

14-99-116

На правах рукописи
УДК 621.039.553:669.296+66.018.86
539.5.620:669.265'24-194.56

X-859

ХОФМАН Анджей

**РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ИЗМЕНЕНИЯ
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РЕАКТОРНЫХ
МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ НЕЙТРОНАМИ
И ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

Специальность: 01.04.07 — Физика твердого тела

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва 1999

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им.Г.Н.Флерова
Объединенного института ядерных исследований

Научные консультанты:

доктор физико-математических наук,
профессор
доктор физико-математических наук

Бондаренко Г.Г.
Дидык А.Ю.

Официальные оппоненты:

заслуженный деятель науки Республики Беларусь
доктор технических наук, профессор
доктор физико-математических наук
доктор физико-математических наук

Гольцев В.П.
Луциков В.И.
Платов Ю.М.


Ведущая организация - Государственный научный центр РФ "Институт
теоретической и экспериментальной физики", г.Москва

Защита состоится " " 1999 г. в часов на
заседании диссертационного Совета Д.063.68.04 в Московском государственном
институте электроники и математики (техническом университете) по адресу:
109028, Москва, Б.Трехсвятительский пер., д.3/12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГИЭМ.

Автореферат разослан " " 1999 г.

Ученый секретарь диссертационного
Совета, к.ф.-м.н.

 Ю.И.Сезонов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ. Повышение работоспособности в сочетании с высокой экономичностью ядерных энергетических установок (ЯЭУ) с реакторами на тепловых нейтронах, создание реакторов на быстрых нейтронах и многоцелевых установок на их основе, развитие исследований по управляемому термоядерному синтезу и разработка проектов термоядерных энергетических установок (ТЭУ) потребовало решения многих научно-технических проблем. Эти проблемы содержат достаточно широкий круг вопросов ядерной физики, физики твердого тела, теплофизики, реакторного материаловедения, экологии, а также многих других, в связи с чем созданы национальные и международные программы. Отметим, что выбор или создание новых материалов, которые должны выдерживать высокие механические, термические, электромагнитные нагрузки в условиях воздействия мощных потоков ионизирующих излучений с широким спектром по энергиям и по составам, необходимость работы в коррозионно-активных средах, при высоких температурах и давлениях является одной из основных проблем в создании надежных, безопасных и экологически чистых ядерных установок.

К настоящему времени открыты и интенсивно изучаются физические явления, протекающие в твердых телах под воздействием ионизирующих излучений и во многом определяющие работоспособность элементов и узлов ЯЭУ, ТЭУ; к ним относятся радиационный рост и распухание, упрочнение и охрупчивание, радиационная ползучесть и др. Одновременно с этими процессами радиационно-стимулированные фазовые превращения и изменения структуры ядерные реакции и, как следствие, радиационное легирование, также приводят к изменению физико-механических свойств реакторных материалов. Следует заметить, что в основе всех этих явлений лежат первичные процессы смещения атомов из узлов кристаллической решетки и образования продуктов ядерных реакций, а уровень изменения физико-механических свойств адекватно связан с конфигурациями радиационных дефектов и атомов-трансмутантов. Это обстоятельство дает надежду на создание представлений о радиационных эффектах изменения

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

свойств твердых тел и установления достаточно общих закономерностей их радиационного повреждения.

Известно, что для проведения полномасштабных радиационных испытаний требуется длительное время облучения в исследовательских реакторах для набора высокого флюенса нейтронов, соответствующих действующим или проектируемым ЯЭУ. Длительные экспозиции облучения приводят к существенной активации исследуемых образцов, что требует использования дистанционной и защитной техники, а все вместе - специальных мероприятий в области экологии.

Необходимость в ускорении реализации указанных выше программ за счет быстреего набора необходимой дозы повреждения, отсутствия резкого уменьшения активации при сохранении достоверности результатов радиационных испытаний послужила основанием для развития ускорительной техники специального назначения и появления широкого класса источников заряженных частиц. При ионном облучении были достигнуты высокие скорости дефектообразования, в результате чего время набора необходимых доз сокращается в 10^3 - 10^6 раз, а активация образцов практически отсутствует.

Заметим, что применение тяжелых и легких ионов с высокими удельными ионизационными потерями энергии дало возможность обнаружить ряд особенностей в процессах образования дефектов, которые не могли быть объяснены в рамках механизма упругих соударений. Имелось также отличие и в процессах распыления материалов при их бомбардировке осколками деления и тяжелыми ионами.

Отмеченное выше послужило основанием для развития одного из разделов физики конденсированных сред - радиационной физики твердого тела. Очень скоро выяснилось, что при использовании заряженных частиц для моделирования воздействия нейтронов на применяемые или вновь разрабатываемые материалы ЯЭУ необходимо создание методики и техники имитационных экспериментов. Одновременно с этим использование ускорительной техники показало, что облучение твердых тел интенсивными потоками частиц высоких энергий открывает и самостоятельное направление

радиационной физики твердого тела - модификация структуры и свойств при ионной имплантации.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ. Получение счетно-экспериментальных данных о радиационно-термических процессах изменений физико-механических свойств твердых тел, исследование процессов взаимодействия тяжелых заряженных частиц (ионов) и быстрых нейтронов с конденсированными средами, изучение процессов дефектообразования в модельных материалах, изменения микроструктуры и фазового состояния, определение критериев моделирования для оценки радиационной повреждаемости при облучении ионами и нейтронами реальных материалов ядерной и термоядерной энергетики.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Изучение кинетики и механизма фазовых превращений в уране и его сплавах с хромом, установление параметров термической обработки с целью формирования в уране мелкозернистой равноосной структуры.
2. Исследование коррозии под напряжением циркония и его сплавов в парах йода с установлением границ деформации, определяющих работоспособность материала тепловыделяющих элементов ЯЭУ.
3. Исследование фундаментальных аспектов процессов взаимодействия тяжелых ионов и быстрых нейтронов с модельными материалами (алюминий, цирконий, медь, никель, ванадий) и конструкционными реакторными материалами (циркониевые сплавы, хромоникелевые стали и др.) и установление корреляций радиационных эффектов изменения их физико-механических свойств в зависимости от параметров облучения.
4. Изучение физико-механических свойств металлов и сплавов, облученных высокоэнергетическими потоками ионов и нейтронов, установление критериев моделирования радиационных повреждений и возможностей их перенесения на реальные конструкционные материалы, перспективные для ядерной и термоядерной энергетики.
5. Исследование радиационно-отжигового упрочнения (РОУ) ванадия и его сплавов, облученных тяжелыми ионами и нейтронами, и разработка модели, позволяющей описать зависимость РОУ ванадия от флюенса, температуры облучения и химически активных легирующих добавок.

6. Разработка и создание комплекса экспериментальных установок для облучения материалов и элементов в ядерных реакторах и ускорителях тяжелых ионов (ампульные, петлевые установки, вакуумные каналы и т.п.), позволяющих получать, поддерживать и контролировать условия облучения.

7. Получение экспериментальных данных о пространственных и энергетических распределениях ионных пучков и соответствующих структурных и структурно-фазовых изменениях в облученных материалах.

ОБЩАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ была направлена на получение экспериментальных данных о процессах структуро- и дефектообразования в широкой группе материалов, включающей модельные (Al, Zr, Cu, Ni, V), а также реакторные (циркалой и хромоникелевые стали двух типов составов 0X18N10T и 00X17N14M2), ядерное топливо (U+0,4%Cr и др.), при радиационно-термическом воздействии. Для ввода радиационных дефектов использовались ускорители тяжелых ионов с энергиями вплоть до 10 МэВ/а.е.м., для структурных изменений - ядерные реакторы с потоком быстрых нейтронов ($E > 0,1$ МэВ) порядка $1,4 \cdot 10^{17}$ нейтр/(м²·с).

Сечения образования дефектов по глубине образца рассчитывали по компьютерной программе E-DEP-1, а длины проективных пробегов R_p - с использованием компьютерной программы TRIM-90.

Для анализа радиационных эффектов в облученных материалах использовалась сканирующая и просвечивающая электронная микроскопия, методы рентгеновского анализа, электрон-позитронной аннигиляции, внутреннего трения, а также широкий спектр методов исследования механических свойств. Отметим, что в связи с необходимостью миниатюризации испытаний из-за малой величины R_p были разработаны специальные методики, позволяющие переносить полученные результаты на макроскопические образцы.

