

Нуркенов Серик Амангельдинович

**ИССЛЕДОВАНИЕ БАРЬЕРНОГО СЛОЯ В МЕТАЛЛАХ И ЕГО ВЛИЯНИЕ
НА КИНЕТИКУ И ФАЗООБРАЗОВАНИЕ В СЛОИСТОЙ СИСТЕМЕ Fe-Be**

Специальность: 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2017

Работа выполнена в республиканском государственном предприятий
«Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева»

Научный руководитель: **Кукетаев Темиргали Абильдинович,**
доктор физико-математических наук, профессор

Научный консультант: **Кутербек Кайрат Атажанович,**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные
оппоненты: **Пичугин Владимир Федорович,**
доктор физико-математических наук, профессор
кафедры экспериментальной физики Физико-
технического института ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский Томский политехнический
университет».

Фортуна Сергей Валерьевич,
кандидат технических наук лаборатории физики
упрочнения поверхности ФГБУН Института физики
прочности и материаловедения Сибирского отделения
Российской академии наук.
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Алтайский государственный университет».

Защита диссертации состоится «20» сентября 2017 г. в 14 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.269.02 при ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке
ФГАОУ ВО «Национального исследовательского Томского политехнического
университета» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте:
<http://portal.tpu.ru/council/909/worklist>

Автореферат разослан «30» июня 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, доктор физико-математических наук

Коровкин М.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На современном этапе развития науки [1] разработка новых эффективных технологий получения материалов, работающих в условиях агрессивных сред – при механических, термических, радиационных и других нагрузках, является актуальной задачей современного материаловедения. Для практической реализации получения таких технологий значительный интерес представляет метод ионной имплантации, который позволяет вводить атомы в различные твердые тела независимо от термодинамических условий и точно контролировать процентное содержание атомов [2, 3]. Таким образом, можно создавать разнообразные материалы с новыми и уникальными свойствами. Ионную имплантацию применяют также для исследования разнообразных явлений в металлах, включая радиационное повреждение, поверхностные изменения и коррозию [4].

Имплантация химически активных ионов в металлы приводит к существенным изменениям химического и фазового составов поверхностных слоев [5], а также к модификации многих физико-химических свойств металлов. Однако, при имплантации больших доз $\sim(10^{16}-10^{18}) \text{ см}^{-2}$ ионов кислорода в переходные металлы в поверхностных слоях образуются окислы и процессы фазообразования, происходящие в результате этого, остаются малоизученными. Практически отсутствует информация о составе окисных фаз, об их распределении по глубине имплантированных образцов в зависимости от дозы и энергий имплантации [5, 6].

Для направленной модификации приповерхностных слоев металлических материалов с целью улучшения их поверхностных свойств широко применяются методы ионно-плазменного нанесения покрытий [7]. При магнетронном осаждении бериллия, используется последующая термическая обработка материала, приводящая к улучшению адгезии покрытия с подложкой, образованию и гомогенизации фаз в диффузионной зоне. Исходно неравновесное пространственное распределение атомных компонентов и последующий термический отжиг приводят к пространственной направленности процесса фазообразования и создания слоистой системы. Для практического применения таких систем необходимо создавать термически стабильное неоднородное распределения фаз по глубине образца. Разработка новых методов получения пространственно - неоднородного распределения фаз, стабильного к воздействию высокой температуры, представляют собой важную задачу [7, 8].

В рамках термодинамического подхода и ионно-плазменных методов обработки материалов в работе [9] предложено решение проблемы химической совместимости жаростойких поверхностных слоев с жаропрочными сплавами. Основная идея такого подхода состоит в определении состава и фазово-структурных состояний для подложки и покрытия, что обеспечивается отсутствием градиентов химических потенциалов для всех компонентов сплава при данной температуре. В этом случае [9, 10] подложка и покрытие находятся в равновесном состоянии и обладают различными функциональными свойствами.

Предложенный подход был апробирован на слоистой системе Fe-Be, для которой был получен термически стабильный слой, состоящий из (β -FeBe_{2+δ}), тогда как в объеме выявлено наличие предельного раствора бериллия в α -Fe(Be) [11-13].

В этой связи, для целенаправленного улучшения параметров материалов требуется информация о влиянии имплантированного слоя кислорода на состав поверхностных слоев, а также особенности термически индуцированных процессов диффузии и фазовых превращений в этих системах.

В качестве защитных покрытий представляют значительный интерес бериллиды [14], так как они обладают комплексом наиболее важных физических, химических и механических свойств. Бериллий является одним из наиболее ценных конструкционных реакторных материалов. Его уникальные тепловые характеристики способствуют снижению термических напряжений в активной зоне атомных реакторов. Бериллий не подвержен коррозии под напряжением и обладает высокой коррозионной стойкостью на воздухе, во влажном CO₂, в Na, Bi и Pb при температурах до $\sim(500-600)^{\circ}\text{C}$. Железо также является основным компонентом многих конструкционных материалов [15].

Целью диссертационной работы является создание барьерных слоев в металлах и в стали (12X18H10T) путем имплантации ионов кислорода, и исследование его влияния на кинетику и фазообразование в системе «железо-бериллий».

В соответствии с целью решались следующие **основные задачи**:

- создание барьерного слоя в металлах Cu, Fe и стали (12X18H10T) путем имплантации ионов кислорода при низких энергиях на ускорителях УКП-2-1 и DC-60, а также проведение соответствующих отжига для установления термической стабильности кислородного слоя;
- исследование влияния барьерного слоя на кинетику термически индуцированных процессов диффузии и фазообразования в исследуемых слоистых системах;
- определение относительного содержания фаз и направленности фазовых преобразований в приповерхностных слоях и в объеме образцов слоистых систем – при последовательном изотермическом отжиге;
- реализация метода замедления процессов диффузии и фазообразования в полученных слоистых системах с помощью барьерного слоя;
- разработка метода восстановления функции распределения концентрации атомов примеси в твердом растворе «матрица-примесь» по данным рентгеновской дифракции;
- оценка возможности использования диаграмм состояния бинарных систем Cu-O, Fe-O и Fe-Be – при описании кинетики процессов диффузии и фазовых преобразований, а также при получении термически стабильных слоистых систем.

Работа выполнена в рамках научно-технической программы «Развитие нанонауки и нанотехнологий в Республике Казахстан» и Проектам Грантового финансирования Министерства образования и науки РК «Изучение термической стабильности, структуры, физико-механических свойств захороненных барьерных

слоев, сформированных низкоэнергетичной имплантацией кислорода на ускорителе DC-60» на (2007 – 2009) годы.

Объектом исследования являлись образцы меди (d_{Cu})=1,0 мм, железа (d_{Fe})=10,0 мкм и стали ($d_{\text{стали}}$) =1,0 мм, подвергнутые последовательному гомогенизирующему отжигу при температуре $T=700^{\circ}\text{C}$ в течение 3 часов, а также слоистые системы $\text{Fe}(10 \text{ мкм}):\text{O}^+-\text{Be}(0.7 \text{ мкм})-^{57}\text{Fe}(0.1 \text{ мкм})$ и $\text{Fe}(10 \text{ мкм})-\text{Be}(0.7 \text{ мкм})-^{57}\text{Fe}(0.1 \text{ мкм})$.

В качестве экспериментальных методов исследования использовались мессбауэровская спектроскопия с регистрацией γ -квантов в геометрии «на прохождение» (МС) и регистрацией электронов конверсии в геометрии обратного рассеяния (КЭМС), а также методы рентгенофазового анализа (РФА) и резерфордского обратного рассеяния протонов (РОР).

Предмет исследования: исследование барьерных слоев в металлах Cu, Fe и в стали (12X18H10T), а также влияние кислородсодержащего барьерного слоя на кинетику термически индуцированных процессов диффузии и фазовых превращений в системе Fe–Be.

Научная новизна работы.

Экспериментально установлено условие термической стабильности имплантированного слоя в системе $\text{Fe}:\text{O}^+$ при энергии частиц $E \sim 1.6 \text{ МэВ}$, на основе которой показана возможность ее применения в качестве подповерхностного слоя для бериллиевого покрытия. Концентрация кислородного слоя составила $\sim 20 \text{ ат.}\%$ и с увеличением температуры отжига в интервале $\sim (180 \div 600)^{\circ}\text{C}$ данный слой не меняется.

В системе $\text{Cu}:\text{O}^+$ при энергии частиц $E \sim 100 \text{ кэВ}$ установлены закономерности формирования фаз, и обнаружено при температуре отжига $\sim 180^{\circ}\text{C}$ происходит «расползание» кислородного слоя по глубине. При отжиге $t_{\text{отж}}=3 \text{ ч}$ на глубине 850 нм от поверхности, концентрация кислорода $\sim 14 \text{ ат.}\%$. Определено, что кислородсодержащий слой в данной системе не может быть применен в качестве подповерхностного.

Предложен и реализован метод замедления процессов диффузии и фазообразования в слоистой системе «железо-бериллий» с помощью барьерного слоя: были получены значения параметров кинетического уравнения для системы с имплантационным слоем кислорода и без него: $\tau(\text{Fe}:\text{O}^+-\text{Be}) = (4.38 \pm 0.18) \text{ ч}$ и $\tau(\text{Fe}-\text{Be}) = (3.26 \pm 0.11) \text{ ч}$.

Установлено, что кислородный слой ограничивает зону растворения бериллия в приповерхностном слое образца и показано влияние барьерного слоя на кинетику термически индуцированных процессов диффузии и фазовых превращений в слоистой системе Fe–Be.

