа “твид” (рис. 3а), на картинах микродифракции (КМД) присутствует тонкий тяж вдоль направлений $\langle 001 \rangle$ (рис. 3а, вставка). После имплантации в интервале доз $6 \cdot 10^{13} \dots 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ обнаружено образование периодически расположенных включений вдоль направлений $[\bar{1}\bar{1}]_{\alpha}$ и $[\bar{1}\bar{3}]_{\alpha}$ в плоскости изображения $(112)_{\alpha}$, т.е. образование модулированной структуры (МС) (рис. 3б). Индексирование КМД (рис. 3б, вставка) показало, что периодически расположенные включения соответствуют γ' -фазе.

Электронно-микроскопические исследования сплава БрБ2, закаленного при $T=1053$ К и состаренного при $T=623$ К в течение 1 ч, показали, что в α -твердом растворе присутствуют зоны ГП и γ' -фаза, для сплава характерна МС (рис. 4а). О наличии зон ГП свидетельствует тяж на КМД вдоль направлений $\langle 001 \rangle$, о наличии γ' -фазы – экстрарефлексы в положениях $2/3$ между отражениями типа $000 - 002$, $002 - 004$ (рис. 4а, вставка). После имплантации $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ в матрице сплава обнаружена γ' -фаза, о чем свидетельствуют

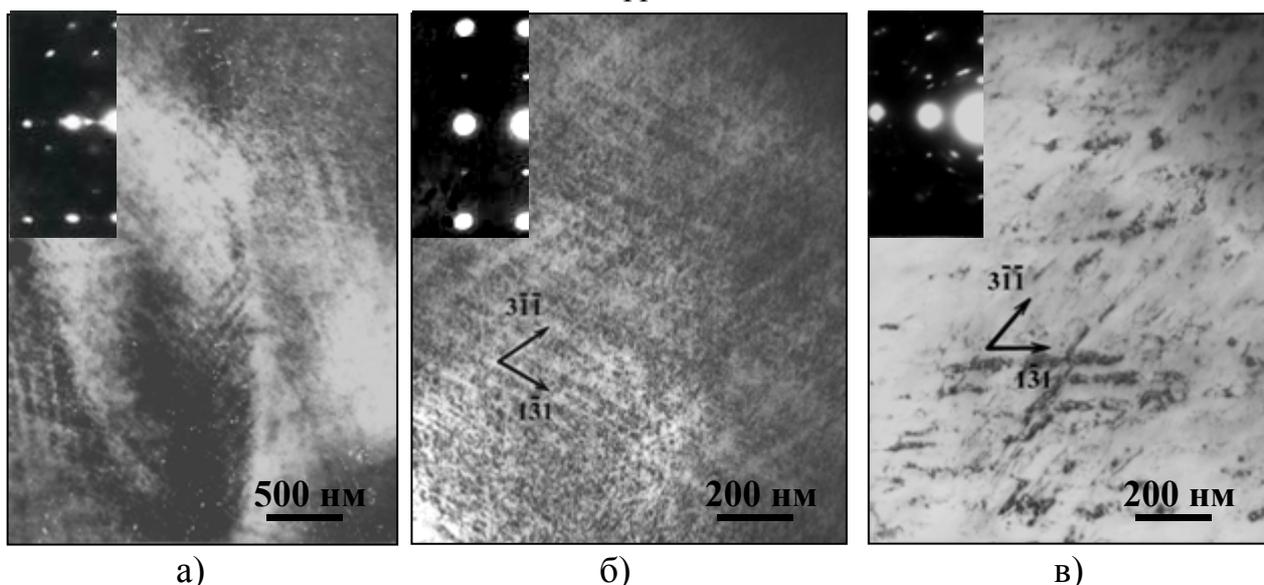


Рис. 4. Электронные микрофотографии структуры бериллиевой бронзы БрБ2 и соответствующие им КМД до (а) и после имплантации дозами $6 \cdot 10^{13}$ (б) и 10^{14} (в) см^{-2}