Комплекс экспериментальных методов обеспечивал корректность, повторяемость и объективность полученных данных и, как следствие, их достоверность. Облучение проводилось на ускорительном комплексе тяжелых ионов ФЛЯР (ИЦ-100, У-200, У-400 и др.), обладающем широким спектром ионов: от дейтерия до ксенона при энергиях от 1 до 10 МэВ/а.е.м., а также в

ядерных реакторах ИБР-2 (ОИЯИ), ЕВА и MARIA (Сверк, Республика Польша) в вертикальных каналах с потоком быстрых нейтронов $1,38 \cdot 10^{17}$ нейтр/(м²·с). Послерadiационные исследования выполнялись на установках и аналитических приборах ИАЭ (Сверк), ЛЯР ОИЯИ, ИМЕТ РАН, ИАЭ и БГУ (г.Минск), ИАЭ им.И.В.Курчатова.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. При выполнении диссертационной работы были впервые решены следующие вопросы:

1. Изучена кинетика изотермического превращения сплавов U-0,4 вес.%Cr, в результате чего установлено, что в интервале температур 400-660⁰C превращение описывается двумя C-образными кривыми (ранее была известна одна C-образная кривая).

2. Исследована коррозия образцов и оболочек тепловыделяющих элементов из циркониевых сплавов под напряжением в среде паров йода (осколков деления).

3. Изучены радиационные эффекты в металлах (Al, Zr, Cu, Ni, V) и сплавах (Zr-1%Nb и сплавах V с добавками Zr, Y, Nb, Ti и Fe) после их облучения тяжелыми ионами с энергиями более 1 МэВ/а.е.м. и быстрыми нейтронами с энергиями более 0,1 МэВ до флюенсов $2 \cdot 10^{24}$ нейтр/м², основными из которых являются:

- радиационное упрочнение, зависящее для чистых металлов от флюенса облучения и стремящееся к насыщению при увеличении флюенса;
- уровень насыщения эффекта упрочнения зависит от массы бомбардирующих ионов, что обусловлено различиями в энергетических спектрах первично-выбитых атомов (ПВА);
- упрочнение ванадия и его сплавов, характер которого при облучении тяжелыми ионами и нейтронами демонстрирует качественное подобие. Пострадиационный отжиг сложным образом изменяет уровень радиационно-отжигового упрочнения (РОУ) и снижения пластичности при сохранении различия в прочности, обусловленного исходной структурой.

Развита феноменологическая модель, позволяющая описать совокупность экспериментов по зависимости РОУ ванадия от флюенса, температуры облучения и химической активности легирующих элементов.

4. Исследованы физико-механические свойства циркония, его сплавов и хромоникелевой стали типа 0X18H10T, облученных тяжелыми ионами и быстрыми нейтронами, которые показали следующее:

- с ростом флюенса увеличивается предел текучести $\sigma_{0,2}$ и в меньшей степени предел прочности при заметном уменьшении пластичности;

- установлено, что при равных повреждающих дозах облучение нейтронами приводит к более интенсивному упрочнению материалов, чем облучение ионами. Причина этих различий может быть связана с энергетическим спектром ПВА и скоростью образования радиационных дефектов структуры;

- расчетно-экспериментальные исследования концентрации дефектов, их типа и размеров показали, что на начальных стадиях механизм упрочнения определяется моделью барьерного радиационного упрочнения и описывается уравнением $\Delta\sigma_{0,2}=A(1-e^{-B\Phi t})^{1/2}$.

5. Изучены радиационные эффекты изменения структуры и свойств основных конструкционных материалов ЯЭУ (сталей аустенитного типа 0X18H10T и 00X17H14M2), облученных тяжелыми ионами и быстрыми нейтронами.

6. Создан комплекс экспериментальных установок для облучения конструкционных материалов и элементов активных зон ЯЭУ в ядерных реакторах и ускорителях, позволяющих поддерживать условия облучения для внутриреакторных или пострадиационных исследований физико-механических свойств.

7. Установлены общие закономерности изменения физико-механических свойств материалов, радиационные эффекты прочности и пластичности, радиационно-отжигное упрочнение металлов и сплавов, полученных в корреляционных экспериментах при облучении тяжелыми ионами и нейтронами, что дает возможность использовать их для практического решения задач физики радиационных повреждений и реакторного материаловедения.

8. На основе опыта, полученного при индукционно-вакуумной плавке и литье сплавов урана, созданы и внедрены на опытном заводе оборудование и технология производства элементов защиты гамма-источников.

9. Изученные эффекты модификации структуры и свойств приповерхностных областей ионно-облученных металлов и сплавов имеют важное значение для практического использования в новых ядерно-физических технологиях.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ:

1. Результаты исследования кинетики и механизма изотермического $\beta \rightarrow \alpha$ -превращения в сплаве U+0,4%Cr и научные основы выбора режимов термообработки с целью получения радиационноустойчивой мелкокристаллической структуры.

2. Результаты изучения процессов коррозионного разрушения элементов оболочек твэлов из циркония и его сплавов в среде паров йода; установление пороговых напряжений и деформаций в материале для развития разрушения.

3. Радиационные эффекты в металлах (Al, Zr, Cu, Ni, V) и их сплавах, включающие структурно-фазовые изменения, радиационное упрочнение, радиационно-отжигное упрочнение, в результате их облучения тяжелыми ионами и быстрыми нейтронами.

4. Результаты исследования процессов образования дефектов структуры, их типа и конфигурации в зависимости от температуры, дозы повреждения и их связь с изменением физико-механических свойств металлов и хромоникелевых сталей аустенитного класса типа 18-10, облученных ионами с энергией более 1 МэВ/а.е.м. и нейтронами с энергиями более 0,1 МэВ.

5. Моделирование радиационных повреждений и результаты корреляционных исследований механических свойств конструкционных реакторных материалов (сплавы циркония, аустенитные стали 0X18H10T, 00X17H14M2 и др.) при их облучении тяжелыми ионами и быстрыми нейтронами.

6. Комплекс экспериментальных установок и оборудования для облучения материалов и элементов конструкций в активных зонах ядерных реакторов и на ускорителях тяжелых ионов (ампульные, петлевые установки, вакуумные каналы), обеспечивающих внутриреакторное и пострадиационное изучение свойств материалов.

Выполненная работа и ее результаты вносят вклад в развитие нового научного направления в комплексной проблеме физики твердого тела, связанной с физикой радиационных повреждений конденсированных сред, и аккумулируют новые сведения для развития проблемы модификации

структуры и свойств материалов при воздействии тяжелых ионов высоких энергий.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих симпозиумах, конференциях и совещаниях: Совещание по экспериментальным работам по сплавам урана, Россендорф, июнь 1963 г.; Югославско-польский симпозиум по технологии и металлургии урана, сентябрь 1963 г.; Konferencja Metaloznawcza PAN, Krakow 1968 г.; Polish-Italian Symposium on Reactor Materials, Zakopane, June, 1970; III International Powder Metallurgy Conference, Karlove Vary, CSRS, 1970; Конференция стран-членов СЭВ по атомной энергетике, топливным циклам и радиационному материаловедению, Ульяновск, 1971 г.; Konferencja Komitetu Hutnictwa PAN, Krynica, 1971 г.; Seminarium POLONU "Metody i urzadzenia dla izotopowych badan nieniszczacych", Warszawa, pazdziernik 1973 г.; Seminarium "Metody i urzadzenia dla izotopowych badan nieniszczacych", Osrodek Informacji o Energii Jadrowej, Warszawa, 1975 г.; Konferencja Naukowo-Techniczna, Energetyka Jadrowa 79, Swierk, czerwiec 1979 г.; Совещание по ядерным фильтрам и радиационному материаловедению, Дубна, 1986 г.; International School and Symposium on Physics in Materials Science Using Nuclear and Complementary Methods (ISSPMS'93) Jaszowiec, Poland, 12-18 september 1993; 1-st International symposium "Beam Technologies (BT'95), Dubna, Russia, February-March 1995; VI Межнациональное совещание "Радиационная физика твердого тела", Севастополь, 1-6 июля 1996 г.; III и IV Научно-технические конференции "Вакуумная наука и техника", Гурзуф, 25 сентября-2 октября 1996 г., 23-30 сентября 1998 г.; Симпозиум "Синергетика, структура и свойства материалов, самоорганизующиеся технологии", Москва, 1996 г.; VII Межнациональное совещание "Радиационная физика твердого тела", Севастополь, 30 июня-5 июля 1997 г.; VI International School-Seminar "Heavy Ion Physics", September 22-27, 1997, Dubna, Russia.

ПУБЛИКАЦИИ

По результатам исследований, вошедшим в настоящую диссертацию, опубликовано 93 работы, в том числе 52 статьи в международных и российских научных журналах, тематических сборниках, сообщениях, препринтах Объединенного института ядерных исследований, Института

ядерных исследований (Сверк) и Института атомной энергетики (Сверк), патенты и изобретения, 26 внутренних препринтов ИАЭ. Основные результаты представлены в 45 научных публикациях, вошедших в список цитируемых работ.

СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, основных результатов и выводов и списка использованной литературы. Полный объем диссертации составляет 365 стр., в том числе 331 страница текста, 165 рисунков, 37 таблиц, литературный обзор содержит 341 работу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** определена область исследований и излагается концептуальный подход к проблемам физики радиационных повреждений твердых тел и целесообразность применения тяжелых ионов высоких энергий и быстрых нейтронов, а также рассмотрены перспективы модификации структуры и свойств в результате взаимодействия заряженных частиц (ионов) с веществом.

