Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"

Епифанов Никита Андреевич

**Исследование влияния мощного пучково-плазменного воздействия на структуру и структурно-фазовое состояние сплавов на основе алюминия, меди, железа**

РЕЗЮМЕ ДИССЕРТАЦИИ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

заслуженный деятель науки РФ,

доктор физико-математических наук

профессор Бондаренко Геннадий Германович

Москва 2023

**Актуальность**

Область «Радиационная физика твердого тела», или РФТТ, на сегодняшний день является одной из наиболее перспективных и активно развивающихся в физической науке. РФТТ образовалась на границе других фундаментальных областей: физики конденсированного состояния, ядерной физики и физики высоких энергий. Ценность РФТТ с каждым годом растет, в первую очередь, в связи с ее широким спектром приложений в ядерной энергетике, космических исследованиях, электронике, наноэлектронике и других областях. Полученные экспериментальные и теоретические результаты в РФТТ открывают новые пути для исследований, позволяя решать задачи теории конденсированного состояния и фазовых переходов.

В радиационной физике твердого тела исследуются такие процессы, как взаимодействие излучения с атомами и молекулами твердого материала, образование радиационных дефектов, изменение электронной структуры и свойств материалов под воздействием излучения. Это включает изучение радиационных повреждений, радиационного влияния на электрические, магнитные, оптические и механические свойства материалов, а также исследование механизмов регенерации и восстановления структуры после воздействия излучения.

В РФТТ широко используются методы экспериментального анализа, такие как спектроскопия, микроскопия, дифракция и электронная спиновая резонансная спектроскопия, а также теоретические моделирование и компьютерное моделирование. Эти методы позволяют исследователям расширить наше понимание механизмов радиационных процессов в твердых материалах, разработать новые материалы с улучшенными радиационными свойствами и разработать методы защиты от радиационных повреждений.

РФТТ имеет широкий спектр применений, включая ядерную энергетику, радиационную медицину, электронику, космическую технологию и радиационную безопасность. Понимание взаимодействия излучения с твердыми материалами является ключевым фактором для эффективного использования радиационных технологий и разработки новых материалов, обладающих высокой радиационной стойкостью и надежностью.

В технической области множество инженерных разработок требуют применения материалов с определенными свойствами. Особенно важными являются свойства материалов при создании сложных конструкций, которые должны работать в экстремальных условиях. Примером таких конструкций являются устройства термоядерного синтеза и ядерные реакторы. Для обеспечения работоспособности этих конструкций используются различные материалы с разным составом, структурой и методами производства. Однако, при эксплуатации в условиях высоких потоков облучения и больших доз, материалы подвергаются радиационному повреждению. Это приводит к существенным изменениям в их структуре. В свою очередь, эти изменения оказывают значительное влияние на структуру, структурно-фазовое состояние и физико-механические свойства материалов. Такие изменения могут включать изменение микроструктуры, образование дефектов, изменение связей между атомами и другие процессы. Понимание этих изменений и изучение их влияния на свойства материалов является важной задачей в научно-исследовательской работе. Это позволяет разработать более устойчивые материалы или применять дополнительные методы для защиты материалов от радиационных повреждений. В результате таких исследований может быть достигнут прогресс в области разработки материалов для технических устройств, работающих в экстремальных условиях. Это может способствовать усовершенствованию и повышению эффективности термоядерного синтеза и других технических процессов. В условиях исследований в области термоядерного синтеза возникают новые требования к материалам, применяемым в конструкциях и имеющим функциональное назначение. Они должны обладать высокой стойкостью в экстремальных условиях, включая возможность выдерживать облучение нейтронами с энергией до 14 МэВ и потоками термоядерной плазмы. В таких условиях происходят различные специфические физические и химические процессы, включая радиационное распухание, радиационное охрупчивание, радиационно-стимулированную диффузию и радиационно-индуцированную сегрегацию компонентов в сплавах. Кроме того, наблюдаются радиационно-индуцированные структурно-фазовые превращения и радиационный блистеринг. В связи с этим актуальными являются исследования и разработки новых материалов, обеспечивающих эффективную работу в условиях термоядерного синтеза. Принципиальной отличительной особенностью термоядерного реактора (ТЯР) по сравнению с ядерными реакторами деления является наличие вакуумной камеры, что предъявляет дополнительные требования к свойствам материалов для ТЯР, особенно первой стенки рабочей камеры, обращенной к термоядерной плазме. Среди факторов, определяющих долговечность первой стенки всех типов ТЯР, важную роль играет ее радиационное разрушение вследствие ионного распыления, испарения и выброса вещества униполярными дугами, причем особенно опасными с точки зрения радиационной эрозии являются срывы плазмы в реакторах с магнитным удержанием, импульсное воздействие на стенку разлетающейся плазмы в реакторах лазерного синтеза с инерционным удержанием. Разрушение поверхности приводит к двум наиболее отрицательным последствиям. Во-первых, эрозионный износ в зависимости от конструкции первой стенки вызывает или изменение прочности конструкции рабочей камеры ТЯР, или чрезмерный износ экранов, замена которых – достаточно сложная операция. Во-вторых, в реакторах с магнитным удержанием в результате эрозионного износа первой стенки происходит загрязнение плазмы тяжелыми примесями и, следовательно, ухудшение условий удержания плазмы, снижение эффективности реактора.