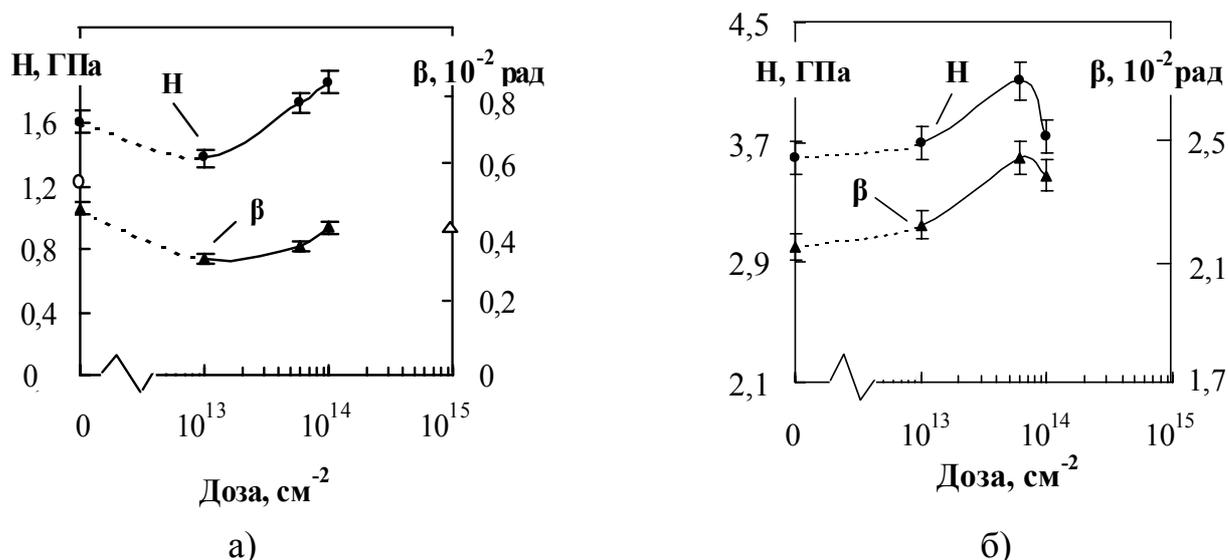


Рис. 5. Дозовые зависимости микротвердости H и физического уширения β_{222} сплава БрБ2 с зонами ГП (а) и с МС (б) (\triangle , \circ - значения H и β для закаленного сплава)

принадлежащие ей на КМД экстра-рефлексы (рис. 4б, вставка). После имплантации $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ на светлопольных изображениях обнаружена фрагментация концентрационных полос (рис. 4в), на КМД выявлены экстра-рефлексы, принадлежащие γ'' -, γ' - и γ -фазам (рис. 4в, вставка).

Измерения микротвердости сплава БрБ2, содержащего зоны ГП, показали, что после имплантации ионов Kr дозой $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ее значение уменьшается, после дозы $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ - увеличивается. С помощью рентгеноструктурного анализа обнаружено, что величина уширения дифракционной линии 222 при этом уменьшается, а затем возрастает (рис. 5а).

После имплантации ионов Кг дозой $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ в сплав БрБ2 с модулированной структурой, содержащий зоны ГП и включения γ' -фазы, микротвердость увеличивается, после дозы $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ уменьшается. Величина уширения дифракционной линии 222 при этом возрастает, а затем уменьшается (рис. 5б). Таким образом, при ВЭИИ наблюдается хорошее согласие между изменениями физического уширения дифракционной линии 222 и микротвердостью сплава.

В качестве метода структурного анализа модифицированного имплантацией дисперсионно твердеющего сплава предложен и апробирован двухступенчатый отжиг с промежуточной имплантацией, при этом температура первой ступени устанавливается равной температуре формирования фазового состава сплава, второй – превышает температуру сольвуса образовавшихся при имплантации фаз. Для обнаружения особенностей в кинетике старения при повторном отжиге сплава в исходном состоянии и после имплантации таких, как частичный возврат свойств, изменение скорости старения, необходимо исследование закаленного сплава.