Дано обоснование научной и практической значимости решаемой в диссертации проблематики.

В первой главе излагаются результаты влияния термического и радиационного воздействий на структуру, фазовое состояние и механические свойства реакторных материалов, специфические особенности веществ, отличающихся друг от друга составом и природой химических связей. Содержание главы характеризуется, по крайней мере, двумя особенностями: во-первых, при общем обзорном характере глава содержит и собственные оригинальные результаты автора и, во-вторых, исходя из поставленных в диссертации задач получения экспериментальных данных по радиационным повреждениям твердых тел и выбору или созданию материалов новой техники, в главе рассмотрены с позиций реакторного материаловедения основные используемые материалы активных зон ядерных энергетических установок.

Отдельный параграф посвящен влиянию термических воздействий, напряженного состояния и коррозионно-активной среды (осколков деления) на компоненты тепловыделяющих элементов: металлический уран и его сплав с 4 вес.% хрома, циркониевые сплавы типа Zr+1 вес.%Nb и циркалой-2.

При исследовании кинетики фазовых превращений $\beta \rightarrow \alpha$ в сплавах U-Cr установлено, что диаграмма изотермического превращения состоит из двух отдельных S-образных кривых: верхняя в интервале температур 660-520⁰С, нижняя в интервале 520-400⁰С. При этом механизм превращения изменяется в области температур 500-520⁰С. Термообработка сплава U+0,4%Cr из β -фазы способствует образованию мелкозернистой структуры, что приводит к повышению размерной стабильности урана при облучении (рис.1).

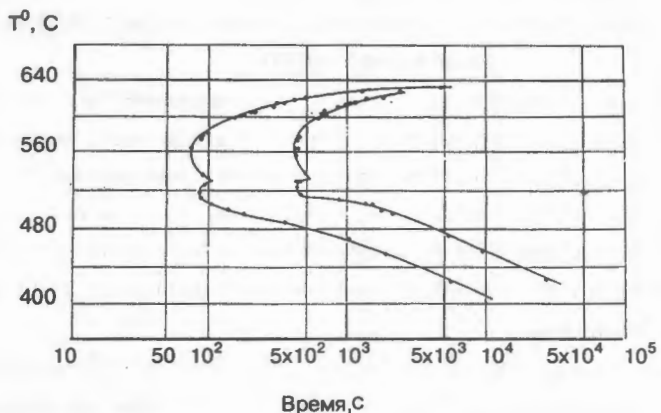


Рис.1. Предполагаемая диаграмма температура-время-превращение для сплава U-0,4 вес.%Cr в области 630-400⁰С.

При изучении коррозионного разрушения циркониевых оболочек твэлов установлена строгая зависимость между повреждениями, образованием и накоплением продуктов деления, основным из которых является йод.

Были определены пороговые критерии для возникновения коррозии под напряжением: увеличение предела текучести и понижение пластичности при флюенсе несколько выше, чем 10^{25} нейтр/м²; удлинение до разрушения при этом составляет менее 1%. Вторым важным фактором в развитии разрушения в виде трещин может оказаться скорость деформации материала. Острая коррозия под напряжением была замечена при скорости деформации около $(1-3) \cdot 10^{-3}$ мин⁻¹. Важна при этом и концентрация йода, причем критической для разрушения является концентрация йода примерно 3 мг/см³ для

температуры 573 К и начального напряжения 310 МПа. Заметим, что облучение, как и холодная деформация, влияет на проявление склонности Zr-сплавов к коррозии под напряжением, что подтверждено экспериментально.

В современной атомной технике конструкционные материалы находятся в контакте с коррозионно-активными средами, каковыми являются теплоносители. Показано, что облучение, возникающие напряжения и другие термо-радиационные эффекты усугубляют коррозионное воздействие среды. В этом плане широкое распространение в качестве конструкционных материалов ЯЭУ получили хромоникелевые стали и сплавы никеля.

Для термоядерных реакторов (ТЯР) с магнитным удержанием плазмы перспективными материалами для отдельных конструкций в рассматриваемых проектах могут служить по мере увеличения рабочих температур от 150 до 1000⁰С алюминий, ванадий и их сплавы, а также ферритные и аустенитные хромоникелевые стали, молибден и вольфрам.

Материалы активных зон ЯЭУ, по функциональному назначению объединенные в топливные (делящиеся), поглощающие, замедляющие и отражающие нейтроны, и наконец - конструкционные материалы, находятся в интенсивных полях ионизирующих излучений. Естественно, их радиационная стойкость будет определять работоспособность элементов и узлов ядерных установок.

Исходя из новых концепций по созданию так называемых безопасных ядерных реакторов и расширения в связи с этим работ по атомной энергетике, в первую главу включен обзор данных по поведению основных видов материалов активных зон, включая и результаты собственных исследований. Вместе с тем, основное внимание нами уделено радиационным эффектам изменения свойств этих материалов, исходя из того, что в основе повреждения ядерного горючего, перспективных поглотителей на основе бора, замедлителей на основе бериллия и др. лежат ядерные реакции с образованием атомов-трансмутантов (осколков деления, продуктов ядерных реакций типа (p,α)), включающих газообразные атомы, а также дефекты структуры. Подробно рассмотрены основные виды повреждений: радиационное распухание, радиационная ползучесть, газовыделение, низкотемпературное упрочнение и высокотемпературное охрупчивание.

Заметим, что основную роль в изменении свойств конструкционных материалов играют как скопления атомов гелия в результате реакции $B(n,\alpha)Li$, так и вторичные фазы в виде карбидов, нитридов, фаз Лавеса и др., приводящие к охрупчиванию и преждевременному разрушению при ползучести в результате радиационного старения.

Для облучения и исследования радиоактивных образцов в Институте ядерных исследований и Институте атомной энергии (г.Сверк, Республика Польша) с участием автора создан комплекс специального оборудования. В главе дано описание ампульных и петлевых установок для облучения материалов в ядерных реакторах EWA и MARIA и лаборатории "горячих" камер для послерадиационного исследования образцов. Лаборатория включает 12 "горячих" камер со свинцовой защитой, которая позволяет работать с радиоактивными материалами до 4 ТБк (100 Кюри). Камеры оборудованы современными машинами и приборами для исследования механических, физических и химических свойств облученных конструкционных материалов.

Во второй главе рассмотрены научно-методические вопросы, обеспечивающие выполнение поставленной в диссертации проблематики, включающие обоснование и выбор материалов для исследований, методологию облучения образцов тяжелыми ионами и быстрыми нейтронами и изучения их физико-механических свойств.

Как показал анализ литературных данных, наши исследования и ряд соображений экономического, экологического и др. характера, одним из основных видов сырья атомной промышленности является металлический уран и его сплавы. Уран используется также и в других отраслях новой техники: металлургии, самолетостроении, средствах защиты от γ - и X-излучений и др.

Низкие сечения захвата тепловых нейтронов у циркония и алюминия, малая активация у ванадия, высокая коррозионная стойкость и жаропрочность у хромоникелевых сталей типа 18-10, а также ряд других соображений делают их особенно перспективными для конструкций ЯЭУ и ТЯР.

Одновременно с этим высокочистые поликристаллические металлы Al, Cu, Ni, Zr и V, а также их сплавы являются прекрасными объектами для корреляционных исследований степени радиационных повреждений при их

облучении тяжелыми ионами и быстрыми нейтронами, а также для решения фундаментальных вопросов радиационной физики твердого тела.

Облучение заряженными частицами проводили на созданном ускорительно-облучательном комплексе Лаборатории ядерных реакций им.Г.Н.Флерова ОИЯИ, включающем в себя ускорители тяжелых ионов, совокупность ионных пучков которых дает возможность получить практически весь диапазон ускоряемых частиц от легких (гелий) до тяжелых (ксенон).

Кроме того, во второй главе дано описание условий облучения образцов и созданных ионных каналов и установок для изучения радиационных эффектов в твердых телах, моделирования радиационной повреждаемости при нейтронном и ионном облучении, а также для исследования основ модификации структуры и свойств при имплантации тяжелых ионов с энергиями, превышающими 1 МэВ/а.е.м.

Применяемый диапазон энергий ионов (от 1 до 10 МэВ/а.е.м.) и их масс (от ${}^4\text{He}$ до ${}^{136}\text{Xe}$) дает возможность облучать материалы с толщинами до 100 мкм, позволяет варьировать скорость введения дефектов структуры и величину удельных ионизационных потерь энергии, что важно для изучения ионной имплантации и модифицирования свойств. В работе наиболее широко использовались созданные установки для облучения ионами высоких энергий: ${}^{22}\text{Ne}$ ($E=230$ МэВ), ${}^{40}\text{Ar}$ ($E=460$ МэВ) и ${}^{129}\text{Xe}$ ($E=124$ МэВ).