Современный этап исследования и разработки материалов ТЯР имеет важную особенность. Отсутствие действующего термоядерного реактора или экспериментальной рабочей установки, полностью имитирующих реакторные условия эксплуатации материалов, стимулировали интенсивные исследования отдельных факторов мощного пучково-плазменного воздействия на материалы с использованием, в основном, ускорителей заряженных частиц (ионов различных химических элементов), что придает исследованиям имитационный характер. Это обстоятельство, как и наличие различных проектов будущих ТЯР, основанных на двух концепциях удержания плазмы (магнитной и инерционной), определяет разработку материалов, устойчивых к экстремальным воздействиям, и обусловливает актуальность темы настоящего исследования. В настоящее время накоплен обширный материал по имитационному воздействию ускоренных ионов на кандидатные материалы первой стенки ТЯР, эти исследования продолжаются более 40 лет. Однако имитационные исследования, проводимые при облучении на ионных ускорителях, охватывают лишь малый спектр влияния различных факторов ТЯР (отсутствие таких, например, факторов, как ударные волны, «убегающие» электроны, срывы плазмы и др.) на структуру и свойства кандидатных материалов. Имитационные условия, в большей степени приближенные к натурным, создаются при облучении материалов на плазменных установках, в частности установках типа «Плазменный фокус». Влияние мощных пучково-плазменных потоков, генерируемых в такого рода установках, на структуру и структурно-фазовое состояние ряда материалов явилось предметом изучения в настоящей работе.

**Степень разработанности темы исследования**

Последние 20 лет в научном мире активно развивается направление, связанное с использованием импульсного воздействия при помощи концентрированных потоков энергии на различные материалы. Целью такого воздействия является изменение структуры и структурно-фазового состояния этих материалов, а так же их поверхностных и объемных свойств. Такого рода исследования нашли большой отклик в области термоядерного синтеза; недавние разработки прокладывают четкий путь для предстоящих физико-технических исследований, которые по-прежнему необходимы для успешного строительства и эксплуатации современных термоядерных установок и перспективных демонстрационных ТЯР. Заметен прогресс на этапе строительства крупных установок ядерного синтеза ИТЭР (Франция), LMJ (Франция), NIF (США) и Искра (РФ), которые относятся к установкам управляемого термоядерного синтеза инерциального и магнитного вида удержания плазмы.