Экспериментально определена последовательность и характерные времена термически индуцированных процессов фазовых превращений в приповерхностных слоях и в объеме для систем $\text{Fe}(10 \text{ мкм}):\text{O}^+-\text{Be}(0.7 \text{ мкм})-^{57}\text{Fe}(0.1 \text{ мкм})$ и $\text{Fe}(10 \text{ мкм})-\text{Be}(0.7 \text{ мкм})-^{57}\text{Fe}(0.1 \text{ мкм})$.

По данным рентгеновской дифракции для системы $\text{Fe}(10 \text{ мкм}):\text{O}^+-\text{Be}(0.7 \text{ мкм})-^{57}\text{Fe}(0.1 \text{ мкм})$ обнаружено образование твердого раствора $\alpha\text{-Fe(Be)}$ со

стороны железа только при $t_{\text{отж}}=15$ часов, в отличие от системы Fe(10 мкм)–Be(0.7 мкм)– ^{57}Fe (0.1 мкм).

Определена кинетика процессов взаимной диффузии атомов Fe и Be в твердом растворе $\alpha\text{-Fe(Be)}$ и установлены характерные времена интенсивности распределения атомов железа $I_{(\alpha\text{-Fe})}$ с течением времени отжига для обеих слоистых систем.

Практическая ценность работы.

Результаты проведенных научных исследований представляют интерес для технологий получения термически устойчивых покрытий в многослойных металлических системах.

Замедление процессов диффузии и фазовых превращений в системе «железо-бериллий» в приповерхностном слое необходимо учитывать при разработке новых материалов с заданными свойствами.

Основные результаты экспериментальных исследований слоистых систем Fe–Be– ^{57}Fe и Fe:O⁺–Be– ^{57}Fe – используются в учебном процессе в рамках курса «Физические основы мессбауровской спектроскопии» на кафедре «Ядерная физика, новые материалы и технологии» Физико-технического факультета ЕНУ им. Л.Н. Гумилева.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Низкая растворимость кислорода в железе способствует установлению термической стабильности барьерного слоя в системе Fe:O⁺ в интервале температур отжига $\sim(180\div 600)^\circ\text{C}$. Подобный процесс в системах Cu:O⁺ и (12X18N10T):O⁺ не обнаружен, так как происходит диффузионное «расползание» кислорода.
2. Кислород-содержащий барьерный слой оказывает существенное влияние на процессы диффузии и фазовых превращений в слоистой системе Fe-Be.
3. Имплантация ускоренных ионов кислорода в образец $\alpha\text{-Fe}$ создает барьерный слой, который меняет кинетику процессов взаимной диффузии атомов бериллия и железа, а также снижает интенсивность их миграции в системе $\alpha\text{-Fe:O}^+\text{-Be-}^{57}\text{Fe}$.

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие на всех этапах выполнения диссертационной работы: в создании экспериментальных методик, проведении измерений, в обработке и анализе полученных данных, а также в обсуждениях и подготовке статей и материалов к публикациям. Определяющим, был вклад автора при формулировке основных положений и выводов, проведенных совместно с научным руководителем.

Апробация работы

Основные результаты докладывались и обсуждались: на XI-ой международной научной конференции «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах» г. Ялта, 31 августа-10 сентября 2015 г., на международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и инновационные тенденции современного образования и науки» (26–27) января 2017 года, г. Туркестан, Казахстан, в работе международной конференции

«Радиационные технологии: достижения и перспективы развития-2014» (21 – 23) октября 2014 г. г. Ялта, Республика Крым, на международной конференции по ядерной физике INCP (2-7) июня 2013 г., Firenze, Italy, на IV Евразийской конференции «Ядерная наука и ее применение» (31–03) ноября 2006г. Баку, Азербайджан, на VII-ой международной конференции «Взаимодействие излучения с твердым телом» (ВИТТ-2007г.), г. Минск, на Международной конференции по применению эффекта Мессбауэра (ICAME – 2007 г.) Канпур, Индия, на VI-ой Международной конференции «Ядерная и радиационная физика (ICNRP'07) г. Алматы, Казахстан, а также на VII-ой конференции–конкурсе НИОКР молодых ученых и специалистов НЯЦ РК и молодых ученых «Наука и образование» ЕНУ им. Л.Н. Гумилева (2006-2011) гг.

Диссертант является обладателем международной стипендии Президента Республики Казахстан и проходил научно-исследовательскую стажировку в Аргоннской национальной лаборатории Университета Чикаго, США (2013-2014).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 8-и статьях (2-в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 6-в других журналах), в 9 материалах и в 4-тезисах международных конференций; список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников. Объем работы составляет 152 страниц, в том числе 19 таблиц, 57 рисунков и список использованных источников, включающий 130 наименований.

Автор диссертационной работы выражает глубокую благодарность научному руководителю: д.ф.-м.н., профессору Кукетаеву Т.А., а также д.ф.-м.н., профессору Кутербекеру К.А. за неоценимую помощь и консультации; искреннюю признательность и благодарность д.ф.-м.н., профессору Кадыржанову К.К., особую признательность и благодарность д.ф.-м.н., профессору МГУ имени М.В. Ломоносова Русакову В.С. за плодотворное сотрудничество и опыт, сыгравшие важную роль в моем становлении как физика-исследователя.

Благодарность сотрудникам лаборатории UKP-2-1 и циклотрона DC-60 за помощь в проведении работ по ионной имплантации, а также к.ф.-м.н. Тулеушеву Ю.Ж. и к.ф.-м.н. Жданову В.С. за качественное распыление атомов Be и ^{57}Fe . Выражаю слова благодарности, к.ф.-м.н. Верещаку М.Ф. и к.ф.-м.н. Кислицину С.Б. – за сотрудничество и плодотворное обсуждение результатов НИР.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность темы исследований, проведенных в настоящей работе, сформулированы цель диссертации и задачи исследования, отмечена их научная новизна и практическая ценность.

В первой главе приведен краткий обзор современного состояния и представлены основные сведения о процессах диффузии и фазообразования в слоистых металлических системах, рассмотрены способы создания термически стабильных слоистых металлических систем. Проанализированы преимущества

ионных технологий как предпосылки создания неоднородного по глубине термодинамически равновесного сплава с заданным химическим составом и фазово-структурным состоянием (включающим многофазные области). Активное формирование поверхности методами ионно-лучевой обработки приводит к более широким возможностям модификации физических свойств приповерхностных слоев.

Во второй главе приведены сведения о методах получения и исследования поверхностно-модифицированных материалов. Рассмотрены особенности и возможности метода ионной имплантации. Имплантация ионов кислорода в исследуемые материалы выполнялись на ускорителе UKP-2-1 и циклотроне тяжелых ионов DC-60. Описаны возможности и технические характеристики ускорителей. Были описаны условия и возможности методов ионно-плазменного и термовакuumного распыления атомов бериллия и ^{57}Fe на подложки армко-железа. В работе были использованы: методы мессбауэровской спектроскопии на ядрах ^{57}Fe и метод КЭМС; рентгенофазовый анализ и резерфордовское обратное рассеяние протонов. Приведены описание способов регистрации мессбауэровских спектров, а также современных методов обработки и анализа полученных результатов.

В третьей главе представлены результаты исследований по имплантации ионов кислорода в металлы ($\text{Cu}:\text{O}^+$, $\text{Fe}:\text{O}^+$) и в сталь ($12\text{X18H10T}:\text{O}^+$), а также изучено их поведение и распределение кислородного слоя при термических воздействиях.

В таблице 1 приведены основные характеристики и условия облучения на соответствующих ускорителях.

Таблица 1 – Основные характеристики и условия облучения

№	Образец	Толщина образца	Импла- тируемый ион	Тип ускорителя	Энергия облучения	Флюенс ионов, (ион/см ²)	Пробег ионов (R, нм)
1	Cu (медь)	1 мм	O ⁺	DC-60	100 кэВ	$2 \cdot 10^{18}$	290
2	Fe (α -железо)	10мкм	O ⁺	UKP-2-1	1,6 МэВ	$1,1 \cdot 10^{18}$	950
3	12X18H10T (сплав)	1 мм	O ⁺	DC-60	100 кэВ	$1 \cdot 10^{18}$, $2 \cdot 10^{18}$	550, 550

В системе $\text{Cu}:\text{O}^+$: после имплантации ионов кислорода в матрицу меди проводились термические отжики при температуре $T_{\text{отж}}=180^\circ\text{C}$ в течение $t_{\text{отж}}=2$ ч. Для анализа экспериментальных данных полученных методом РОР, использовалась программа RUMP, которая позволяет рассчитать послойно элементный и композиционный состав образцов, определять их профили распределения элементов.

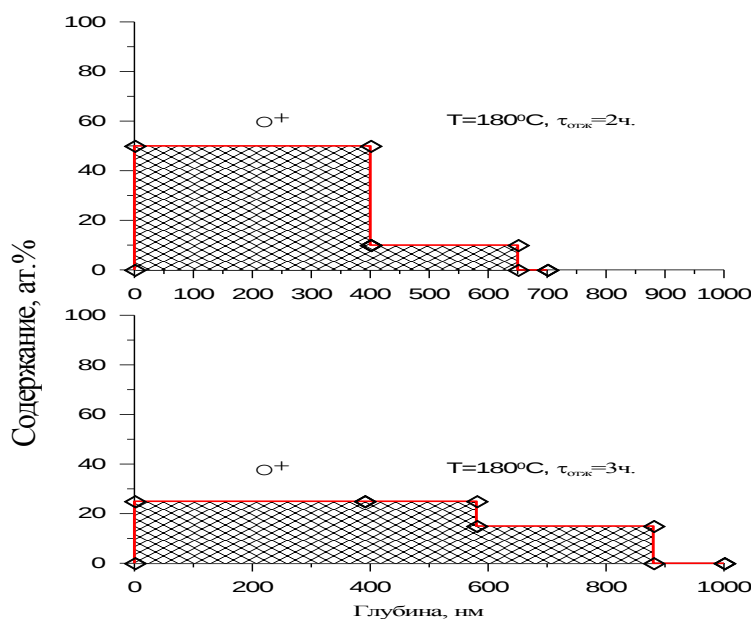


Рисунок 1 – Глубина и профиль распределения кислородного слоя в матрице меди по данным РОР после термических отжигов при температуре $T_{отж}=180^{\circ}\text{C}$

Экспериментально было обнаружено, что уже при температуре отжига $\sim 180^{\circ}\text{C}$ происходит «расползание» кислородного слоя по глубине матрицы меди, при общем времени отжига $t_{отж}=3$ ч на глубине 850 нм от поверхности концентрация кислорода ~ 14 ат.%. Кислородный слой наблюдается на глубине ~ 290 нм от поверхности и слой насыщенный барьерным слоем распространяется до глубины ~ 650 нм.