Облучение осуществлялось в трех режимах: в вакууме, в атмосфере инертного газа и на воздухе. Установка для облучения снабжена устройством для регулирования и поддержания температуры и возможностью облучения в температурном интервале от 77 до 1000 К и при контролируемом изменении плотности потока ионов от 10^6 до 10^{12} ион/(см²с).

Имитационные эксперименты при облучении на ускорителях заряженных частиц для изучения явлений, протекающих в материалах активной зоны ЯЭУ, привели к необходимости отработки методик облучения и последующего исследования фольг металлов с характерными толщинами от 22 до 100 мкм, обеспечивающих условия макроскопичности образцов (облучение "на прострел").

Исследование дефектообразования и других особенностей структурно-фазовых изменений осуществлялось с использованием сканирующей (СЭМ) и

просвечивающей (ПЭМ) электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа, электрон-позитронной аннигиляции, внутреннего трения, Мёссбауэровской спектроскопии и др. Обширную и весьма ценную информацию по повреждениям структуры удалось получить путем изучения эффектов упрочнения облученных образцов по данным измерения микротвердости, прочности и пластичности, в связи с чем эти методы интенсивно применялись.

Третья глава посвящена изложению результатов исследований радиационного повреждения чистых металлов при облучении тяжелыми ионами и быстрыми нейтронами.

Рассмотрены процессы радиационного упрочнения ряда металлов по результатам микротвердости и показано, что радиационное упрочнение алюминия, никеля, меди с ростом флюенса тяжелых ионов стремится к насыщению. Зависимость прироста микротвердости хорошо описывается выражениями типа:

$$\text{для Cu, Ni: } \Delta H = \Delta H_0(1 - \exp(-\alpha F))^{1/2} \text{ и}$$

$$\text{для Al: } \Delta H = \Delta H_0(1 - \exp(-\alpha F)),$$

где ΔH_0 - прирост микротвердости в точке насыщения эффекта радиационного упрочнения при флюенсе $F > 1/\alpha$, $\alpha = 5,4 \cdot 10^{-10}$, $5,9 \cdot 10^{-10}$ и $1,9 \cdot 10^{-13}$ для Cu, Ni и Al соответственно.

Исследование микроструктуры облученных образцов методом ПЭМ показало наличие дислокационных петель вакансионного и междоузельного типов и тетраэдров дефектов упаковки. Облучение ионами приводит к образованию кластеров точечных дефектов как основного вида повреждения структуры. Кластеры радиационного происхождения можно характеризовать, например, при облучении меди, характерным размером $d_1 < 5$ мкм, преобладающим в общей картине. Концентрация и распределение кластеров по размерам изменяются с ростом флюенса и упрочнения следующим образом: на начальном этапе прироста микротвердости при $F_1 = 10^{12}$ ион/см² соответствующая интегральная концентрация кластеров дефектов $\rho_1 = 1,9 \cdot 10^{16}$ см⁻³, в области максимального прироста при $F_2 = 2,2 \cdot 10^{13}$ ион/см² концентрация кластеров $\rho_2 = 5 \cdot 10^{16}$ см⁻³ и на участке насыщения при $F_3 = 6 \cdot 10^{13}$ ион/см² концентрация составляет $\rho_3 = 8,2 \cdot 10^{16}$ см⁻³ (рис.2).

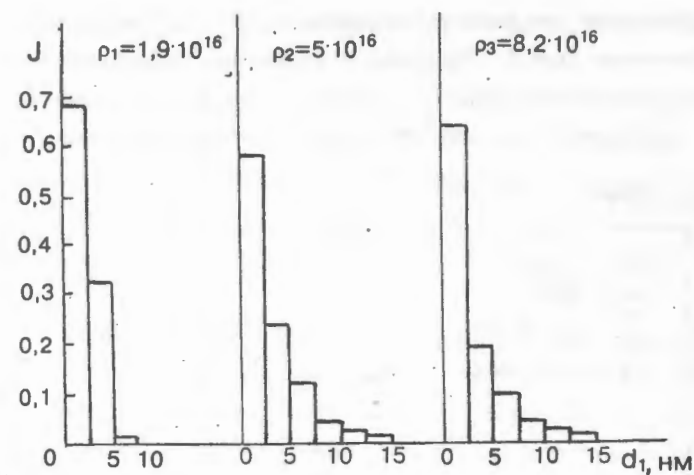


Рис.2. Зависимости относительных концентраций кластеров от их диаметра d_1 при флюенсах $Ft = 10^{12}$, $2,2 \cdot 10^{13}$ и $6 \cdot 10^{13}$ ион/см² для меди, облученной ионами ^{129}Xe с энергией $E = 124$ МэВ.

Анализ экспериментальных данных по концентрациям и размерам кластеров дефектов и степени упрочнения от флюенса показывает несомненную связь, что дало возможность в качестве механизма процесса принять барьерную модель упрочнения, в основе которой лежит упругое взаимодействие образовавшихся во время облучения скоплений точечных дефектов с дислокациями.

Сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей изменения микротвердости в рамках барьерной модели упрочнения от флюенса ионного облучения дало удовлетворительное согласие.

Для сравнения эффектов радиационного упрочнения при облучении ионами и нейтронами образцы одной серии облучались на ускорителях ионами ^{22}Ne с энергией 230 МэВ (поток 10^{11} ион/см²с), нейтронами с энергией более 0,1 МэВ в реакторах EWA (поток $1,39 \cdot 10^{13}$ нейтр./см²с) и ИБР-2 (поток $1,4 \cdot 10^{12}$ нейтр./см²с). Установлено, что одинаковый уровень радиационного упрочнения образцов из циркония при облучении нейтронами

и ионами наблюдается при уровнях повреждения, отличающихся более, чем на порядок величины (рис.3). Показано, что уровень насыщения эффекта радиационного упрочнения зависит от массы бомбардирующих частиц, что обусловлено различиями в энергетических спектрах первично-выбитых атомов (ПВА).

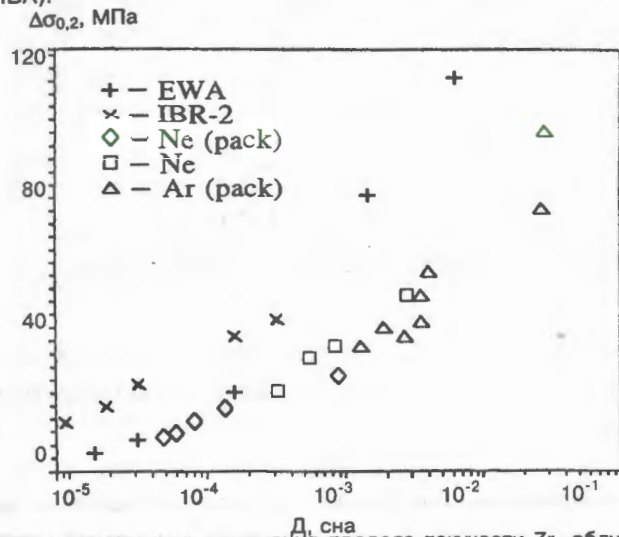


Рис.3. Дозовая зависимость изменения предела текучести Zr, облученного ионами Ne, Ar и нейтронами в реакторах EWA и ИБР-2. Ne(pack), Ar(pack) - образцы, облученные в сборке 5 и 4 фольг.

Заметим, что спектр ПВА при нейтронном повреждении более "жесткий", чем при облучении ионами, а спектр нейтронов реактора ИБР-2 более "жесткий", чем у реактора EWA. Таким образом, была установлена прямая связь возрастания вклада атомов отдачи с высокими энергиями в образование дефектов структуры и определяющая роль радиационных дефектов, созданных ПВА с высокими энергиями, в радиационном упрочнении металлов.

Заметим также, что в отличие от Ni, Cu, V, для циркония отсутствует область насыщения радиационного упрочнения.

Приведены результаты исследования пострадиационного поведения чистого ванадия и модельных сплавов, содержащих элементы с различными

энергиями связи с примесями внедрения Zr, Y, Nb, Ti, Al и Fe (расположены по мере уменьшения энергии связи).

Облучение образцов ванадия и его сплавов ионами ¹²⁹Xe (E=124 МэВ) со скоростью генерации дефектов G_f=10⁻⁷ сна/с, сравнимой по порядку величины с ТЯР, приводит к упрочнению образцов V-сплавов (РУ). Основным и качественно новым результатом данных исследований является обнаружение сильной зависимости РУ от состава и структурного состояния сплавов.