Одним из ключевых вопросов, которые еще предстоит решить в стремлении к производству термоядерной энергии, является определение характеристик, тестирование и разработка подходящих усовершенствованных материалов для плазменной облицовки, способных выдерживать экстремальные радиационные и тепловые нагрузки, ожидаемые в термоядерных реакторах. Фундаментальное понимание процессов взаимодействия плазмы/пучков со стенками в обычных термоядерных устройствах требует целенаправленной научно-исследовательской деятельности в плазменных симуляторах, используемых в тесной связи со средствами определения характеристик материалов, а также с достижениями теории и моделирования.

Установки "Плазменный фокус" (ПФ) являются важным элементом в области термоядерной энергетики. Эти установки представляют собой устройства, разработанные для создания и контроля плазменного состояния, необходимого для реализации термоядерных реакций. Основная идея "Плазменного фокуса" заключается в использовании магнитного поля для сжатия и нагрева плазмы до крайне высоких температур, достаточных для запуска ядерных реакций слияния.

Установки ПФ также применяются для исследования структурно-фазовых состояний металлов. Плазменная обработка может способствовать изменению структуры материалов, созданию новых фаз или структурных дефектов, что позволяет получить новые свойства или улучшить существующие. Исследования на этих установках позволяют лучше понять механизмы структурных превращений в металлах и оптимизировать процессы обработки для получения материалов с определенными свойствами. Одним из ключевых аспектов исследования в установках ПФ является изучение воздействия высокой энергии плазмы на различные материалы, включая металлы. Установки ПФ способны создать интенсивные потоки энергии и частиц, что позволяет смоделировать условия, близкие к тем, которые возникают при ядерных взрывах или в плазменных реакторах. Это помогает исследователям понять влияние радиации и высоких температур на структуру материалов, их механические свойства и поведение в экстремальных условиях. Они также представляют собой объекты исследования, где проводятся эксперименты и тесты для дальнейшего совершенствования методов управления плазменными процессами и повышения эффективности термоядерной энергетики. Результаты исследований, проводимых на таких установках, могут привести к разработке новых методов генерации и удержания плазмы, а также к оптимизации конструкции реакторов для более эффективной генерации энергии.

В связи с вышесказанным, установки ПФ являются подходящим и эффективным инструментом для проверки разнородных материалов-кандидатов, считающихся перспективными для элементов термоядерных камер, подвергающихся мощному излучению (первая стенка, диверторы и т.д.). Эти устройства используются для облучения образцов мощными импульсами излучений двух типов – потоками горячей плазмы (скорости v = (2-3)×105 м/с) и пучками быстрых ионов (энергия Ei ~ 100 кэВ) – с плотностью потока мощности до P ~ 1016 Вт/м2, а также с длительностью импульса в диапазоне 10-100 нс для имитации условий, ожидаемых в камерах ТЯР с инерциальным удержанием плазмы, а также с магнитным удержанием плазмы во время аварийных ситуаций (ЭЛМ-эффекты, вертикальные плазменные пробои и др.). Кроме того, для облучения аналогичных образцов из тех же материалов использовался лазер на неодимовом стекле, работающий в режиме модулированной добротности (примерно с такой же плотностью потока мощности, что и поток быстрых ионов в ПФ - P ~ 1016 Вт/м2). Необходимо отметить, что воздействие ионных потоков не приводит к формированию ударных волн существенного давления на фронте в облучаемом материале.

Данное направление исследования, которое посвящено анализу поведения материалов при сильных воздействиях ультракоротких импульсов, генерируемых в установках ПФ, представляет собой относительно новую область исследований, которая еще не получила широкого распространения. Большинство существующих исследований сосредоточено на оценке повреждаемости материалов и их устойчивости к интенсивным импульсным энергетическим воздействиям в условиях, имитирующих экстремальные обстоятельства, в испытательных камерах ТЯР. В литературе существуют работы таких авторов, как В.А. Грибков и др., В. Н. Пименов и др., В.Я. Никулин и др., R.S. Rawat, Zhang T. и коллеги, Väli B. и соавторы, Javadi S. и др. Преимущественно эти исследования были проведены на тугоплавких металлах (W, Mo, V, Ti) и сплавах на их основе, а также на сталях различных классов.