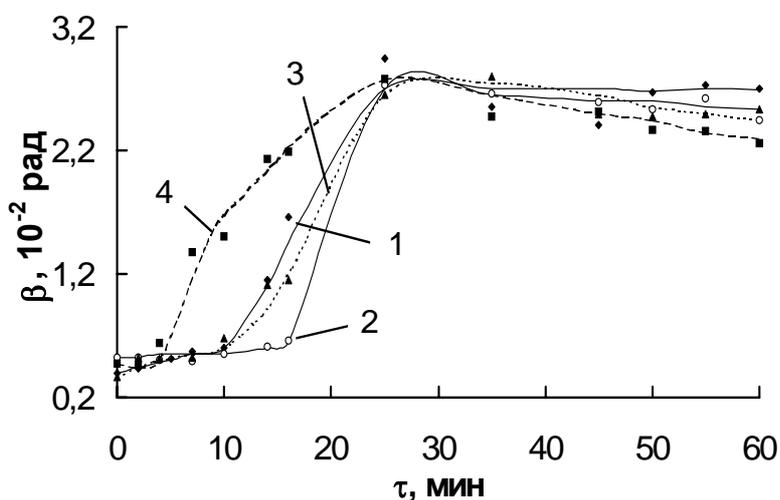
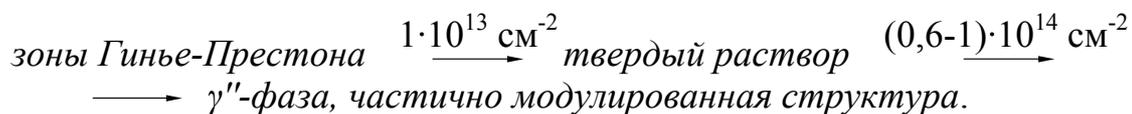


Рис. 6. Изменение физического уширения дифракционной линии 222 матрицы сплава БрБ2 от времени выдержки при пострadiационном отжиге ($T=623 \text{ К}$): 1 - закаленный, 2 - неимплантированный, 3 - $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, 4 - $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$

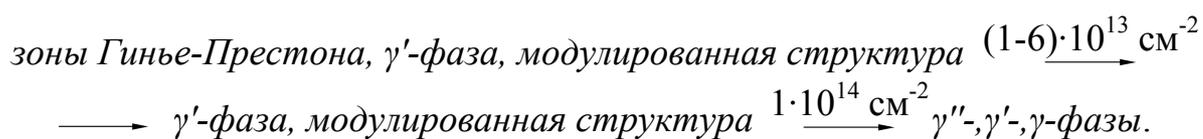
Последующее увеличение микротвердости с ростом дозы имплантации связано с увеличением напряженного состояния матрицы в результате радиационно-стимулированных процессов старения, приводящих к выделению γ'' -фазы и формированию МС. Изменение структурно-фазового состояния при имплантации происходит по следующей схеме:



С помощью электронно-микроскопических исследований, рентгеноанализа тонкой структуры сплава и анализа кинетики повторного старения установлено, что начальное уменьшение микротвердости сплава, содержащего зоны ГП, обусловлено растворением зон ГП при имплантации и уменьшением создаваемых ими микронапряжений. Подтверждением этому служит совпадение кривых отжига уширения дифракционной линии 222 (рис. 6), микротвердости и постоянной решетки сплава в закаленном состоянии.

Для бериллиевой бронзы характерно формирование МС в термических условиях, поскольку основа сплава – медь – является упруго анизотропной. Этот процесс происходит на стадии коагуляции когерентных выделений второй фазы с большим объемным несоответствием кристаллических решеток выделения и матрицы сплава. В настоящей работе впервые обнаружено формирование МС в сплаве БрБ2 при высокоэнергетической ионной имплантации, что имеет практическое значение для создания систем с широкими приповерхностными слоями, обладающими повышенной прочностью, коррозионной стойкостью, износостойкостью.

Измерения микротвердости и электронно-микроскопические исследования сплава с модулированной структурой показали, что увеличение микротвердости и уширения дифракционной линии 222 при имплантации до $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ обусловлено радиационно-стимулированными процессами достаривания сплава, при этом МС сохраняется. Уменьшение величин H и β после имплантации $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ вызвано фрагментацией концентрационных полос в результате выделения равновесной γ -фазы. Изменение структурно-фазового состояния сплава при имплантации происходит по следующей схеме:



При исследовании кинетики старения бериллиевой бронзы, находящейся на фазовой стадии старения, обнаружены особенности изменения ее свойств (микротвердости, физического уширения дифракционных линий и параметра решетки), проявляющиеся в частичном возврате и относительной стабильности свойств в различных временных интервалах. Характер изменения исследованных свойств имплантированного сплава отличается от такового для неимплантированного сплава, что обусловлено различным структурно-фазовым состоянием, созданным при ВЭИИ.