Для сопоставления радиационных эффектов упрочнения на пучках тяжелых ионов и нейтронов образцы ванадия и его сплавов были облучены в реакторе ИБР-2. Показано, что изменение микротвердости ванадия после облучения ионами и пострадиационного отжига качественно согласуется с аналогичной зависимостью для этого материала, облученного быстрыми нейтронами. Как и в случае нейтронного облучения, наблюдается радиационно-отжиговое упрочнение (РОУ), максимальное значение которого находится в области температур до 300^oC.

Изучена зависимость относительного изменения микротвердости от состава после отжига при 300^oC, в результате чего установлено, что максимальный эффект упрочнения наблюдается на сплавах, содержащих химически активные примеси Ti и Y.

Наряду с упрочнением в сплавах ванадия с Zr, Y и Mo наблюдается эффект радиационного разупрочнения. Снижение микротвердости после низкотемпературного отжига (180^oC) предварительно состаренных сплавов связывается с растворением зон Гинье-Престона, а наличие термического возврата является свидетельством того, что размер выделений меньше критического.

Таким образом, проведенные сравнительные исследования изменений свойств металлов и сплавов, облученных тяжелыми ионами и быстрыми нейтронами, позволяют заключить о возможности моделирования радиационной повреждаемости материалов от нейтронного воздействия пучками высокоэнергетических тяжелых ионов (E/A > 1 МэВ/а.е.м.).

Четвертая глава посвящена исследованию влияния облучения нейтронами и тяжелыми ионами на изменение структуры и прочности

хромоникелевых сталей, как одних из основных критериальных свойств, определяющих возможность применения конструкционных материалов в ядерной технике.

В этой главе представлены результаты по изучению радиационных эффектов и повреждения структуры стали 0X18H10T после облучения ионами ^{22}Ne ($E=230$ МэВ), ^{129}Xe ($E=124$ МэВ) и нейтронами ($E>0,1$ МэВ) до относительно низких доз повреждения 10^{-4} - 10^{-2} сна, что дало возможность исключить сложные реакции между комплексами дефектов. Было показано, что облучение ионами и нейтронами повышает предел текучести, в меньшей степени - предел прочности и понижает пластичность. Однако равный уровень упрочнения после нейтронного облучения достигается при меньшей дозе повреждения, чем в случае ионного облучения (рис.4).

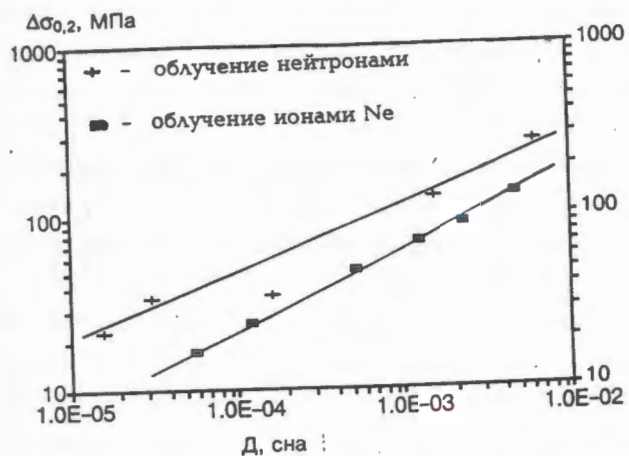


Рис.4. Зависимость изменения предела текучести стали 0X18H10T от дозы радиационных повреждений.

Показано, что прочность хорошо описывается выражением $\sigma = \sigma_0 + A\varepsilon^n$, где σ_0 - предел текучести, ε - деформация, n - показатель упрочнения. При этом получено хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных. Отметим, что в исследованной дозовой области показатель упрочнения "n" понижается с увеличением флюенса, что может быть объяснено "каналированием дислокаций", означающим, что лидирующие дислокации

"вымывают" точечные дефекты и их скопления в плоскости скольжения и облегчают движение следующим дислокациям.

Дозовая зависимость упрочнения при облучении хорошо описывается выражением типа $\Delta\sigma_{0,2} = A(1 - e^{-B\Phi t})^{1/2}$, где Φt - флюенс; A, B - физические параметры: $A=233,4$ МПа и $B=4,66 \cdot 10^{-17}$ ион/см² для ионов Ne; $A=306$ МПа и $B=6,39 \cdot 10^{-20}$ нейтр./см² для нейтронов.

Микроструктура образцов хромоникелевой стали, облученной ионами и нейтронами в интервале доз 10^{-4} - 10^{-2} сна, по данным ПЭМ, содержит небольшие, размером менее 4 нм, кластеры дефектов. Зависимость радиационного упрочнения от флюенса ионов для чистых металлов (кроме циркония) и сплавов с различным исходным состоянием имеет тенденцию к насыщению. Результаты по радиационному упрочнению стали 0X18H10T, как и чистых металлов Cu, Ni, V при облучении ионами ^{22}Ne , ^{40}Ar , ^{129}Xe однозначно указывают на то, что максимальный эффект упрочнения наблюдается при облучении наиболее тяжелыми ионами. Это подтверждает представления об определяющей роли в радиационном упрочнении металлов дефектов, образованных высокоэнергетическими атомами отдачи, которые образуются при прохождении потока тяжелых ионов через образец.

Учитывая термо-радиационную активацию процессов эволюции образующихся при облучении дефектов и их связь с физико-механическими свойствами, изучено влияние облучения ионами и нейтронами при различных температурах на эволюцию дислокационной структуры. Показано, что микроструктура хромоникелевых сталей, облученных при температурах 353-373 К, включает дислокационные петли. Причем в большинстве случаев межузельные атомы объединяются на плотноупакованных плоскостях {111} в дислокационные петли Франка с вектором Бюргерса типа $b = a/3 \langle 111 \rangle$. Остальная часть - это бездефектные петли с вектором Бюргерса $b = a/2$.

Таким образом, при относительно низких температурах облучения ($<0,3 T_{пл.}$), когда межузельные атомы подвижны, а вакансии малоподвижны, концентрация межузельных дислокационных петель быстро достигает насыщения с дозой. В зависимости от степени повреждения микроструктура стали представляет собой последовательно кластеры дефектов, дефектные петли Франка, трансформирующиеся в совершенные, а затем в сетку

дислокаций. Увеличение температуры облучения ускоряет процесс эволюции дефектов с образованием дислокационной сетки.

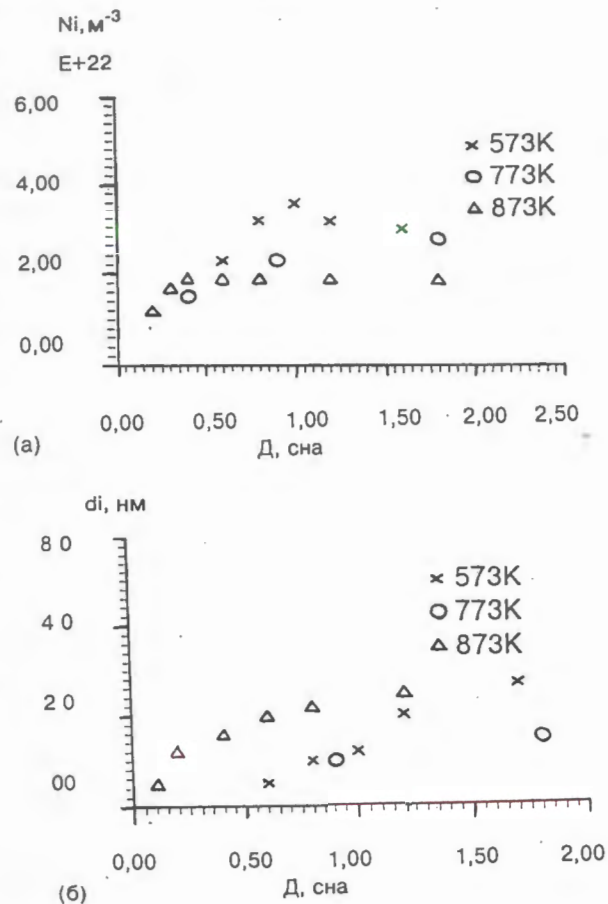


Рис.5. Зависимость концентрации дислокационных петель (а) и среднего размера дислокационных петель (б) в стали 00X17H14M2, облученной ионами Ag ($E=225$ МэВ) при разных температурах, от дозы.

В заключение заметим, что микроструктура стали типа 18-10, облученной тяжелыми ионами и нейтронами при температурах 473-923 К, содержит межузельные дислокационные петли, средний размер которых возрастает, а концентрация понижается с увеличением температуры

облучения (рис.5). Показано, что радиационное упрочнение хромоникелевой стали 0X18H10T является результатом упрочнения матрицы, а не границ зерен.

Переходя к корреляции повреждаемости материалов ионами и нейтронами, отметим, что при облучении ионами образуются дефекты типа кластеров. Однако при тех же самых дозах упрочнение при облучении нейтронами больше, чем при облучении ионами (см.рис.4). Микроструктура стали 0X18H10T, облученной ионами и нейтронами при температурах 353-373 К, содержит высокую концентрацию дислокационных петель межузельного типа примерно в одинаковой количестве (рис.6).