В настоящей же диссертационной работе рассматриваются особенности повреждаемости и модификации структурно-фазового состояния и свойств поверхностных слоев легкоплавких металлов – алюминия и его сплавов, металлов высокой проводимости – меди и её сплавов, а также малоактивируемых сталей ферритно-мартенситного класса, которые представляют интерес для термоядерной энергетики. Исследования проводились с использованием установок ПФ, которые имеют специфические характеристики, связанные с особенностями физических процессов, происходящих в них, и геометрией распространения потоков высокотемпературной плазмы и быстрых высокоэнергетических ионов во время экспериментов. Одним из отличительных признаков данной работы является использование одной из крупнейших в мире установок плазменного фокуса PF-1000 с рекордными параметрами, расположенной в Варшавском Институте физики плазмы и лазерного микросинтеза.

**Цель и задачи исследования**

Целью исследования является выявление особенностей влияния воздействия мощных импульсных потоков ионов, плазмы и ударных волн, генерируемых в установках типа «Плазменный фокус», на структуру поверхностных слоев и структурно-фазовое состояние сплавов алюминия, меди, железа.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи:**

1. выявление особенностей изменения структуры и структурно-фазового состояния сплавов системы Al-Li-Mg при мощном пучково-плазменном воздействии в установках «PF-1000» и «PF-6»;
2. определение эффективности керамического защитного покрытия из оксида алюминия на алюминиевой подложке (композиции Al2O3/Al) при пучково-плазменном воздействии;
3. изучение особенностей изменения механических свойств меди и ее сплавов с галлием и никелем под воздействием потоков дейтериевого излучения в установках PF-1000 и PF-6, а также совместное воздействие дейтериевых ионов и плазмы на эти материалы;
4. исследование влияния импульсного пучково-плазменного облучения на структуры, структурно-фазовое состояние и состав поверхностных слоёв сталей ферритно-мартенситного типа Eurofer-97 и стали 10Х9ВФА.

**Объектом исследования** являются образцы сплавов на основе Fe, Al, и Cu до и после облучения высокоэнергетическими импульсами ионов, потоками плазмы, а также лазерного излучения.

**Предметом исследования** являются структурно-фазовые изменения, модификация и повреждаемость поверхностного слоя вышеуказанных материалов.

**Методология и методы диссертационного исследования**

Методология диссертационной работы основывается на результатах фундаментальных и прикладных исследований в области радиационного материаловедения**.**

Для решения поставленных задач в работе были использованы экспериментальные методы исследований. Экспериментальные данные получены методами лабораторного моделирования факторов термоядерного реактора (облучения на имитационных стендах – плазменных установках PF-1000, PF-6, «Вихрь»), облучения на лазерной установке на неодимовом стекле ГОС-1001, оптической микроскопии, растровой электронной микроскопии, рентгеновского микроанализа, рентгеновской дифрактометрии, атомно-эмиссионной спектроскопии, определения кинетической микротвердости и модуля упругости.