Таким образом, модель изменения структурно-фазового состояния в дисперсионно твердеющих сплавах при высокоэнергетической имплантации ионов Кг при комнатной температуре и малых дозах имплантации расширена и на дисперсионно твердеющий медный сплав БрБ2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые обнаружено, что после высокоэнергетической имплантации ионов Кг ($E=245 \text{ МэВ}$) в дисперсионно твердеющий алюминиевый сплав Д16, содержащий зоны Гинье-Престона, дозовые зависимости его микротвердости и уширения дифракционной линии 422 немонотонны: микротвердость после дозы $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ уменьшается от исходного значения 1,20 до 0,95 ГПа, с увеличением дозы до $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ – возрастает до 1,25 ГПа, значение уширения дифракционной линии уменьшается от 14,6 до 12,5 мрад, а затем возрастает до 14,9 мрад.

Для сплава с включениями S- и θ -фаз при имплантации значение микротвердости увеличивается от исходного 0,78 до 0,96 ГПа, значение уширения дифракционной линии – от 5,7 до 9,5 мрад. Изменение микротвердости и уширения дифракционной линии 422 сплава коррелируют друг с другом. Установлено, что уширение дифракционной линии 422 обусловлено микронапряжениями в кристаллической решетке матрицы сплава [1, 7, 8, 15-19].

2. Обнаружено, что после имплантации ионов Kг до дозы $1 \cdot 10^{14}$ см⁻² в сплав Al-4вес.%Cu, содержащий включения θ -фазы, объемная доля включений и интенсивность соответствующих им дифракционных линий уменьшается. Микротвердость сплава изменяется от исходного значения 0,43 до 0,55 ГПа. Микротвердость двойного сплава Al-4вес.%Cu, как и многокомпонентного сплава Д16 с включениями S- и θ -фаз, увеличивается с ростом дозы имплантации [9,20].

3. На основании экспериментальных данных развита модель изменения структурно-фазового состояния дисперсионно твердеющих сплавов при высокоэнергетической имплантации ионов Kг при комнатной температуре в зависимости от типа упрочняющих сплав включений. Модель учитывает конкурирующие процессы фазовых изменений при малых дозах имплантации ($\sim 10^{14}$ см⁻²), вызывающих изменение величины микронапряжений в кристаллической решетке матрицы сплава и обуславливающих изменение микротвердости: растворение включений по механизму замещающих столкновений, приводящее к пересыщению матричного твердого раствора легирующими элементами, и распад твердого раствора с выделением дополнительных дисперсных включений. Протекание этих процессов обусловлено характерным для высокоэнергетической ионной имплантации высоким уровнем возбуждения электронной подсистемы, связанным с увеличением сечения взаимодействия в процессе электронного торможения и генерацией вторичных высокоэнергетических электронов [1, 7-9, 15-20].

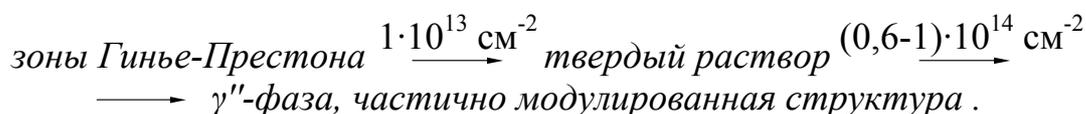
4. Впервые обнаружено, что микротвердость дисперсионно твердеющего медного сплава БрБ2, содержащего зоны Гинье-Престона, в результате имплантации ионов Kг дозой $1 \cdot 10^{13}$ см⁻² уменьшается от исходного значения 1,61 до 1,38 ГПа, при увеличении дозы до $1 \cdot 10^{14}$ см⁻² ее значение возрастает до 1,86 ГПа.

Имплантация $6 \cdot 10^{13}$ см⁻² ионов Kг в сплав БрБ2 с модулированной структурой, содержащий зоны Гинье-Престона и включения γ' -фазы, приводит к возрастанию микротвердости от 3,59 до 4,13 ГПа, при увеличении дозы до $1 \cdot 10^{14}$ см⁻² ее значение уменьшается до 3,70 ГПа.

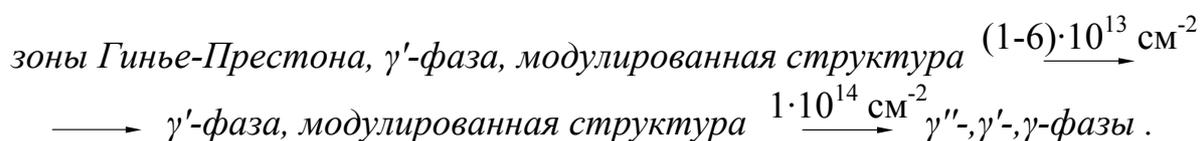
Обнаружено, что изменение уширения дифракционной линии 222 коррелирует с изменением микротвердости [2, 5, 10, 21, 23].