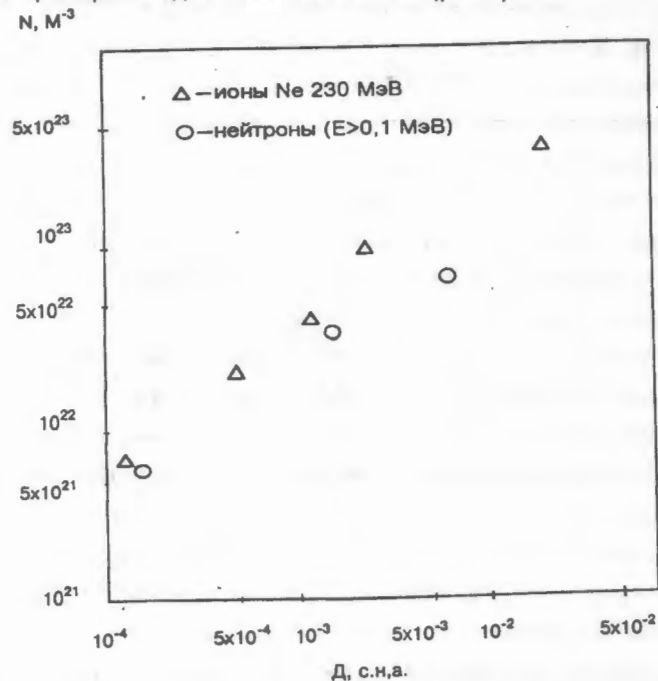


Рис.6. Зависимость концентрации кластеров дефектов в стали 0X18H10T от дозы после облучения ионами Ne ($E=230$ МэВ) и нейтронами ($E>0,1$ МэВ).

Полученные результаты исследований микроструктуры хромоникелевой стали 0X18H10T не дают пока полного объяснения различий в дозовых зависимостях радиационного упрочнения, полученных при облучении ионами ^{22}Ne и нейтронами ($E>0,1$ МэВ), в то же время зависимость упрочнения в

обоих случаях удовлетворительно описывается выражением $\Delta\sigma_{0,2}=A(1-e^{-B\Phi t})^{1/2}$ и дает хорошее согласие с экспериментом.

В пятой главе излагаются практические аспекты использования результатов исследований в отраслях атомной науки и техники.

Метод модификации урана путем легирования хромом и подробные исследования кинетики изотермического превращения сплава урана с 0,4 вес.%Cr нашли практическое применение для создания мелкозернистой структуры, обеспечивающей повышенную радиационную стойкость урана.

Создание однородных и равноосных зерен размером 30-50 мкм осуществляется путем нагрева в β -области с последующей изотермической закалкой при температурах 530-550⁰С. Подобная технология использована для производства стержней сплава U+0,4%Cr для активной зоны реактора "нулевой" мощности AGATA (г.Сверк, Республика Польша).

Исследования автора в области вакуумной металлургии урана были тесно связаны с практическим использованием в технологии производства тепловыделяющих и поглощающих элементов для исследовательских ядерных реакторов EWA и MARIA (г.Сверк, Республика Польша).

Вакуумная индукционная плавка и создание серии печей различной мощности позволили производить, кроме урана, ряд металлов высокой чистоты, в том числе гафния, тория и церия. Одним из главных аспектов практического использования индукционно-вакуумной плавки и литья урана было создание производства в техническом масштабе элементов защиты γ -источников из обедненного урана, а также петлевых установок, рентгеновских аппаратов, дефектоскопов и т.п. Разработанная автором технология плавки и изготовления защиты из обедненного урана была внедрена на опытном заводе Института ядерных исследований; некоторые элементы технологии стали предметом патентования.

Исследования по коррозии под напряжением циркония и его сплавов в контакте с осколками деления, например, йодом, нашли практическое использование в совместных работах с Институтом атомной энергии им.И.В.Курчатова при оценке работоспособности твэлов реакторов типа ВВЭР.

Результаты исследования подобию и различий при облучении твердых тел тяжелыми ионами и быстрыми нейтронами были использованы в программах по созданию и обоснованию выбора материалов для быстрых реакторов БР и для имитации эффектов повреждения материалов нейтронами с энергией 14 МэВ в программах по разработке термоядерных реакторов (ТЯР). Подобное моделирование повреждений ионами и нейтронами еще требует уточнения и развития, однако уже сейчас по результатам корреляции в изменении механических свойств даны практические рекомендации для алюминия и хромоникелевых сталей применительно к их использованию в элементах активной зоны ядерных реакторов EWA и MARIA (Республика Польша).

Для использования высокоэнергетических тяжелых ионов в имитационных исследованиях нужно было решить ряд проблем, связанных с методикой исследований. Из-за небольшого пробега тяжелых ионов толщина образца должна быть ограничена; поэтому для испытания механических свойств при растяжении использовались миниатюрные образцы стали размерами 15x3 мм и толщиной 50 мкм в специально сконструированном захвате и определены условия (величина зерна, толщина образца, градиент повреждений по толщине образца), при которых результаты испытаний механических свойств миниатюрных образцов будут соответствовать результатам, полученным на массивных образцах в инженерной практике. Этот метод испытания миниатюрных образцов использован в исследованиях ползучести образцов конструкционных элементов оборудования в конвенциональной энергетике.

Отработанные методологические приемы по облучению твердых тел тяжелыми ионами и исследованию их свойств эффективно используются для изучения таких физических явлений, как радиационное упрочнение и охрупчивание, радиационное распухание, распыление и блистеринг, радиационная ползучесть и разрушение и т.п.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведено систематическое исследование радиационных эффектов в модельных металлах: алюминии, цирконии, меди, никеле и ванадии, а также сплавах Zr+1 вес.%Nb и V с небольшими (1-2%) добавками Zr, Y, Nb, Ti и Fe после их облучения тяжелыми ионами (с E до 10 МэВ/а.е.м.) и быстрыми нейтронами ($E_n > 0,1$ МэВ).
 - 1.1. Сравнительные испытания механических свойств (прочность, пластичность, твердость) и микроструктуры позволили установить корреляцию между радиационно-стимулированным приростом предела текучести и микротвердости $\sigma_{0,2} = 3,27\alpha(P)H_u(P)(0,1)^n$, что дало возможность изучить радиационные эффекты упрочнения твердых тел.
 - 1.2. Радиационное упрочнение исследованных чистых металлов, монотонно увеличиваясь с флюенсом, стремится при больших дозах к насыщению. Степень упрочнения зависит от массы бомбардирующих частиц, что связывается с различиями в энергетических спектрах первично-выбитых атомов (ПВА). Установлено, что эффект упрочнения для меди обусловлен кластерами дефектов с размерами порядка 5 нм.
 - 1.3. Значения степени радиационного повреждения ванадия и его сплавов и их упрочнения (РУ) при облучении тяжелыми ионами и нейтронами показали качественное подобие. Пострадиационный отжиг сложным образом изменяет уровень радиационно-отжигового упрочнения (РОУ) и понижает пластичность металлов при сохранении различия в прочности, обусловленного исходной структурой. При низкотемпературном отпуске в сплавах ванадия с Zr, Y и Mo наблюдается эффект радиационного разупрочнения (РРУС), связанный с растворением когерентных зон Гинье-Престона по механизму термического возврата.
 - 1.4. Установлено, что в отличие от металлов (Ni, Cu, V) в цирконии в интервале исследованных флюенсов (до 10^{15} ион/см²) отсутствует область насыщения эффекта радиационного упрочнения.
 - 1.5. Развита феноменологическая модель, позволяющая описать совокупность экспериментов по зависимости РОУ от флюенса, температуры и легирующих добавок в ванадии.

2. Проведены корреляционные исследования изменения физико-механических свойств циркония и его сплавов, а также хромоникелевой стали аустенитного класса типа 0X18H10T, облученных тяжелыми ионами и быстрыми нейтронами.

2.1. Показано, что облучение циркония и стали 0X18H10T высокоэнергетическими ионами ($E \sim 10$ МэВ/а.е.м.) и быстрыми нейтронами ($E > 0,1$ МэВ) увеличивает предел текучести и, в меньшей степени, предел прочности и уменьшает относительное удлинение. Установлено также, что при одних и тех же дозах (в дозовом интервале 10^{-5} - 10^{-2} сна) упрочнение металлов при облучении нейтронами примерно на порядок величины выше, чем при облучении ионами, что связано с различиями в спектрах ПВА и скоростью образования радиационных дефектов.

2.2. Экспериментальные исследования типа дефектов, их размеров и концентрации показали, что на начальных стадиях механизм упрочнения описывается моделью барьерного упрочнения. Получено выражение дозовой зависимости упрочнения.