**Научная новизна работы**

1. Выявлены особенности структурных и структурно-фазовых изменений, происходящих в поверхностных слоях сплавов Al-(2.0-2.2)%Li-(5.0-5.2)%Mg при пучково-плазменном воздействии в установке «PF-1000»;
2. получены новые научные данные о структурной стабильности защитного покрытия оксида алюминия, нанесенного на алюминиевую подложку, при пучково-плазменном воздействии с плотностью мощности излучения *q* ~ 108 – 109 Вт/см2 в наносекундном диапазоне длительности импульса;
3. впервые получены результаты расчетов, выполненных методом численного моделирования, распределения температуры и амплитуды ударной волны в поверхностных слоях исследованных материалов, облученных мощными импульсными пучково-плазменными потоками;
4. выявлены особенности изменения структуры и механических свойств меди и медных сплавов с легирующими добавками галлия и никеля Cu-10%Ga, Cu-4%Ni и Cu-4%Ni-10%Ga после облучения в установке PF-1000 в двух режимах: «мягком» – потоками дейтериевой плазмы при *q* = 107 Вт/см2 и τ = 100 нс и «жестком» – совместно потоками ионов дейтерия при *q* = 109 – 1011 Вт/см2и τ =50 нс и плотной дейтериевой плазмы при *q* =108 – 109 Вт/см2 и τ =100 нс;
5. впервые была получена совокупность экспериментальных данных, исследующих влияние импульсного пучково-плазменного облучения на структуру поверхности, структурно-фазовые изменения и элементный состав поверхностных слоев малоактивируемых сталей ферритно-мартенситного класса, таких как Eurofer 97 (европейская сталь) и 10Х9ВФА российского производства. Исследование проводилось при различных уровнях мощности потока плазмы (qpl) в диапазоне от 107 до 1010 Вт/см2 и мощности ионов (qi) в диапазоне от 109 до 1012 Вт/см2;
6. определены сравнительные особенности изменений структурно-фазового состояния сталей Eurofer 97 и 10Х9ВФА при облучении мощными пучково-плазменными потоками; установлено, что облучение Eurofer 97 сталью при уровне энергии плотности излучения (qpl) равном 107 - 108 Вт/см2 приводит к появлению значительного количества аустенита в ее структуре. В то же время, при аналогичном облучении стали 10Х9ВФА количество остаточного аустенита примерно в 20 раз меньше, чем в Eurofer 97, что является важным фактором при оценке степени радиационного распухания данных сталей; структурно-фазовая устойчивость при облучении стали 10Х9ВФА обеспечивается проведением дополнительной предрадиационной термообработки.

**Теоретическая значимость работы**

Результаты выполненных в работе исследований существенно расширили базу данных о закономерностях влияния мощных импульсных потоков дейтериевой плазмы и ионов дейтерия, а также формирующейся в процессе воздействия плотной плазмы ударной волны на повреждаемость, структуру и фазовый элементный состав поверхностных слоев сплавов на основе алюминия, меди и железа; разработана модель, позволяющая проводить оценку амплитуд ударных волн, образующихся в материале при пучково-плазменном и лазерном воздействиях; получена аналитическая формула для расчета амплитуд ударных волн в экспериментах по радиационному материаловедению, проводимых с использованием устройств типа «Плазменный фокус»; методом численного моделирования получены распределения температуры и амплитуды ударной волны в поверхностных слоях исследованных материалов, облученных мощными импульсными пучково-плазменными потоками.

**Практическая значимость работы**

Полученные данной работе результаты позволят дополнить и расширить базу экспериментальных данных, необходимых для анализа процессов изменений структурно-фазового состояния и структуры исследованных сплавов при мощном пучково-плазменных облучении, в особенности, в условиях, имитирующих воздействие на материалы потоков излучений в рабочей камере ТЯР. Помимо этого, они могут быть использованы при прогнозировании радиационной устойчивости и деградации поведения исследованных материалов в подобных экстремальных условиях.

**Основные положения в диссертации, выносимые на защиту:**

- Результаты влияния импульсных потоков ионов дейтерия и дейтериевой плазмы на структуру и структурно-фазовое состояние сплавов на основе алюминия;

- новые экспериментальные данные, позволяющие оценить структурную стабильность защитного покрытия оксида алюминия, нанесенного на алюминиевую подложку, при пучково-плазменных и лазерных воздействиях;

- расчетная оценка амплитуд ударных волн, возникающих в материалах при воздействии мощных потоков дейтериевой плазмы, полученная методом численного моделирования;

- результаты, касающиеся влияния импульсных потоков ионов дейтерия и дейтериевой плазмы на структуру и пластичность меди, а также сплавов, основанных на меди. Рассмотрены следующие составы сплавов: Cu – 10%Ga, Cu – 4%Ni и Cu - 10%Ga - 4%Ni;

- результаты исследования влияния мощных импульсных потоков дейтериевой плазмы и ионов дейтерия на структуру, структурно – фазовое состояние и перераспределение элементов в малоактивируемых сталях ферритно-мартенситного типа Eurofer 97 и 10Х9ВФА.