Имплантация ионов кислорода в армко-железо при энергий частиц $E \sim 1.6$ МэВ - доза облучения составила $\sim 1,1 \cdot 10^{18}$ ион/см². Плотность тока при облучении $\sim (2-3)$ мкА/см². Для однородного облучения поверхности пучок сканировался по образцу, при этом температура не превышала $\sim 100^{\circ}\text{C}$. На рисунке 2 представлены спектр до и после имплантации и профиль распределения кислородного слоя в матрице железа, полученной с помощью метода РОР на ускорительном перезарядном комплексе УКР-2-1. Глубина проникновения кислорода в α -Fe и концентрация кислорода по глубине образца после имплантации была определена с использованием программы RUMP. Моделирование позволяет экспериментально с наибольшей точностью установить глубину детектируемого методом РОР слоя.

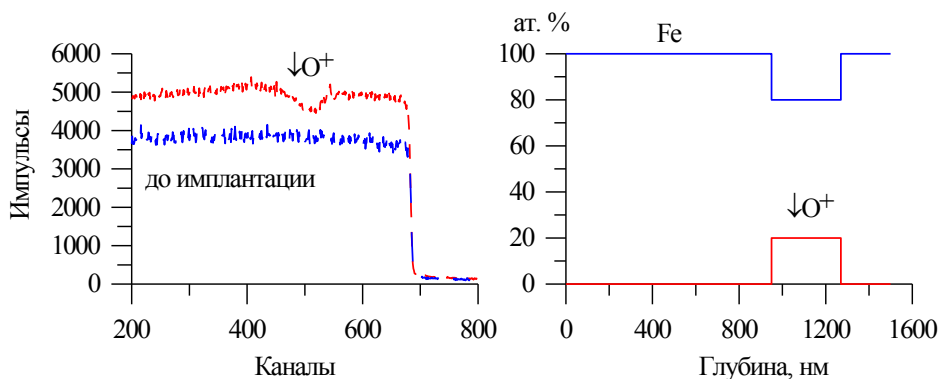


Рисунок 2 – РОР спектры до и после имплантации ионов кислорода

В системе Fe: O⁺ с увеличением времени отжига, в интервале температур $\sim(180\div 600)^{\circ}\text{C}$ концентрация кислородного слоя в матрице армко-железа не меняется. Согласно работе Б.В. Линчевского и А.М. Самарина растворимость кислорода в $\alpha\text{-Fe}$ и $\gamma\text{-Fe}$ мала. Величины растворимости, связаны в первую очередь с чистотой используемых образцов и чем более чистыми являются образцы, тем ниже экспериментально определенная растворимость кислорода. Растворимость не зависит от температуры и равна $\approx 2.4 \cdot 10^{-3}$ ат. % O в $\alpha\text{-Fe}$ и $3.4 \cdot 10^{-4}$ ат. % O в $\gamma\text{-Fe}$.

В системе 12X18H10T-кислород на основе результатов обработки спектров методом РОР после имплантации наблюдаем, что практически весь кислород сосредоточен в приповерхностном слое на глубине ~ 550 нм, концентрация кислорода от поверхности до глубины ~ 400 нм практически неизменна, далее уменьшается по мере увеличения расстояния от облученной поверхности образца.

В соответствии с данными исследованиями по имплантации ионов кислорода в армко-железа, было установлена термическая стабильность кислородного слоя в системе Fe:O⁺ при энергии частиц $E \sim 1.6$ МэВ, и показана возможность его применения в качестве подповерхностного барьерного слоя для бериллиевого покрытия. Проведенные экспериментальные исследования в системе Cu:O⁺ при энергии частиц $E \sim 100$ кэВ позволили установить закономерности формирования фаз в этой системе. Показано, что уже при температуре отжига $\sim 180^{\circ}\text{C}$ происходит «расползание» кислородного слоя по матрице меди, и уже при общем времени отжига $t_{\text{отж}} = 3$ ч на глубине 850 нм от поверхности, концентрация слоя кислорода ~ 14 ат.%. Следовательно, кислородный слой в матрице меди не может быть применен в качестве подповерхностного барьерного слоя, в отличие, например от α -железа. Проведены исследования структуры и физико-механических свойств стали (12X18H10T) и установлено, что образцы соответствуют отожженному материалу с аустенитной структурой.

В четвертой главе показаны результаты влияния барьерного слоя на кинетику процессов диффузии и фазообразования в слоистых системах Fe–Be–⁵⁷Fe и Fe:O⁺–Be–⁵⁷Fe.

После проведенных термических отжигов на образцы с имплантированным слоем кислорода и без, были нанесены слой бериллия толщиной $\sim 0,7$ мкм методом ионно-плазменного напыления. Для увеличения чувствительности методов мессбауэровской спектроскопии в геометрии на «пропускание» и в геометрии обратного рассеяния электронов методом термовакуумного распыления нанесли слой железа толщиной $\sim 0,1$ мкм (на ядрах ⁵⁷Fe).

На рисунках 3 и 4, представлены характерные мессбауэровские спектры для систем Fe:O⁺–Be–⁵⁷Fe и Fe–Be–⁵⁷Fe после последовательных изотермических отжигов при температуре $T_{\text{отж}} = 700^{\circ}\text{C}$ и результат восстановления функций распределения $p(H_n)$ эффективных магнитных полей H_n на ядрах ⁵⁷Fe. Мессбауэровские спектры исследуемых систем представляют собой сложную суперпозицию нескольких парциальных спектров парамагнитного и магнитоупорядоченного типов с уширенными резонансными линиями [16]. Каждый из парциальных спектров может быть представлен либо в виде суперпозиции

большого числа квадрупольных дублетов, либо зеемановских секстетов с близкими значениями сверхтонких параметров. В кристаллической структуре β -бериллида $\text{FeBe}_{2+\delta}$, так же, как и в растворе $\alpha\text{-Fe}(\text{Be})$, атомы железа занимают одну кристаллографическую позицию. Однако, из-за отклонения от стехиометрии бериллида ($\delta > 0$) и наличия бериллия в растворе $\alpha\text{-Fe}(\text{Be})$ атомы железа оказываются в неэквивалентных положениях из-за разного числа атомов железа в первой и последующих координационных сферах. По этой причине наблюдаемые парциальные спектры состоят из большого числа зеемановских секстетов с близкими значениями сверхтонких параметров. В связи с этим, обработка и анализ спектров проводились методом восстановления нескольких независимых функций распределения сверхтонких параметров, с помощью программы DISTRI программного комплекса MStools [16].