3. Изучены радиационные эффекты изменения структуры и свойств основных конструкционных материалов ЯЭУ и ТЯР: хромоникелевых сталей типа 0X18H10T и 00X17H14M2, облученных тяжелыми ионами и быстрыми нейтронами в широком диапазоне повреждающих доз и температур.

3.1. Показано, что облучение при температурах 353-373 К до относительно малых повреждающих доз 10^{-4} - 10^{-2} сна приводит к образованию в структуре сталей мелких (<4 нм) кластеров. Электронномикроскопическим методом установлена их природа. Показано, что данные кластеры представляют собой дислокационные петли межзельного типа. Средний размер петель возрастал, а концентрация понижалась с ростом температуры облучения. Повышение дозы повреждения до 1-2 сна приводит дополнительно к появлению больших дислокационных петель Франка.

3.2. Показано, что при облучении эволюция микроструктуры стали происходит следующим образом: кластеры дефектов, дефектные петли Франка, трансформирующиеся в совершенные дислокационные петли, а затем в сетку дислокаций. Увеличение температуры в интервале 473-923 К ускоряет процесс эволюции дефектов с образованием дислокационной сетки.

3.3. Показано, что прочностные зависимости сталей от деформации хорошо описываются выражением $\Delta\sigma = \sigma_0 + A\varepsilon^n$, что согласуется также с экспериментом. Показатель степени упрочнения "n" с увеличением флюенса понижается, что может быть объяснено каналированием дислокаций.

3.4. Установлено, что радиационное упрочнение хромоникелевой стали 0X18H10T является результатом упрочнения матрицы, а не границ зерен. Исследования методом ПЭМ не выявили разницы в картине микроструктуры стали 00X17H14M2 после облучения тяжелыми ионами и нейтронами в диапазоне температур 473-923 К.

4. Исследованы термо-механические эффекты полиморфных превращений и коррозионного разрушения основных компонентов тепловыделяющих элементов - урана (ядерное горючее) и циркониевых сплавов (конструкционный материал оболочки твэлов).

4.1. Изучена кинетика превращения $\beta \leftrightarrow \alpha$ сплава U-0,4%Cr, в результате чего показано, что в интервале температур 400-600°C оно описывается двумя различными S-образными кривыми (ранее изотермическое превращение $\beta \leftrightarrow \alpha$ описывалось одной S-образной кривой).

4.2. Установлено, что изотермическое $\beta \rightarrow \alpha$ превращение протекает по двум различным механизмам выше и ниже температуры 520°C. В верхней температурной области (>520°C) реакция превращения сопровождается процессами сдвигового $\beta \rightarrow \alpha$ превращения и выделения из твердого раствора мелкодисперсных частиц хрома.

4.3. Изучена коррозия образцов циркониевых сплавов (циркалой-2) под напряжением в среде паров йода. Показано, что разрушение материала происходит при достижении определенного порогового значения напряжения, величина которого при температуре 593 К составляет для холодно-деформированного циркалоя-2 более 260 МПа.

4.4. Установлено наличие минимальной степени деформации, ниже которой коррозионное разрушение не происходит, и критические значения составляют: для полностью отожженного циркония 2-3%, при неполном отжиге - 1% и без отжига - 0,7%.

5. Разработан и создан комплекс экспериментальных установок для облучения материалов и элементов конструкций в ядерных реакторах

(петлевые и ампульные каналы), на ускорителях (вакуумные каналы), разработаны экспериментальные устройства, позволяющие контролировать условия облучения, созданы системы по обработке данных при внутриреакторных и пострadiaционных исследованиях физико-механических и химических свойств твердых тел.

6. Большая часть научно-исследовательских результатов, полученных при выполнении диссертации, легла в основу технологических разработок и использована для практических целей в области атомной науки и техники.

6.1. Исследования кинетики и механизма изотермического $\beta \rightarrow \alpha$ -превращения U-Cr-сплавов позволили разработать процесс термообработки (изотермическая закалка из β -фазы), обеспечивающей создание мелкозернистой структуры урана (с размером зерен 30-50 мкм) с повышенной радиационной стойкостью. Технология внедрена в производстве стержней из сплава U-0,4%Cr для активной зоны реактора AGATA (г.Сверк, Республика Польша).

6.2. Разработана технология вакуумно-индукционной плавки урана и создана серия вакуумных печей, которые были внедрены в технологии производства тепловыделяющих и поглощающих элементов для реакторов EWA и MARIA (г.Сверк, Республика Польша).

6.3. Создано производство элементов защиты γ -источников из обедненного урана, а также петлевых установок рентгеновских аппаратов, дефектоскопов и т.п. на опытном заводе Института ядерных исследований (г.Сверк, Республика Польша).

6.4. Результаты по разрушающей коррозии циркониевых сплавов в контакте с осколками деления, например, йодом, нашли практическое применение в совместных работах с Институтом атомной энергии им.Курчатова при оценке работоспособности твэлов для реакторов типа ВВЭР.

6.5. Результаты исследования подобию и различия при облучении конструкционных материалов тяжелыми ионами и быстрыми нейтронами могут быть использованы в программах по обоснованию выбора материалов для быстрых реакторов и имитации эффектов повреждения материалов нейтронами с энергией 14 МэВ в программах по разработке термоядерных реакторов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:

1. Hofman A. Some Properties of U-Mo 1% wt. Alloy after Thermal Treatment. Raport IBJ, E-XIV/645/PS, Nuclear Energy Information Center, Warsaw, Poland, 1965, p.1-14.
2. Hofman A. Metallographic and X-ray Investigations of the Isothermal Transformation $\alpha \leftrightarrow \beta$ in U-Cr 0,4% wt. Alloy. Raport IBJ 873/XIV/PS. Nuclear Energy Information Center, Warsaw, Poland, 1967, p.1-18.
3. Hofman A. Dilatometric Investigations of the Transformation $\beta \leftrightarrow \alpha$ in U-0,4% wt. Cr Alloy. Raport IBJ, 874/XIV/PS, Nuclear Energy Information, Warsaw, Poland, 1967, p.1-19.
4. Hofman A. Production and Properties of Sintered Uranium. Raport IBJ, INR Nr 666/XIV/PS. Nuclear Energy Information Center, Warsaw, Poland, 1965, p.1-14.
5. Hofman A., Bukat A., Chyczewski M., Horubala Z., Rutkowski W. The Influence of the UO₂ Dispersion upon the Recrystallization Temperature in Sintered Uranium after a -40% Deformation. III International Powder Metallurgy Conference, Karlove Vary, CSRS, 1970, p.295-297.
6. Castaldelli L., Hofman A. Determinazione della Resistenza alla Corrosione della Lega Zr-2 in Diversi Ambienti. RTI/LTM(71), 18, CSN Casaccia, 1971, p.1-12.
7. Castaldelli L., Hofman A. Comperamento di Leghe di Zirconio in Soluzione Aquea di Ioduro di Potassio e di 1% Iodio in Matenolo. RTI/LTM(72), 9, CSN Casaccia, 1972, p.1-10.
8. Hofman A., Szleke W., Trocki J., Hinz L. Welding of Zircaloy-2 Applied in Nuclear Reactors Constructions. Raport IBJ, INR 1980/XIV/8. Warsaw, 1980, p.1-8.
9. Hofman A., Kochanski T., Malczyk A. Zastosowanie zminiaturyzowanych próbek na rozciąganie dla określenia własności mechanicznych napromienionej stali austenitycznej, Raport IAE-2152/VI/Otwock-Świerk 1993, str.1-13.
10. Хофман А. Влияние размеров образца на механические свойства облученной аустенитной стали 0X18H10T. Сообщение ОИЯИ P14-95-320, Дубна, ОИЯИ, 1995, 10 с.
11. Хофман А. Влияние масштабного фактора на механические свойства облученной хромоникелевой стали. Известия РАН. Металлы, N5, 1997, с.94-96.