5. Впервые установлено, что начальное уменьшение микротвердости при имплантации сплава БрБ2, содержащего зоны Гинье-Престона, обусловлено их растворением, что подтверждается совпадением кривых отжига микротвердости, уширения дифракционной линии 222 и параметра кристаллической решетки матрицы сплава в закаленном состоянии и сплава, содержащего зоны Гинье-Престона, имплантированного дозой $1 \cdot 10^{13}$ см⁻². Последующее увеличение мик-

ротвердости вызвано образованием включений γ'' -фазы и формированием частично модулированной структуры, проявляющейся в периодическом расположении включений γ'' -фазы вдоль направлений $[\bar{1}\bar{1}1]$ и $[\bar{1}\bar{3}\bar{1}]$ в плоскости изображения $(112)_\alpha$. Изменение структурно-фазового состояния при имплантации происходит по следующей схеме:



Начальное увеличение микротвердости сплава с модулированной структурой вызвано ростом включений γ' -фазы, последующее уменьшение микротвердости обусловлено появлением включений γ -фазы и разрушением модулированной структуры. Изменение структурно-фазового состояния при имплантации происходит по следующей схеме:



Показано, что модель изменения структурно-фазового состояния дисперсионно твердеющих сплавов при высокоэнергетической имплантации ионов при комнатной температуре и малых дозах (10^{13} - 10^{14} см^{-2}) может быть расширена и на дисперсионно твердеющий медный сплав БрБ2 [3, 4, 6, 12, 13, 22, 24].
6. С помощью высокоэнергетической имплантации сформирована модулированная структура в приповерхностных слоях толщиной несколько микрометров дисперсионно твердеющего сплава БрБ2, обусловленная радиационно-стимулированным распадом пересыщенного твёрдого раствора с выделением периодически расположенных упрочняющих включений, что позволяет реализовывать системы с повышенной прочностью, коррозионной стойкостью, износостойкостью [5, 11].

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Статьи в научных журналах:

1. Анищик В.М., Жукова С.И., Поляк Н.И. Микротвердость сплавов системы алюминий-медь-магний, имплантированных высокоэнергетическими ионами криптона // Физика и химия обработки материалов. – 1999. – №6. – С. 9 – 12.
2. Анищик В.М., Жукова С.И., Поляк Н.И., Скуратов В.А. Прочностные свойства бериллиевой бронзы, имплантированной высокоэнергетическими ионами криптона // Физика и химия обработки материалов. – 2003. – № 5. – С. 11 – 14.

3. Жукова С.И., Поляк Н.И., Васильева Л.А., Анищик В.М., Скуратов В.А., Дидык А.Ю. Кинетика старения бериллиевой бронзы при постимплантационном отжиге // Физика и химия обработки материалов. – 2004. – № 6. – С. 20 – 24.
4. Жукова С.И., Поляк Н.И., Васильева Л.А. Фазовые изменения в бериллиевой бронзе при высокоэнергетической ионной имплантации // Вестник БГУ, сер. 1. – 2005. – № 1. – С. 52 – 56.
5. Анищик В.М., Жукова С.И., Поляк Н.И., Васильева Л.А. Эволюция фазового состава бериллиевой бронзы БрБ2, имплантированной на зонной стадии старения ионами криптона с энергией 245 МэВ // Доклады НАН Беларуси. – 2005. – Т. 49 – С. 58-61.
6. Жукова С.И., Поляк Н.И., Васильева Л.А., Дидык А.Ю., Скуратов В.А. Изотермический потрорадиационный отжиг бериллиевой бронзы, имплантированной высокоэнергетическими ионами криптона // Физика и химия обработки материалов. – 2006. – № 1. – С. 26 – 31.