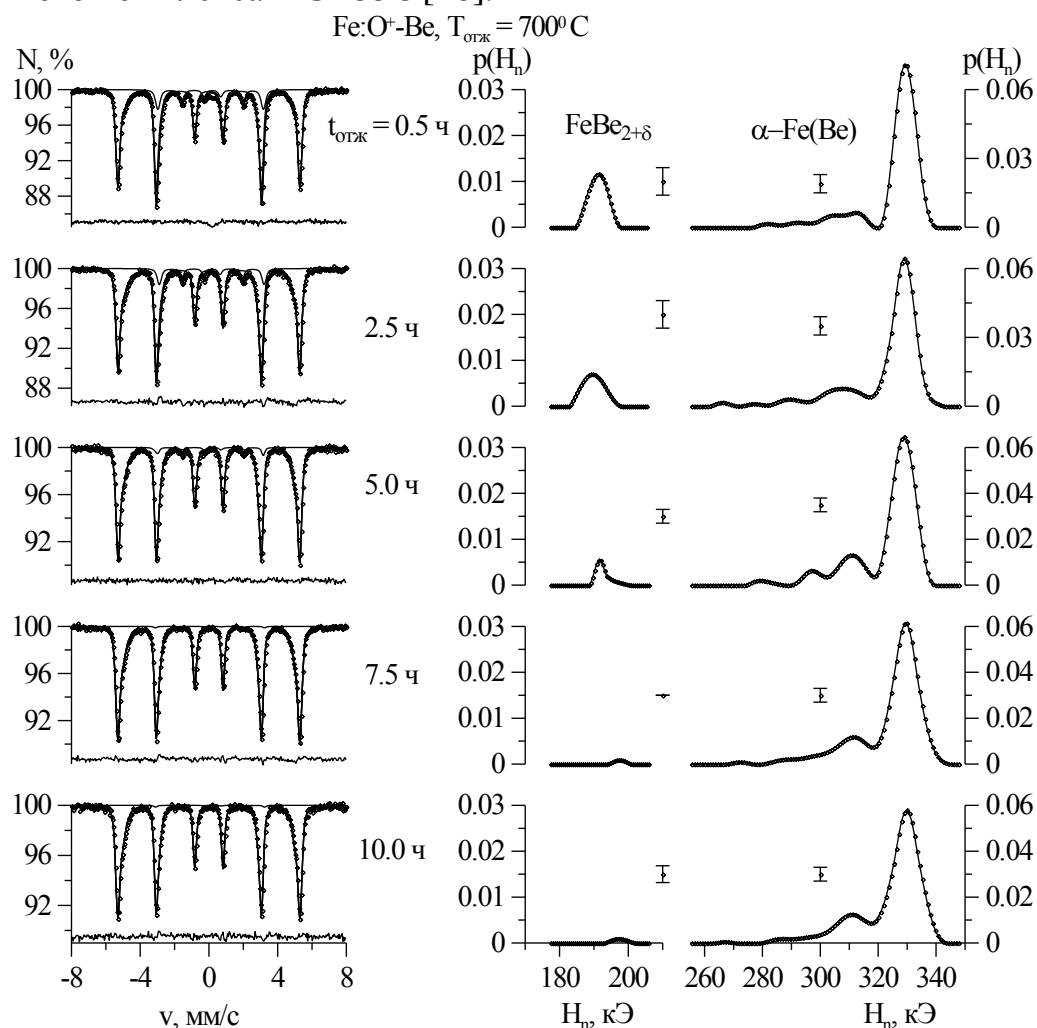


Рисунок 3 – Мессбауэровские спектры и результат восстановления функций распределения $p(H_n)$ эффективных магнитных полей H_n на ядрах ^{57}Fe в системе $\text{Fe}:\text{O}^+-\text{Be}-^{57}\text{Fe}$ ($t_{\text{отж}}=0,5$ ч до 10,0 ч) после последовательных изотермических отжигов при температуре $T_{\text{отж}} = 700^\circ\text{C}$

Функция распределения $p(H_n)$ сверхтонкого магнитного поля H_n на ядрах ^{57}Fe при $192 \text{ кЭ} \leq H_n \leq 200 \text{ кЭ}$ и сдвиге линии $\delta \neq 0 \text{ мм/с}$ была отнесена нами к интерметаллиду $\text{FeBe}_{2+\delta}$. Функция распределения $p(H_n)$ при $260 \text{ кЭ} \leq H_n \leq 350 \text{ кЭ}$ и $\delta \cong 0 \text{ мм/с}$ относится к твердому раствору $\alpha\text{-Fe}(\text{Be})$. В обеих системах $\text{Fe}:\text{O}^+-\text{Be}-$

^{57}Fe и Fe-Be- ^{57}Fe после последовательных изотермических отжигов при температуре $T_{\text{отж}} = 700^\circ\text{C}$, мы отчетливо наблюдаем интерметаллидную фазу $\text{FeBe}_{2+\delta}$ и твердый раствор $\alpha\text{-Fe(Be)}$. Однако, интенсивность функций распределения сверхтонких параметров парциальных спектров $p(H_n)$ для исследуемых интервалов заметно различаются.

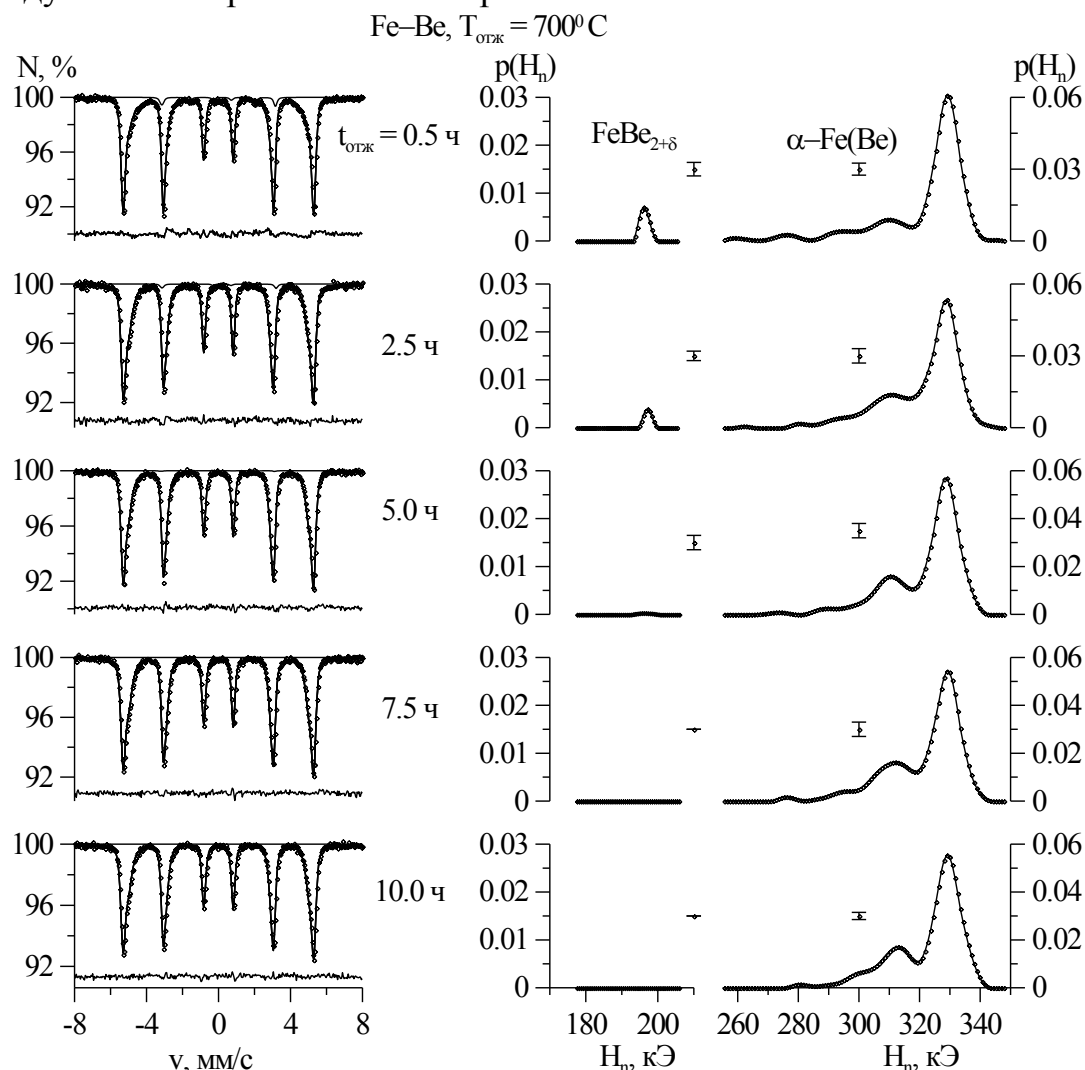


Рисунок 4 – Мессбауэровские спектры и результат восстановления функций распределения $p(H_n)$ эффективных магнитных полей H_n на ядрах ^{57}Fe в системе Fe-Be- ^{57}Fe ($t_{\text{отж}} = 0,5$ ч до 10,0 ч) после последовательных изотермических отжигов при температуре $T_{\text{отж}} = 700^\circ\text{C}$

По мере увеличения времени отжига $t_{\text{отж}}$ происходит уменьшение относительной интенсивности парциального спектра $\text{FeBe}_{2+\delta}$ и увеличение интенсивности функций распределения сверхтонких параметров парциальных спектров $p(H_n)$ характерных для твердого раствора $\alpha\text{-Fe(Be)}$. При $t_{\text{отж}} = 5$ часов интерметаллидная фаза $\text{FeBe}_{2+\delta}$ в системе Fe-Be- ^{57}Fe практически исчезает в отличие от системы Fe: O^+ -Be- ^{57}Fe .

На основе анализа мессбауэровских данных были получены средние значения эффективных магнитных полей H_n , сдвигов δ и квадрупольных смещений ε мессбауэровских спектров для фазы $\text{FeBe}_{2+\delta}$ в исследуемых слоистых системах Fe-Be- ^{57}Fe и Fe: O^+ -Be- ^{57}Fe в зависимости от времени изотермического отжига $t_{\text{отж}}$ при температуре $T_{\text{отж}} = 700^\circ\text{C}$ (см. рис. 5).

Полученные в эксперименте значения сверхтонких параметров хорошо согласуются с теоретическими данными [17].