**Личный вклад автора**

Автор принималнепосредственное участие в получении экспериментальных данных, экспериментах по облучению образцов на плазменной установке «Вихрь», им лично проводилась подготовка образцов для проведения исследований и выполнены структурные исследования методами оптической микроскопии и растровой электронной микроскопии; проведен (в соавторстве) анализ всех полученных в работе результатов, лично сформулированы выводы по диссертационной работе.

В рамках исследования автором на установке PF-1000 были проведены численные расчеты, направленные на определение амплитуды ударной волны, возникающей при воздействии пучком плазмы на алюминий и вольфрам. Эти расчеты позволили построить зависимости давления ударной волны от расстояния при ее проникновении внутрь облучаемых материалов. Также было использовано численное моделирование для определения распределения температуры в поверхностных слоях композиции Al2O3/Al при воздействии пучком плазмы и лазером в режимах модулированной добротности и свободной генерации. Результаты расчетов позволили получить распределение амплитуды давления ударной волны в материале в зависимости от его глубины при пучковом плазменном и лазерном облучении в режиме модулированной добротности. Эти исследования имеют важное значение для понимания воздействия пучков плазмы и лазерного излучения на материалы, а также для разработки методов контроля и оптимизации этих процессов. Полученные результаты могут быть использованы в различных областях, включая разработку новых материалов с улучшенными свойствами и создание более эффективных методов обработки поверхностей. Автор лично участвовал в подготовке публикаций и выступлениях на международных и российских конференциях по теме диссертации.

Облучение образцов исследуемых материалов на установках PF-1000 и PF-6 выполнялось в Варшавском институте физики плазмы и лазерного микросинтеза под руководством д-ра М. Падуха, являющегося вместе с д-ром М. Шольцем соавтором совместных статей, опубликованных по результатам проведенных экспериментов по облучению.

**Достоверность результатов,** представленных в данной диссертации, обеспечивается высокой степенью воспроизводимости, а также использованием современного экспериментального оборудования в сочетании с дополнительными независимыми методами исследования. В частности, были применены растровая электронная микроскопия, рентгеновская дифрактометрия, атомная эмиссионная спектроскопия, а также различные методы радиационной физики твердого тела, физики плазмы, лазерной физики, математического анализа и уравнений математической физики, а также численные методы. Применяемые численные модели были проверены на высокую прецизионность и корректность через верификацию с экспериментальными данными, а также сравнением с результатами других исследований, занимающихся схожими вопросами.