Статьи в сборниках трудов научных конференций:

7. Anishchik V.M., Zhukova S.I., Didyk A.Yu., Skuratov V.A., Poliak N.I., Ustinova M.V. The initial condition effect of dispersion-hardening alloys on the change in mechanical properties due to high-energy ion implantation // Plasma Physics and Plasma Technology: III Internat. conf. – Minsk, 2000. – P. 413 – 416.
8. Анищик В.М., Жукова С.И., Поляк Н.И. Влияние высокоэнергетической ионной имплантации на тонкую структуру и микротвердость сплавов алюминия // Взаимодействие излучений с твердым телом: Материалы IV Международной конференции. – Минск, 2001. – С. 240 – 242.
9. Жукова С.И., Поляк Н.И. Влияние высокоэнергетической ионной имплантации на структурно-фазовую стабильность сплава Al-4 вес.% Cu // Взаимодействие излучений с твердым телом: Материалы V Международной конференции. – Минск, 2003. – С. 148 – 150.
10. Поляк Н.И., Будзински П., Анищик В.М., Жукова С.И. Прочностные и трибологические свойства бериллиевой бронзы, имплантированной на разных стадиях старения ионами криптона с энергией 245 МэВ // Взаимодействие излучений с твердым телом: Материалы V Международной конференции. – Минск, 2003. – С. 291 – 292.
11. Жукова С.И., Поляк Н.И., Анищик В.М. К вопросу о формировании модулированной структуры в бериллиевой бронзе при высокоэнергетической ионной имплантации // Взаимодействие излучений с твердым телом. Материалы VI Международной конференции, Минск, 2005. – С. 115-116.
12. Жукова С.И., Трушко А.В., Поляк Н.И. Особенности двухступенчатого изотермического отжига бериллиевой бронзы, имплантированной высокоэнергетическими ионами криптона // Взаимодействие излучений с твердым телом. Материалы VI Международной конференции, Минск, 2005. – С. 117-119.

13. Поляк Н.И., Анищик В.М., Жукова С.И. Изменение фазового состава бериллиевой бронзы при имплантации ионов криптона на разных стадиях старения // Актуальные проблемы физики твердого тела: Материалы Международной конференции. – Минск, 2005. – С. 123-126.

Тезисы докладов конференций:

14. Поляк Н.И. Смещение атомов при облучении // Физика конденсированных сред: Тез. докл. VI-ой респ научн. конф., Гродно, 22 –25 апреля 1998 г. / ГрГУ им. Я. Купалы. – Гродно, 1998. – С. 161.
15. Поляк Н.И. Микротвердость сплавов системы алюминий-медь-магний, имплантированных высокоэнергетическими ионами криптона // Физика конденсированных сред: Тез. докл. VII-ой респ научн. конф., Гродно, 5 –7 мая 1999 г. / ГрГУ им. Я. Купалы. – Гродно, 1999. – С. 199 – 200.
16. Анищик В.М., Жукова С.И., Поляк Н.И. Микротвердость сплавов системы алюминий-медь-магний, имплантированных высокоэнергетическими ионами криптона // Тез. докл. XXIX Междунар. конф. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. – Москва, 1999. – С. 141.
17. Поляк Н.И., Устинова М.И. Изменение прочностных свойств сплава Д16, имплантированного на разных стадиях старения ионами высоких энергий // Физика конденсированных сред: Тез. докл. VIII-ой респ научн. конф., Гродно, 3 – 5 мая 2000 г. / ГрГУ им. Я. Купалы. – Гродно, 2000. – С. 266 – 267.
18. Поляк Н.И. Изменение уровня напряжений в алюминиевых сплавах при высокоэнергетической ионной имплантации // Физика конденсированных сред: Тез. докл. IX-ой респ научн. конф., Гродно, 2 – 4 мая 2001 г. / ГрГУ им. Я. Купалы. – Гродно, 2001. – С. 245 – 247.
19. Анищик В.М., Жукова С.И., Дидык А.Ю., Скуратов В.А., Поляк Н.И. Тонкая структура сплавов алюминия, имплантированных ионами криптона // Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий: Тез. докл. междунар. конф., Обнинск, 16-19 июня 2001г. / ИАТЭ. – Обнинск, 2001. – С. 81 – 82.
20. Анищик В.М., Жукова С.И., Васильева Л.А., Поляк Н.И. Влияние высокоэнергетической ионной имплантации ионов криптона на стабильность второй фазы в сплаве Al-Cu // XIII Российский симпозиум по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел: Тез. докл. научн. конф., Черногловка, июнь 2003 г. / РАН. – Черногловка, 2003. – С. 118.
21. Анищик В.М., Жукова С.И., Поляк Н.И., Скуратов В.А. Прочностные свойства бериллиевой бронзы, имплантированной высокоэнергетическими ионами криптона // Тез. докл. XXX Междунар. конф. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. – Москва, 2003. – С. 117.
22. Жукова С.И., Поляк Н.И., Васильева Л.А., Анищик В.М., Скуратов В.А., Дидык А.Ю. Кинетика старения бериллиевой бронзы при постимплантацион-

ном отжиге // Тез. докл. XXXIV Междунар. конф. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. – Москва, 2004. – С. 106.