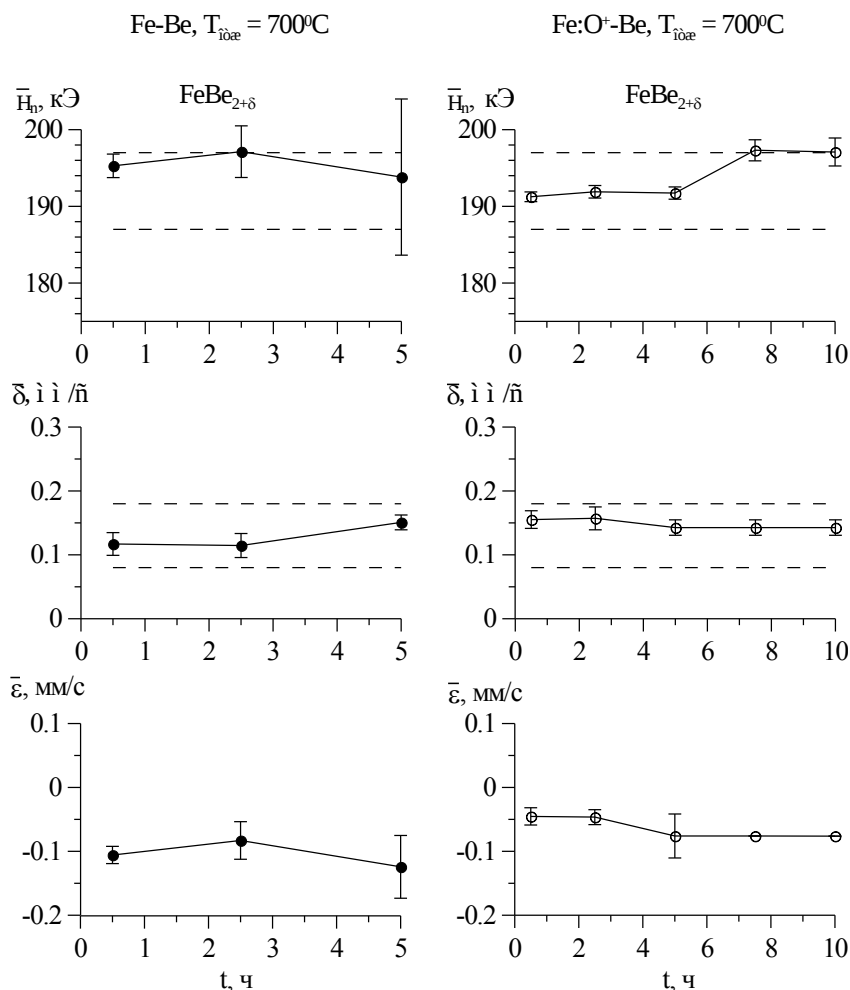


Рисунок 5 – Средние значения эффективных магнитных полей $\bar{H}_n$, сдвигов δ и квадрупольных смещений ϵ мессбауэровских спектров для фазы $\text{FeBe}_{2+\delta}$ в слоистых системах $\text{Fe-Be-}^{57}\text{Fe}$ и $\text{Fe:O}^+-\text{Be-}^{57}\text{Fe}$ в зависимости от времени изотермического отжига $t_{\text{отж}}$

На основе результатов мессбауэровских спектров и проведенного анализа восстановления функций распределения $p(H_n)$ эффективных магнитных полей H_n на ядрах ^{57}Fe в слоистых системах с кислородным слоем и без него, исследована кинетика процессов диффузии и фазовых превращений. На рисунке 6, для слоистых систем $\text{Fe-Be-}^{57}\text{Fe}$ и $\text{Fe:O}^+-\text{Be-}^{57}\text{Fe}$ были построены зависимости относительных интенсивностей I парциальных спектров фазы $\text{FeBe}_{2+\delta}$ для ядер ^{57}Fe от времени $t_{\text{отж}}$ при температуре $T_{\text{отж}} = 700^\circ\text{C}$.

Эти зависимости подтверждают полное растворение фазы $\text{FeBe}_{2+\delta}$ с образованием твердого раствора бериллия в железе. Для определения характерного времени процесса фазового превращения $\text{FeBe}_{2+\delta} \rightarrow \text{Fe(Be)}$, нами было предложено кинетическое уравнение: $I(t_{\text{анн}}) = I_0 \cdot \exp(-\frac{t_{\text{анн}}}{\tau})^2$; где I_0 – интенсивность парциального спектра – постоянная величина, τ – характерное время изменения относительной интенсивности парциального спектра фазы $\text{FeBe}_{2+\delta}$, $t_{\text{анн}}$ – время изотермического отжига.

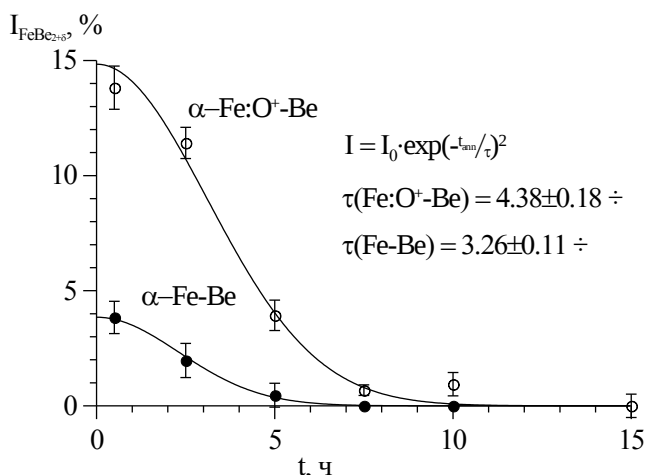


Рисунок 6– Зависимости интенсивностей парциальных спектров фазы $\text{FeBe}_{2+\delta}$ в слоистых системах $\text{Fe-Be-}^{57}\text{Fe}$ и $\text{Fe:O}^{+}\text{-Be-}^{57}\text{Fe}$ от времени изотермического отжига $t_{отж}$ при температуре $T_{отж} = 700^{\circ}\text{C}$

В результате обработки зависимостей $I(t_{анн})$ программой KINETIC, входящей в состав программного комплекса MStools [16], были получены следующие значения параметров кинетического уравнения для системы с имплантационным слоем кислорода и без него: $\tau(\text{Fe:O}^{+}\text{-Be}) = 4.38 \pm 0.18$ часа и $\tau(\text{Fe-Be}) = 3.26 \pm 0.11$ часа. Ниже в таблице приведены параметры мессбауэровских спектров для фазы $\text{FeBe}_{2+\delta}$.

Таблица 3 - Параметры мессбауэровских спектров для фазы $\text{FeBe}_{2+\delta}$ после соответствующих изотермических отжигов при температуре $T_{отж} = 700^{\circ}\text{C}$

$t_{отж},$ ч	Fe-Be- ^{57}Fe				Fe:O $^{+}$ -Be- ^{57}Fe			
	δ , мм/с	ε , мм/с	H_n , кЭ	I, %	δ , мм/с	ε , мм/с	H_n , кЭ	I, %
0.5	$0,112 \pm 0,01$	$-0,102 \pm 0,03$	$195,3 \pm 1,5$	$3,8 \pm 0,7$	$0,154 \pm 0,01$	$-0,058 \pm 0,02$	$191,2 \pm 0,6$	$13,8 \pm 0,9$
2.5	$0,115 \pm 0,01$	$-0,083 \pm 0,03$	$197,1 \pm 0,7$	$1,1 \pm 0,7$	$0,155 \pm 0,04$	$-0,074 \pm 0,06$	$191,1 \pm 0,8$	$11,4 \pm 0,7$
5.0	$0,145 \pm 0,01$	$-0,164 \pm 0,03$	$195,4 \pm 1,1$	$0,5 \pm 0,5$	$0,145 \pm 0,01$	$-0,050 \pm 0,03$	$191,7 \pm 0,8$	$3,9 \pm 0,7$
7.5	—	—	—	—	$0,143^*$	$-0,076^*$	$197,3 \pm 1,4$	$0,7 \pm 0,2$
10.0	—	—	—	—	$0,143^*$	$-0,076^*$	$197,1 \pm 1,8$	$0,9 \pm 0,5$
15.0	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание: $\delta_{\max}$, $\varepsilon_{\max}$ – сдвиг и квадрупольное смещение мессбауэровской линии, соответствующие максимальному значению функции распределения. H_n – сверхтонкое магнитное поле, I – интенсивность; * – величина, фиксированная в процессе обработки спектра.

На рисунке 7 – представлены КЭМС спектры ядер ^{57}Fe в слоистой системе $\text{Fe:O}^{+}\text{-Be-}^{57}\text{Fe}$ снятые со стороны бериллиевого покрытия после соответствующих изотермических отжигов при температуре $T_{отж} = 700^{\circ}\text{C}$.

Fe:O⁺-Be-⁵⁷Fe, T_{отж} = 700°C

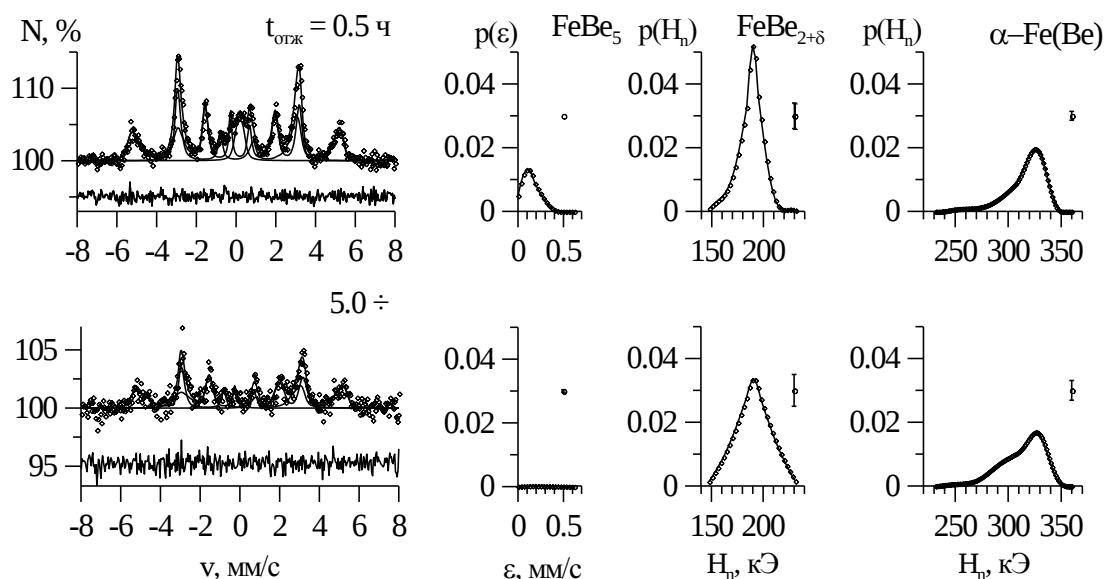


Рисунок 7 – КЭМС спектры ядер ⁵⁷Fe в слоистой системе Fe:O⁺-Be-⁵⁷Fe, снятые со стороны бериллиевого покрытия после соответствующих изотермических отжигов t_{отж}

КЭМС спектры представляют собой суперпозицию трех парциальных спектров. Наряду с секстетами, наблюдаемыми в геометрии "на пропускание", в спектре отчетливо видна парциальная составляющая, соответствующая по своим сверхтонким параметрам высшему бериллиду FeBe₅. В связи с этим, анализ и обработка КЭМС спектров осуществлялась восстановлением трех независимых функции распределения. Видно, что спектры состоят из комбинации парциальных спектров фаз: FeBe_x с квадрупольным смещением ε от 0 до 0.5 мм/с; FeBe_{2+δ} с набором магнитных полей H_n от 150 до 250 кЭ и α-Fe(Be) с набором полей H_n от 230 до 350 кЭ. При времени отжига t_{отж} = 5 ч спектр парамагнитного типа исчезает, что свидетельствует о растворении высших бериллидов FeBe_x в приповерхностной области α-Fe. Как видим, зависимости имеют сложный характер, соответствующий последовательным взаимным превращениям фаз. Такая последовательность фазовых преобразований может быть объяснена процессом взаимной диффузии бериллия и железа с сопутствующим фазообразованием.