**Апробация работы**

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. 10th International Conference “New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation”, Zakopane, Poland, June 27 – 30, 2017, доклад « Damage of Aluminum Samples with Ceramic Coating Based on Al2O3 Oxide Under Pulsed Energy Streams»
2. International Conference on Nuclear and Radiation Physics and Materials book of abstracts, June 17-20, 2019 A. Alikhanyan National Science Laboratory, Yerevan, Armenia, доклад «The changes in the structure and elemental composition of aluminum-based alloys under the influence of accelerated gas ions and streams of hydrogen and deuterium plasma»
3. XVI Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов "Физико-химия и технология неорганических материалов", 1 - 4 октября 2019 г., Москва, Россия, доклад «Воздействие ударных волн мощных потоков плазмы и импульсного лазерного излучения на твердотельные образцы»
4. Physical and Numerical Simulation of Materials Processing (ICPNS 2019), Москва, Россия, 10-14 октября, доклад «Action of shocks generated in solid targets by dense plasma focus devices and at pulsed laser irradiation»
5. XXX Международная конференция «Радиационная физика твердого тела», Севастополь, 24-29 августа 2020 г., доклад «Изменения в поверхностных слоях медных сплавов под действием импульсной пучково-плазменной обработки»
6. XVII Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов "Физико-химия и технология неорганических материалов", 10 - 13 ноября 2020 г., Москва, Россия, доклад «Особенности разрушающего воздействия импульсного лазерного излучения и мощных потоков ионов и плазмы на металлы»
7. 18-я Международная школа-конференция для молодых ученых и специалистов «Новые материалы: неравновесные состояния», Москва, Россия, 14 – 17 декабря 2020 г., доклад «Поведение медных сплавов при воздействии мощных импульсных потоков ионов дейтерия и дейтериевой плазмы»
8. EVT2103194 – Второе координационное совещание по путям получения энергии посредством инерциального синтеза: исследование материалов и разработка технологий», Вена, Австрия, 13-15 июня 2022 г., доклад «Структурно-фазовые изменения в кандидатных материалах для установок термоядерного синтеза с инерциальным удержанием плазмы при интенсивном импульсном облучении потоками быстрых ионов и высокотемпературной плазмы» (по контракту МАГАТЭ с ИМЕТ РАН № 24080 от 27.08.2020г.).

Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы.

В первой главе изложен обзор и критический анализ литературных данных по проблеме влияния мощных пучково-плазменных потоков, генерируемых в установках типа «Плазменный фокус», на структуру и свойства металлических сплавов. В частности, описывается устройство установок такого типа, характеристики, а также особенности генерации пучково-плазменных потоков внутри камеры ПФ; рассматривается имитация плазменного воздействия на материалы первой стенки и дивертора ТЯР. В заключительной части первой главы анализируются современные статьи и работы по влиянию импульсных потоков плазмы, ускоренных ионов и лазерного облучения на структуру и свойства металлических сплавов.

Во второй главе экспериментальная методика исследований и оборудование. Описываются установки «Плазменный фокус», используемые в работе (PF-1000, ПФ-6, ПФ «Вихрь»), их отличительные особенности и параметры. Также во второй главе изложены основные характеристики лазерной установки ГОС-1001 и структурные методы исследования материалов, используемые в данной работе (оптическая и растровая электронная микроскопия с локальным рентгеноспектральным анализом, рентгеноструктурный дифракционный анализ, атомная эмиссионная спектроскопия).

Третья глава посвящена исследованию воздействия ударных волн, генерируемых при облучении материалов в установке «Плазменный фокус», а также при импульсном лазерном облучении. Проведено численное моделирование формирования ударной волны в облученных материалах; предложена простая аналитическая формула для расчета амплитуд ударных волн в экспериментах по радиационному материаловедению, проводимых с использованием установок ПФ и лазером ГОС-1001.

В четвертой главе диссертационной работы исследовалась повреждаемость поверхностного слоя алюминиевого сплава 1420, который принадлежит системе Al-Mg-Li. Провелась серия экспериментов с воздействием на сплав мощными импульсными потоками дейтериевой плазмы и ионов дейтерия в установке ПФ. Результаты показали, что при таком облучении в сплаве происходят термические и радиационно-стимулированные процессы, которые приводят к перераспределению элементов в поверхностном слое сплава. Далее исследовалась повреждаемость защитного керамического покрытия из алюминиевого оксида (Al2O3, ɣ-корунд), нанесенного методом анодирования на поверхность образца, состоящего из чистого алюминия. Мы облучаем образец высокоэнергетическими потоками энергии различной природы и изучаем состояние покрытия после облучения. В результате экспериментов мы определяем пороговые значения плотности мощности импульсного лазерного излучения, при которых происходит разрушение и частичное отслаивание алюминиевого покрытия.