23. Анищик В.М., Жукова С.И., Поляк Н.И., Васильева Л.А., Скуратов В.А., Дидык А.Ю. Стабильность выделений в бериллиевой бронзе при имплантации ионов криптона с энергией 245 МэВ // Тез. докл. XXXIV Междунар. конф. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. – Москва, 2004. – С. 107.
24. Жукова С.И., Поляк Н.И., Васильева Л.А., Дидык А.Ю., Скуратов В.А. Изотермический пострадиационный отжиг бериллиевой бронзы, имплантированной высокоэнергетическими ионами криптона // Тез. докл. XXXV Междунар. конф. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. – Москва, 2005. – С. 166.

Поляк Наталля Іпалітаўна

СТРУКТУРНА-ФАЗАВЫ СТАН І МІКРАЦВЁРДАСЦЬ СПЛАВАЎ НА
АСНОВЕ АЛЮМІНІЮ І МЕДЗІ, ІМПЛАНТАВАНЫХ
ВЫСОКАЭНЕРГЕТЫЧНЫМІ ІЁНАМІ КРЫПТОНУ

Ключавыя словы: *высокаэнергетычная іённая імплантацыя, дысперсійна цвярдзеючыя сплавы Д16, Al-4%Cu, БрБ2, структурна-фазавыя ператварэнні, электронная мікраскапія, мікрацвёрдасць, пострадыяцыйны адпал.*

Аб’ект даследвання: дысперсійна цвярдзеючыя сплавы на аснове алюмінію – Al-4%Cu, Д16, на аснове медзі – берыліевая бронза БрБ2.

Прадметам даследвання з’яўляюцца структура, фазавы склад і мікрацвёрдасць сплаваў перад і пасля апрамянення, кінэтыка старэння сплаву БрБ2 пры пострадыяцыйным адпале.

Мэта дысертацыйнай работы: вызначыць заканамернасці змянення структуры, фазовага складу і мікрацвёрдасці дысперсійна цвярдзеючых алюмініевых і меднага сплаваў у выніку імплантацыі малых доз ($\sim 10^{14}$ см⁻²) высокаэнергетычных іёнаў крыптон у залежнасці ад пачатковага структурна-фазовага стану.

Метады даследвання: прасвечвальная і растравая электронная мікраскапія, рэнтгенаструктурны аналіз, рэнтгенаспектральны мікрааналіз, металаграфічны аналіз, вымярэнне мікрацвёрдасці, пострадыяцыйны ізатэрмічны адпал.

Упершыню вызначаны заканамернасці змянення мікрацвёрдасці дысперсійна цвярдзеючых сплаваў пры высокаэнергетычнай імплантацыі малых доз ($\sim 10^{14}$ см⁻²) іёнаў Kr пры пакаёвай тэмпературы, якія залежаць ад іх пачатковага структурна-фазовага стану: для сплаваў, змяшчаючых зоны Гінье-Прэстана, назіраецца пачатковае змяншэнне мікрацвёрдасці, потым яе ўзрост; для сплаваў, змяшчаючых раўнаважныя ўключэнні, мікрацвёрдасць павялічваецца. Вызначаны паслядоўнасці радыяцыйна-стымуляваных фазавых перетварэнняў, якія выклікаюць змяненне мікрацвёрдасці пры імплантацыі берыліявай бронзы БрБ2 з розным пачатковым структурна-фазавым станам. Упершыню выяўлена фарміраванне мадуліраванай структуры ў сплаве БрБ2 пры высокаэнергетычнай іённай імплантацыі, што мае практычнае значэнне пры распрацоўцы сістэм з прыпаверхнявымі сляямі таўшчынёй у некалькі мікраметраў, якія валодаюць павышанай трываласцю, каразійнай і зносатрываласцю.

Вобласць прымянення вынікаў: радыяцыйнае матэрыялазнаўства.