После обработки мессбауэровских спектров и анализа функций распределения была рассчитана корреляционная зависимость дисперсии $S_{p(H_n)}^2$ функции распределения p(H_n) и среднего значения сверхтонкого магнитного поля H_n для твердого раствора α-Fe(Be) (Fe:O⁺-Be-⁵⁷Fe и Fe-Be-⁵⁷Fe). (См. рис. 8).

Причиной изменения среднего значения поля H_n и дисперсии распределения p(H_n) со временем отжига t_{отж}, является изменение концентрации атомов Be в матрице α-Fe, такое изменение возможно использовать для определения средней концентрации C_{Be} [13]. На рисунке 8 в правом верхнем углу приведена взаимосвязь концентрации C_{Be} атомов бериллия в твердом растворе α-Fe(Be) и среднего значения сверхтонкого магнитного поля H_n.

Штриховой линией приведена взаимосвязь корреляционной зависимости для значений $\Delta H_m = -23.4$ кГс и $\Delta H_n = -11.5$ кГс [13, 18].

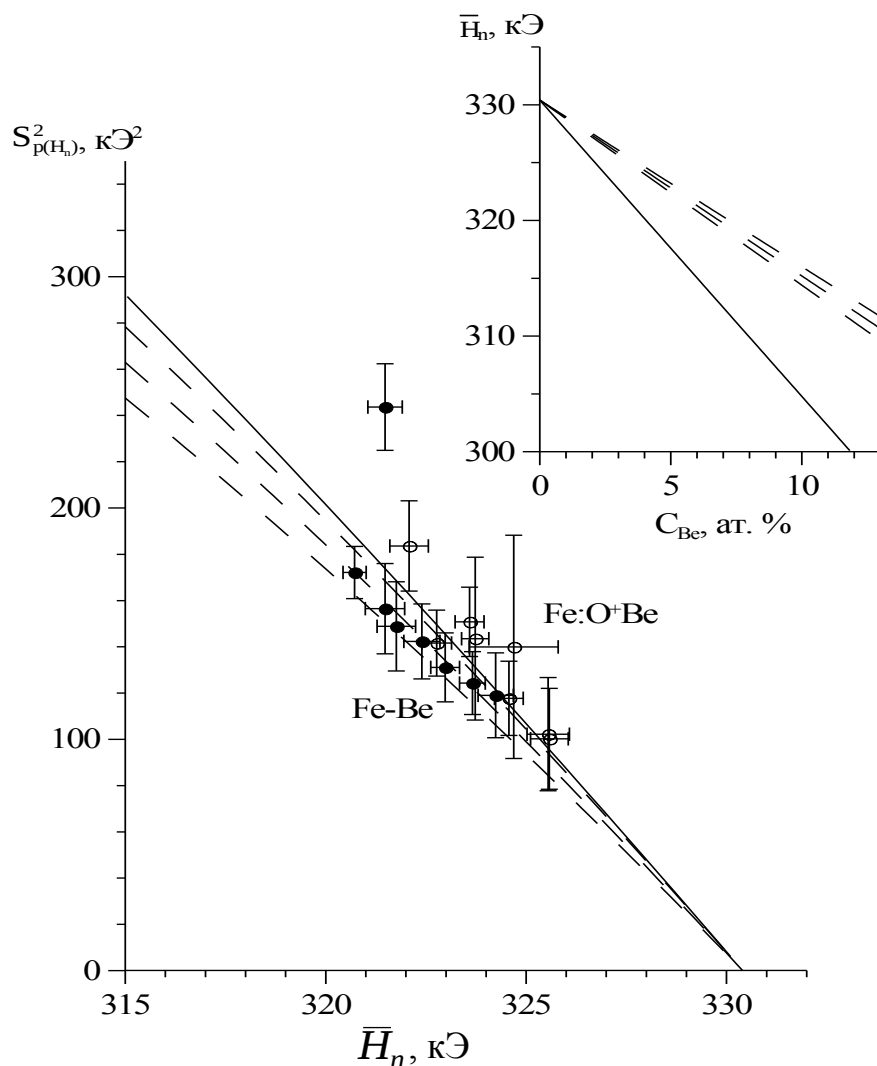


Рисунок 8 – Корреляционная зависимость дисперсии $S^2_{p(H_n)}$ функции распределения $p(H_n)$ от среднего значения эффективного магнитного поля $\bar{H}_n$ на ядрах ^{57}Fe для раствора α - Fe(Be)

Для подтверждения информации, полученной с помощью методов мессбауэровской спектроскопии были проведены рентгенофазовые исследования. Данные исследования слоистых систем выполнялись в интервале времени $\sim(0,5\div 60)$ часов отжига, как со стороны покрытия, так и со стороны железа. Измерения проводились в геометрии расходящегося рентгеновского пучка по Брэггу-Брентано и в геометрии параллельного рентгеновского луча.

Для более детального анализа рентгеновских дифрактограмм был выбран интервал углов $23^\circ \leq 2\theta \leq 29^\circ$, в котором регистрируются дифракционные рефлексы (100), (002) и (101) фазы $\text{FeBe}_{2+\delta}$, а также интервал $115^\circ \leq 2\theta \leq 120^\circ$, характерный для рефлексов: α -Fe и α -Fe(Be). В результате проведенных рентгенофазовых исследований следует, что в системе $\text{Fe:O}^+-\text{Be}-^{57}\text{Fe}$ наблюдается явное замедление процессов диффузии и связанных с ними фазовых превращений в отличие от системы без барьерного слоя.

В работе предложен и реализован метод восстановления функции распределения атомов Be в растворе α -Fe(Be) по данным рентгеновской дифракции. По данным расчетов интенсивность распределения атомов железа для системы Fe–Be(0.7 мкм)– ^{57}Fe (0.1 мкм) со стороны покрытия заканчивается при $t_{\text{отж}} \sim 5$ часов, а со стороны железа при $t_{\text{отж}} \sim 7,5$ часов. Для системы Fe:O⁺–Be(0.7 мкм)– ^{57}Fe (0.1 мкм) - со стороны покрытия при $t_{\text{отж}} \sim 20$ часов, со стороны железа достигает ~ 40 ч. Экспериментально наблюдается изменение кинетики процессов взаимной диффузии и фазовых превращений в системе с кислород-содержащим барьерным слоем.

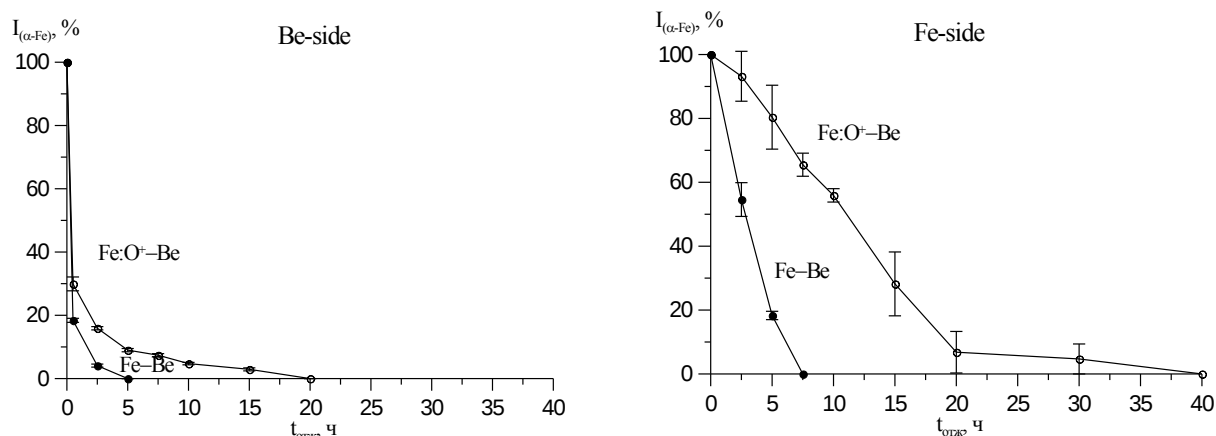


Рисунок 9 – Интенсивность распределения атомов железа для дифракционного рефлекса (310), полученные в результате анализа восстановления функции распределения $P(C_{\text{Be}})$ для слоистых систем Fe:O⁺–Be(0.7 мкм)– ^{57}Fe (0.1 мкм) и Fe–Be(0.7 мкм)– ^{57}Fe (0.1 мкм).