12. Хофман А. Определение механических характеристик облученных металлов по данным испытаний на микротвердость. Физика и химия обработки материалов, N1, 1997, с.7-10.
13. Hofman A., Kochański T., Malczyk A. Zastosowanie pomiarów miktrotwardości dla określenia umocnienia radiacyjnego stali austenitycznej napromienionej neutronami. Raport IEA-4/A-18, Otwock-Świerk 1994, str.1-9.
14. Хофман А. Применение испытаний на микротвердость для определения радиационного упрочнения аустенитной стали 0X18H10T. Сообщения ОИЯИ P14-95-477, Дубна, ОИЯИ, 1995, 8 с.
15. Hofman A., Didyk A.Yu., Kochański T., Skuratov V.A., Malczyk A. Wpływ niejednorodności rozkładu uszkodzeń radiacyjnych występujących na grubości próbki po napromienieniu ciężkimi jonami na granicę plastyczności cyrkonu. Raport IEA-11/A. Otwock-Świerk 1995, str.1-9.
16. Хофман А. Воздействие тяжелых высокоэнергетических газовых ионов на механические свойства циркония. Известия РАН. Металлы, N5, 1996, с.117-121.
17. Хофман А. Моделирование влияния осколков деления на материал оболочки тепловыделяющих элементов ВВЭР. Сообщения ОИЯИ, P14-95-319, Дубна, ОИЯИ, 8 с.
18. Didyk A.Yu., Hofman A., Kochański T., Skuratov V.A., Abu Alzam S.M. Radiation Hardening of Zirconium Irradiated by Neutrons and 11,5 MeV/a.m.u. Heavy Ions. Nucleonika 40, No.4, 1995, p.81-86.
19. Дидык А.Ю., Малиновский В., Назаров В.М., Сашин И.Л., Скуратов В.А., Хаванчак К., Хофман А., Щеголев В.А., Юн Дюн Ман. Радиационное упрочнение циркония, облученного тяжелыми ионами и нейтронами. Краткие сообщения ОИЯИ, N5 (31)-88, Дубна, ОИЯИ, 1988, с.36-40.
20. Гомозов Л.И., Вотинов С.Н., Дидык А.Ю., Малиновский В., Скуратов В.А., Хофман А., Шестаков В.Д., Щеголев В.А. Влияние облучения на поведение ванадия при послерадиационном отжиге.- В сб. Материалы рабочего совещания по ядерным фильтрам и радиационному материаловедению. ОИЯИ, Дубна, P18-86-110, 1986, с.119-123.
21. Гомозов Л.И., Вотинов С.Н., Дидык А.Ю., Малиновский В., Назаров В.Н., Скуратов В.А., Сашин И.Л., Хофман А., Шестаков В.Д., Щеголев В.А.

Влияние облучения тяжелыми ионами и нейтронами на поведение ванадия при послерадиационном отжиге.- Препринт ОИЯИ Р14-86-409. Дубна, ОИЯИ, 1986, 7 с.

22. Hofman A., Kochański T., Chrzanowski J., Schegolev V.A. Radiacyjne umocnienie stali austenicznej 0H18N10T napromienionej ciężkimi jonami i neutronami. Raport IEA-2137/VI, Otwock-Świerk 1992, str.1-16.
23. Hofman A., Kochanski T., Krasnowski M., Schegolev V.A. The Influence of Heavy Ion Irradiation on the Mechanical Properties and Microstructure of Austenitic Stainless Steel. Nukleonika vol.39, No.3, 1994, p.35-42.
24. Хофман А. Влияние величины зерна и холодной деформации на радиационное упрочнение хромоникелевой стали 0X18N10T. Сообщения ОИЯИ, Р14-96-32, ОИЯИ, Дубна, 1996, 8 с.
25. Hofman A., Kochański T., Malczyk A. Wpływ wielkości ziarna na radiacyjne umocnienie stali austenicznej 0H18N10T. Raport IEA-21/A, Otwock-Świerk 1996, str.1-7.
26. Hofman A., Kochański T., Krasnowski M. Ewolucja mikrostruktury stali austenicznej 0H18N10T i 00H17N14M2 w wyniku napromienienia wysokoenergetycznymi jonami. Raport IEA-2143/VI. Otwock-Swierk 1993, str.1-18.
27. Гаевский М., Хофман А., Малиновский В., Щеголев В.А. Электронно-микроскопические исследования радиационных повреждений в аустенитной стали 12X18N9T, облученной энергетическими ионами аргона и неона. Сообщения ОИЯИ, Р14-88-887, ОИЯИ, Дубна 1988, 8 с.
28. Бондаренко Г.Г., Дидык А.Ю., Хофман А., Коханьски Т., Красновский М., Щеголев В.А. Радиационное упрочнение и эволюция микроструктуры аустенитной стали под действием различных видов излучений.// Материалы 6-го Международного совещания "Радиационная физика твердого тела" (Севастополь, 1-6 июля 1996 г.). М., МГИЭМ, с.13-14.
29. Хофман А., Бондаренко Г.Г., Дидык А.Ю. Дислокационная микроструктура аустенитной нержавеющей стали, облученной высокоэнергетическими ионами и нейтронами ($E_n > 0,1$ МэВ)// Материалы VII Международного совещания "Радиационная физика твердого тела" (Севастополь, 30 июня-5 июля 1997 г.). М., МГИЭМ, с.125-127.

30. Хофман А., Дидык А.Ю., Коханьски Т., Щеголев В.А. Изменение механических свойств и микроструктуры аустенитной нержавеющей стали 0X18N10T, облученной высокоэнергетическими ионами и нейтронами ($E_n > 0,1$ МэВ). Сообщения ОИЯИ Р14-96-274, ОИЯИ, Дубна, 1996, 15 с.
31. Хофман А. Изменение механических свойств облученной нейтронами ($E_n > 0,1$ МэВ) хромоникелевой стали 0X18N10T в отожженном и холоднодеформированном состоянии. Физика и химия обработки материалов, N3, 1997, с.14-17.
32. Бондаренко Г.Г., Хофман А., Дидык А.Ю. Изменение механических свойств и структуры Zr при облучении высокоэнергетическими ионами Ag и Ne// Материалы 6-го Международного совещания "Радиационная физика твердого тела" (Севастополь, 1-6 июля 1996 г.). М., МГИЭМ, с.11-12.
33. Хофман А. Дислокационная микроструктура аустенитной нержавеющей стали 00X17N14M2, облученной высокоэнергетическими ионами и нейтронами ($E_n > 0,1$ МэВ). Сообщения ОИЯИ, Р14-97-100, ОИЯИ, Дубна 1997, 14 с.
34. Хофман А., Бондаренко Г.Г., Дидык А.Ю. Эволюция микроструктуры аустенитной нержавеющей стали, облученной нейтронами и высокоэнергетическими тяжелыми ионами.// Перспективные материалы, 1998, N3, с.57-61.
35. Бондаренко Г.Г., Дидык А.Ю., Хофман А., Коханьски Т., Щеголев В.А. Радиационное упрочнение и эволюция микроструктуры аустенитной хромоникелевой стали под действием различных видов излучений.// Известия РАН. Металлы, 1997, N3, с.83-88.
36. Бондаренко Г.Г., Хофман А., Дидык А.Ю. Структурные изменения в аустенитной стали при облучении высокоэнергетическими частицами.// Материалы V научно-технической конференции "Вакуумная наука и техника". М., МГИЭМ, 1998, с.53-54.
37. Хофман А., Бондаренко Г.Г. Влияние размерного фактора на механические характеристики облученной нержавеющей стали// Материалы III научно-технической конференции "Вакуумная наука и техника". М., МГИЭМ, 1996, с.68-69.

38. Celinski Z., Hofman A., Strupczewski A., Szulc L., Zyszkowski W. Sondy reaktorowe i laboratorium gorace budowane w IBJ dla potrzeb badan materialowych. Postepy Techniki Jadrowej 23, Warszawa 1979, str.771-784.
39. Hofman A., Malinowski W., Kochanski T., Didyk A.Yu., Skuratov V.A., Shchegolev V.A. Badania i symulacja uszkodzen radiacyjnych w metalach i stopach napromienionych wiązka wysokoenergetycznych ciezkich jonow. Postepy Techniki Jadrowej, vol.39Z.1, ISSN 0551-6846, Warszawa 1996, str.17-23.
40. Didyk A.Yu., Hofman A. Uszkodzenia radiacyjne w cialach stalych i modyfikacja materialow po napromienieniu ciezкими jonami z energiami powyzej 1 MeV/nukleon. Postepy Techniki Jadrowej, vol.39Z.1, ISSN 0551-6846, Warszawa 1996, str.13-16.
41. Szpunar E., Hofman A. Symulacja uszkodzen radiacyjnych. Przegląd Mechaniczny 9, 89, Warszawa 1989, str.28-33.
42. Szpunar E., Hofman A. Uszkodzenia radiacyjne metali. Przegląd Mechaniczny 6, 89, Warszawa 1989, str.10-12.
43. Hofman A. Doswiadczenia z topienia i odlewania uranu i jego stopow. Jugoslawiansko-polskie sympozjum technologii i metallurgii uranu, wrzesien 1963, Raport IBJ Nr 14/63, str.1-16.
44. Bukat A., Hofman A., Wieczorkowski M. Technologia produkcji elementow paliwowych dla reaktorow energetycznych Mozliwosci perspektywy. Postepy Techniki Jadrowej, 24, 1980, str.1079-1092.
45. Hofman A., Laskowski M., Derko H., Czajkowski W., Olewiński T. Sposób zabezpieczenia elementow metalowych zwłaszcza przed działaniem chemicznym ciekłego uranu. Patent nr 85 180, 26 08 1997 r. Świadectwo autorskie nr.86225.

Рукопись поступила в издательский отдел
19 апреля 1999 года.