РЕЗЮМЕ

Поляк Наталья Ипполитовна

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И МИКРОТВЕРДОСТЬ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И МЕДИ, ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ВЫСОКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ КРИПТОНА

Ключевые слова: *высокоэнергетическая ионная имплантация, дисперсионно твердеющие сплавы Д16, Al-4%Cu, БрБ2, структурно-фазовые превращения, электронная микроскопия, микротвердость, пострадиационный отжиг.*

Объект исследования: дисперсионно твердеющие сплавы на основе алюминия - Al-4%Cu, Д16, на основе меди - бериллиевая бронза БрБ2.

Предметом исследования являются структура, фазовый состав и микротвердость сплавов до и после облучения, кинетика старения сплава БрБ2 при пострадиационном изотермическом отжиге.

Цель диссертационной работы: установить закономерности изменения структуры, фазового состава и микротвердости дисперсионно твердеющих алюминиевых и медного сплавов в результате имплантации малых доз ($\sim 10^{14}$ см⁻²) высокоэнергетических ионов криптона в зависимости от исходного структурно-фазового состояния.

Методы исследования: просвечивающая и растровая электронная микроскопии, рентгеноструктурный анализ, рентгеноспектральный микроанализ, металлографический анализ, измерение микротвердости, пострадиационный изотермический отжиг.

Впервые установлены закономерности изменения микротвердости дисперсионно твердеющих сплавов при высокоэнергетической имплантации малых доз ($\sim 10^{14}$ см⁻²) ионов Kr при комнатной температуре, зависящие от их исходного структурно-фазового состояния: для сплавов, содержащих зоны Гинье-Престона, наблюдается начальное уменьшение микротвердости, затем ее возрастание; для сплавов, содержащих равновесные включения упрочняющих фаз, микротвердость с ростом дозы имплантации увеличивается. Установлены последовательности радиационно-стимулированных фазовых превращений, обуславливающие изменение микротвердости при имплантации бериллиевой бронзы БрБ2 с различным исходным структурно-фазовым состоянием. Впервые обнаружено формирование модулированной структуры в сплаве БрБ2 при высокоэнергетической ионной имплантации, что имеет практическое значение для создания систем с приповерхностными слоями толщиной несколько микрометров, обладающими повышенной прочностью, коррозионной стойкостью, износостойкостью.

Область применения результатов: радиационное материаловедение.

SUMMARY

Poliak Natalia Ippolitovna

STRUCTURE-PHASE CONDITION AND MICROHARDNESS OF ALUMINIUM-
AND COPPER-BASED ALLOYS
IMPLANTED WITH HIGH-ENERGY KRYPTON IONS

Key words: *high-energy ion implantation, dispersion-hardening alloys D16, Al-4%Cu, BrB2, structure-phase transformations, electron microscopy, microhardness, post-radiation annealing.*

The objects of investigation: dispersion-hardening, aluminium-based (Al-4%Cu, D16) and copper-based (BrB2) alloys.

The subjects of investigation: the structure, phase composition and microhardness before and after irradiation, aging kinetics of BrB2 alloy under post-radiation isothermal annealing.

The aim of dissertation: to establish the regularities of changing the structure, phase composition and microhardness of dispersion-hardening aluminium and copper alloys as a result of the implantation of high-energy Kr-ions at small doses ($\sim 10^{14}$ cm⁻²), depending of the initial structure-phase condition.

The methods of investigation: transmission and scanning electron microscopy, X-ray diffraction analysis, X-ray spectral microanalysis, metallographic analysis, microhardness measurements, post-radiation isothermal annealing.

The regularities of microhardness changes of dispersion hardening alloys under high-energy implantation of Kr-ions at small doses ($\sim 10^{14}$ cm⁻²) at room temperature depending on their initial structure-phase condition have been established for the first time. For alloys containing Guinier-Preston zones one can first observe the decrease of microhardness then its increase; for alloys, containing equiweighing inclusions of hardening phases, one can observe increase of microhardness with increasing the dose of implantation.

The sequences of radiation stimulated phase transformations, causing microhardness changes under BrB2 implantation with different structure-phase condition have been established as well. The formation of modulated structure in BrB2 alloy has been found under high-energy implantation; this is of practical importance for producing systems with near-surface layers characterized by increased strength, corrosion and wear resistance.

The area of application: radiation materials studies.