На рисунке 10 – представлены зависимости максимального значения 2θ для систем Fe–Be– ^{57}Fe и Fe:O⁺–Be– ^{57}Fe снятых с обеих сторон от времени изотермического отжига $t_{\text{отж}}$ при температуре $T_{\text{отж}} = 700^\circ\text{C}$, полученные методом восстановления функции распределения.

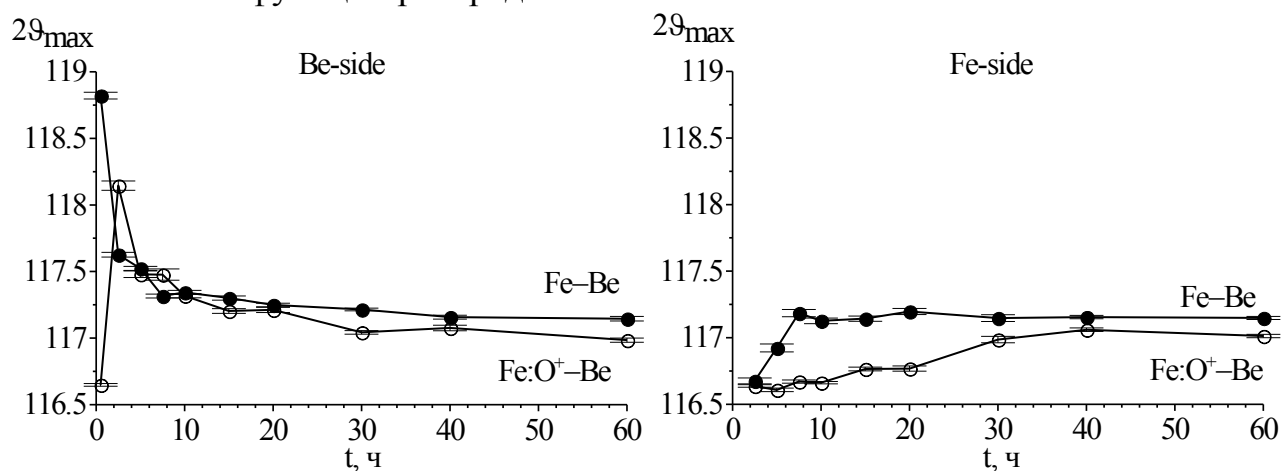


Рисунок 10 – Зависимости максимального значения 2θ для систем Fe–Be– ^{57}Fe и Fe:O⁺–Be– ^{57}Fe , снятые со стороны покрытия и железного сторон от времени изотермического отжига $t_{\text{отж}}$ при температуре $T_{\text{отж}} = 700^\circ\text{C}$, полученных методом восстановления функции распределения

С помощью предложенного метода восстановления функции распределения для данных слоистых систем, были установлены характерные времена равномерного распределения атомов бериллия по всей глубине α -Fe. Определено,

что в интервале $t_{\text{отж}}=(0.5\div 30)$ часов отжига в слоистой системе $\alpha\text{-Fe:O}^+\text{-Be-}^{57}\text{Fe}$ характерные процессы миграции атомов бериллия вглубь замедленны, в отличие от системы без барьерного слоя, а в интервале отжига $\sim(30\div 60)$ часов в обеих системах наблюдается плавное выравнивание средней концентрации атомов бериллия.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ:

1. Экспериментально установлена термическая стабильность имплантированного кислородного слоя в системе Fe:O^+ при энергиях частиц $E\sim 1.6$ МэВ, на основе которой впервые реализован метод замедления процессов диффузии и фазообразования в системе «железо-бериллий».

2. В рамках систематических исследований – методами мессбауэровской спектроскопии на ядрах ^{57}Fe , рентгенофазового анализа и резерфордского обратного рассеяния протонов впервые установлено влияние барьерного слоя на кинетику термически индуцированных процессов диффузии и фазовых превращений в слоистой системе Fe-Be и показано, что кислородный слой ограничивает зону растворения бериллия в приповерхностном слое образца; определена последовательность и характерные времена термически индуцированных процессов фазовых превращений в приповерхностных слоях и в объеме исследованных слоистых систем $\text{FeBe}_{2+\delta} \rightarrow \alpha\text{-Fe(Be)}$. Получены с помощью кинетического уравнения $I(t_{\text{анн}}) = I_0 \cdot \exp(-\frac{t_{\text{анн}}}{\tau})^2$ значения параметров фазы $\text{FeBe}_{2+\delta}$ как для случая с барьерным слоем кислорода, так и без него: $\tau(\text{Fe:O}^+\text{-Be}) = (4.38 \pm 0.18)$ часов и $\tau(\text{Fe-Be}) = (3.26 \pm 0.11)$ часов.

3. Показано, в имплантационной системе Cu:O^+ (энергия частиц $E\sim 100$ кэВ) при термическом воздействии происходит «расползание» барьерного слоя по глубине образца, концентрация кислорода от поверхности на глубине 850 нм при температуре отжига $\sim 180^\circ\text{C}$ составила ~ 14 ат.%. (время отжига $t_{\text{отж}}=3$ ч.). Установленный факт необходимо учитывать, как важное условие при создании «запирающих» термически устойчивых покрытий в многослойных металлических системах.

4. Экспериментально обнаружено для системы $\text{Fe}(10\text{ мкм}):O^+\text{-Be}(0.7\text{ мкм}) - ^{57}\text{Fe}(0.1\text{ мкм})$ по данным рентгеновской дифракции образование твердого раствора $\alpha\text{-Fe(Be)}$ со стороны железа только при $t_{\text{отж}}=15$ часов в отличие от системы без барьерного слоя.

5. Впервые предложен и реализован метод восстановления функции распределения концентрации атомов примеси в твердом растворе матрица-примесь. Определена кинетика процессов взаимной диффузии атомов Fe и Be в растворе $\alpha\text{-Fe(Be)}$ для обеих сторон образцов с барьерным слоем и без него. Установлено, для системы без барьерного слоя со стороны покрытия $I_{(\alpha\text{-Fe})}$ - интенсивность распределения атомов железа заканчивается при $t_{\text{отж}}\sim 5$ ч., а с обратной стороны образца при $t_{\text{отж}}\sim 7.5$ часов. Для случая с барьерным слоем со стороны покрытия до $t_{\text{отж}}\sim 20$ ч., а со стороны железа до ~ 40 ч.

6. Установлены характерные времена равномерного распределения атомов бериллия по глубине α -Fe. Процессы миграции атомов бериллия в интервале термических отжига $\sim(0.5\div 30)$ часов в системе α -Fe:O⁺-Be-⁵⁷Fe замедленны, в отличие от системы без барьерного слоя. В интервале $\sim(30\div 60)$ часов отжига в обеих системах наблюдается плавное выравнивание средней концентрации $C_{\text{вс}}$ по глубине матрицы армко-железа.

ПЕРЕЧЕНЬ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Нуркенов, С.А. Исследование структуры и свойств барьерных слоев в металлах (Fe, Cu) при низких энергиях /К.А. Кутербек, **С.А. Нуркенов**, С.Б. Кислицин, Т.А. Кукетаев, А.К. Тусупбекова //Известия высших учебных заведений. Физика. – 2016. – Т.59. – №7. – С.59 – 64.
2. Нуркенов, С.А. Исследование кинетики процессов диффузии и фазообразования в слоистой системе железо-бериллий /К.А. Кутербек, **С.А. Нуркенов**, С.Б. Кислицин, Т.А. Кукетаев, Т.Н. Нурахметов //Известия высших учебных заведений. Физика. – 2016. – Т.59. – №10. – С.67 – 71.
3. Nurkenov, S.A. Investigation of Structure and properties of barrier layers in metals (Fe, Cu) at low temperatures /К.А. Kuterbekov, **S.A. Nurkenov**, S.B. Kislitsin, T. A. Kuketaev and A. K. Tusupbekova //Russian Physics Journal, 2016. –Vol.59, No 7. – Pp. 978–983.
4. Nurkenov, S.A. The study of kinetics of diffusion and phase formation in the layered iron-beryllium system /К. А. Kuterbekov, **S.A. Nurkenov**, S. B. Kislitsin, T. A. Kuketaev, T.N. Nurakhmetov //Russian Physics Journal, 2017. –Vol. 59, No 10. – Pp.1593–1598.
5. **Нуркенов, С.А.** Создание «запирающего» слоя в матрице α -Fe ионами кислорода, препятствующего диффузии атомов бериллия и атомов железа /**С.А. Нуркенов**, С.Б. Кислицин, В.И. Антонюк, И.Д. Горлачев, В.С. Русаков, К.К. Кадыржанов //Вестник национального ядерного центра Республики Казахстан - №4. 2006.- С. 16-22.
6. **Нуркенов, С.А.** Влияние имплантационного слоя кислорода на процессы диффузии и фазовых превращений в системе железо-бериллий /**С.А. Нуркенов**, В.С. Русаков, К.К. Кадыржанов, В.И. Антонюк. //Вестник КазНУ. Алматы. №1 (23). -2007г. - С. 102-109.
7. **Нуркенов, С.А.** Влияние имплантированных ионов кислорода на термически индуцированные процессы в слоистой системе железо-бериллий /**С.А. Нуркенов**, С.Б. Кислицин, В.С. Русаков, К.К. Кадыржанов. //Вестник НЯЦ. Вып. 3. – 2007. – С. 37 - 44.
8. **Nurkenov, S.A.** Thermally induced processes in lamellar system iron-beryllium in the presence of implanted oxygen ions /**S.A. Nurkenov**, S.B. Kislitsin, V.S. Rusakov, K.K. Kadyrzhanov //Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Астана. 2008 г. №2 (62) - С. 122-130.
9. Kadyrzhanov, K.K. Influence of implanted oxygen on the kinetic of thermally induced phase transition in lamellar iron-beryllium system. /K.K. Kadyrzhanov, V.S.

Rusakov, **S.A. Nurkenov**, S.B. Kislitsin. //The Fourth Eurasian conference on nuclear science (31- 3).11.2006 Baku. - P.84-89.

10. Кадыржанов, К.К. Кинетика процессов диффузии и фазовых превращений в системе железо-бериллий с имплантированным слоем кислорода /К.К. Кадыржанов, В.С. Русаков, **С.А. Нуркенов**, С.Б. Кислицин. //7-ая международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», Минск, Беларусь. 26-28 сентября ВИТТ-2007. -С. 192-194.

11. **Нуркенов, С.А.** Мессбауэровские исследования процессов диффузии и фазовых превращений в системе железо-бериллий с имплантированным слоем кислорода /С.А. Нуркенов, С.Б. Кислицин, В.С. Русаков, К.К. Кадыржанов //Сборник трудов ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, г. Астана. 2007 г. ч.5а. - С. 123-127.

12. **Нуркенов. С.А.** Исследование процессов диффузии и фазовых превращений в слоистой системе железо-бериллий с имплантированным слоем кислорода /**С.А. Нуркенов** //Сборник трудов I-ой Международной конференции «Инновационное развитие и востребованность науки в современном Казахстане». Фонд первого президента РК, 14. 12 2007 г. г. Алматы, - С. 243-249.

13. **Нуркенов, С.А.** Влияние имплантированного слоя кислорода на кинетику процессов взаимной диффузии атомов железа и бериллия в слоистой системе железо-бериллий /**С.А. Нуркенов**, С.Б. Кислицин, К.А. Кутербеков, В.С. Русаков, К.К. Кадыржанов //Международная научная конференция молодых ученых «Наука и образование – 2008». Сборник трудов ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, 25-26 апреля 2008 г. Астана. - С. 277-280.

14. **Нуркенов, С.А.** Исследование термической стабильности, структуры и физико-механических свойств захороненных барьерных слоев, сформированных низкоэнергетичной имплантацией кислорода на ускорителе DC-60 /**С.А.Нуркенов** //Сборник трудов III Международной конференции «Инновационное развитие и востребованность науки в современном Казахстане». Фонд первого президента РК, 10.12 2009г. г. Алматы. –С. 255-259.

15. **Nurkenov, S.A.** Investigation of structure and mechanical properties of buried barrier nanolayers produced by oxygen implantation by the DC-60 accelerator /Nurkenov S.A., Kuterbekov, K.A., Kislitsin S.B, Kadyrzhanov K.K., Rusakov V.S //International meeting on nuclear spectroscopy and nuclear structure NUCLEUS-2009. Fundamental problems and applications of nuclear physics: from space to nanotechnologies. Vol. 42.

16. Кукетаев (Кокетай), Т.А. Создание барьерного слоя в металлах (Cu, Fe) и сплаве 12X18H10T методом ионной имплантации /Т.А. Кукетаев (Көкетай), К.А. Кутербеков, **С.А Нуркенов**, С.Б. Кислицин // Материалы международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и инновационные тенденции современного образования и науки». 26-27 января 2017год, г. Туркестан, Республика Казахстан. - С.67-70

17. **Нуркенов, С.А.** Влияние барьерного слоя на процессы диффузии и фазообразования в системе Fe-Be / **С.А. Нуркенов**, Т.А. Кукетаев (Көкетай), К.А. Кутербеков, С.Б. Кислицин //Материалы международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и инновационные тенденции современного

образования и науки». 26-27 января 2017 год, г. Туркестан, Республика Казахстан. –С.25-28

18. **Nurkenov, S.A.** Investigation of impact of implanted oxygen ions on thermally induced processes in lamellar system iron-beryllium /**S.A. Nurkenov**, S.B. Kislitsin, I.D. Gorlachev, V.I. Antonyuk, V.S. Rusakov, K.K. Kadyrzhanov //The Fourth Eurasian conference on nuclear science and its Application, Baku-2006, Pp. 32-33.

19. **Nurkenov, S.A.** Kinetic of diffusion processes and phase transformations in lamellar system iron-beryllium with implanted oxygen /**S.A. Nurkenov**, V.S. Rusakov, K.K. Kadyrzhanov //International Conference on the Applications of the Mössbauer Effect. Kanpur, INDIA. T1. -2007. - P16.

20. **Нуркенов, С.А.** Термически индуцированные процессы в слоистой системе железо-бериллий при наличии имплантированных ионов кислорода /**С.А. Нуркенов**, А.С. Елисеев, В.И. Антонюк, И.Д. Горлачев, С.Б. Кислицин, В.С. Русаков, К.К. Кадыржанов //ICNRP'07 6-ая Международная конференция ядерная и радиационная физика. 4-7 июня 2007г. Алматы, РК. - С. 416-417.

21. **Нуркенов, С.А.** Влияние имплантационного слоя кислорода на термически индуцированные процессы в слоистой системе железо-бериллий /**С.А. Нуркенов**, В.С. Русаков, К.К. Кадыржанов, В.И. Антонюк, С.Б. Кислицин. //Международный конгресс студентов, магистрантов и молодых ученых «Мир науки» г. Алматы, 24-25 апреля 2007 г. - С. 37.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lawrence, A. Ion Implantation for Semiconductor Doping and Materials modification. /A. Lawrence, Justin M. Williams and Michael I. //Current Reviews of Accelerator Science and Technology.-2012. -Pp.11-40.

2. Прохоров, А.М. Ионная имплантация /А.М. Прохоров. Физическая энциклопедия. Т. 2 — Москва: Советская энциклопедия, 1990. С. 197–199.

3. Хирвонен, Дж. Ионная имплантация /Дж. Хирвонен. — Москва: Металлургия, 1985. -392с.

4. Колачев, Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов /Б.А. Колачев, В.И. Елагин, В.А. Ливанов. Учебник для вузов. — 3-е изд. Москва: МИСИС, 1999. -416 стр.

5. Алов, Н. Влияние ионной имплантации кислорода на состав поверхностных слоев молибдена /Г.Б. Петров, Г.А. Григорьев 1987. Поверхность. №3 с.100-105

6. Ishkov, V.N. Relative ion Fe, C and O abundances in quiet time particle fluxes in the 23 SC /V.N. Ishkov, M.A. Zeldovich, K. Kecskeméty, Yu. I. Logachev //Advances in Space Research. Vol. 50, Issue 6, 15 September 2012 pp. 757-761

7. Насыров, Ш.Г. Особенности создания и использования ионно-плазменных покрытий /Ш.Г. Насыров Москва: Машиностроитель, 1999. №11, С.54-55.

8. Кадыржанов, К.К. Ионно-лучевая и ионно-плазменная модификация материалов /К.К. Кадыржанов, Ф.Ф. Комаров, А.Д. Погребняк, В.С. Русаков, Т.Э. Туркебаев. — Москва: —Московский государственный университет -2005 — 640с.

9. Кадыржанов, К.К. Применение термодинамического подхода и ионных технологии к решению проблемы химической совместимости жаростойких

поверхностных слоев с жаропрочными материалами на примере никель хромовых сплавов /К.К. Кадыржанов, Т.Э. Туркебаев, А.Л. Удовский. ДАН – 1993, Т.331, № 4. -С.434-438.

10. Кадыржанов, К.К. Ионные технологии многослойных металлов материаловедения /Туркебаев Т.Э., Удовский А.Л. «Вакуумная техника и технологии». Алма-Ата. -1992. Т.2, №5,6. -С.3-11

11. Kadyrzhanov, K.K. Diffusion and phase formation in thin two-layer Fe-Be films after subsequent isochronous annealing /Kadyrzhanov K.K., Rusakov V.S., Turkebaev T.E., Kerimov E.A., Lopuga A.D. //Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 2001. v. 174 -pp. 463-474.

12. Kadyrzhanov, K.K. Mossbauer study of thin iron film beryllization. / K.K. Kadyrzhanov, Rusakov V.S., Turkebaev T.E., Vereschak M.F., Kerimov E.A., Plaksin D.A. // Kluwer Academic Publishers 2002. v. 141, -pp. 453-457.

13. Кадыржанов, К.К., Компьютерное моделирование механизма термической стабилизации слоистых систем железо-бериллий /Кадыржанов К.К., Туркебаев Т.Э., Русаков В.С., Плаксин Д.А., Жанкадамова А.М., Кислицин С.Б., Енсебаева М.З. // Вестник НЯЦ РК. 2003. №4. -С.32-38.

14. Папилов, И.И. Структура и свойства сплавов бериллия /И.И. Папилов // Справочник. – Энергоиздат. - Москва – 1981. –368с.

15. Бочвара, А.М. Бериллий и его сплавы. /А.М. Бочвара, А.К. Трапезникова. – М., ГНТИ, 1931. – 301 с.

16. Русаков, В.С. Мессбауэровская спектроскопия локально неоднородных систем /В.С. Русаков//. Уч. пособие – Алматы -2000. -430с.

17. Ohta, K. Mössb. effect and magnetic properties of Iron-Beryllium compounds. /K. Ohta //Journal of Applied Physics. – 1968. – V.39. – №4. – Pp. 2123 – 2126.

18. Yagisava, K. The Mössb. studies of the Decomposition and Ordering in Fe-23 at % Be Alloy Aged at 300°C. /K. Yagisava. Phys.Stat. Sol.(a) 1973 V.18. -Pp. 589-596.