В пятой главе описаны результаты экспериментов, проведенных в установке ПФ, на образцах чистой меди и сплавов Cu–10%Ga, Cu-10%Ga-4%Ni и Cu–4%Ni (масс. %), облученных импульсными потоками дейтериевой плазмы и ионами дейтерия. Исследованы повреждаемость и деформационные эффекты в поверхностных слоях материалов после облучения каждого из них в двух режимах экспериментов. В сплаве Cu-10%Ga после облучения наблюдается незначительное (до 14%) снижение модуля Юнга E. При легировании же этого сплава никелем – элементом с более высоким, чем у меди, значением E (в сплаве Cu-10%Ga-4%Ni), модуль Е исходного поверхностного слоя практически не меняется после облучения материала в ПФ.

В шестой главе было проведено исследование влияния импульсных потоков плазмы и ускоренных ионов на структуру и структурно-фазовое состояние ферритно-мартенситных сталей Eurofer 97 и 10Х9ВФА. Обнаружено, что данный процесс вызывает значительное количество аустенита в структуре стали Eurofer 97. В отличие от этого, при аналогичном облучении стали 10Х9ВФА количество остаточного аустенита составляет примерно 20 раз меньше, что является важным фактором в контексте радиационного распухания сталей.

В заключении диссертации изложены итоги выполненного исследования по каждой из глав и рекомендации по теме диссертационной работы.

**Публикации**

Основные положения по теме диссертации изложены в статьях [1-7], проиндексированных в Scopus, при этом журнал [1] находится в квартиле Q2, а журналы [2-7] - в Q3.

1. Epifanov N.A., Bondarenko G.G., Gribkov V.A., Latyshev S.V., Nikitushkina O.N., Pimenov V.N. Action of Shocks Generated in Solid Targets by Dense Plasma Focus Devices and at Pulsed Laser Irradiation / Procedia anufacturing, 2019, Vol.37, pp. 500-507. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.12.080, Q2
2. Gribkov, V.A., Demin, A.S., Epifanov, N.A., Kazilin, E.E., Latyshev, S.V., Maslyaev, S.A., Morozov, E.V., Sasinovskaya, I.P., Sirotinkin, V.P., Minkov, K.N., Paduch, M. Damageability of the Al2O3 Oxide Coating on the Aluminum Substrate by Pulsed Beam Plasma and Laser Radiation // Inorganic Materials: Applied Research Vol. 10, Issue 2, 1 March 2019, pp 339-346. DOI: 10.1134/S2075113319020151, Q3
3. Pimenov V. N., Bondarenko G.G., Dyomina E. V., Maslyaev S. A., Gribkov V. A., Sasinovskaya I. P., Epifanov N.A., Sirotinkin V. P., Sprygin G. S., Gaydar A. I., Paduch M. Influence of Pulsed Beams of Deuterium Ions and Deuterium Plasma on the Aluminum Alloy of Al–Mg–Li System // Inorganic Materials: Applied Research. 2019. Vol. 10. No. 3. P. 503-511. DOI: 10.1134/S207511331903033X, Q3
4. Borovitskaya I. V., Pimenov V. N., Gribkov V. A., Epifanov N., Maslyaev S. A., Mikhailova A. B., Bondarenko G.G., Gaidar A. I., Demina E. V., Prusakova M. D. Effect of a Pulsed Plasma Beam on the Structure and the Phase Composition of the Surface Layers in Ferritic–Martensitic Steels // Russian Metallurgy (Metally), 2020. No. 3. P. 238-249. DOI: 10.1134/S0036029520030027, Q3
5. Borovitskaya I. V., Gribkov V. A., Demin A. S., Epifanov N.A., Latyshev S. V., Maslyaev S. A., Morozov Y. V., Pimenov V. N., Sasinovskaya I. P., Bondarenko G.G., Gaidar A. I., Scholz M. Damage and Deformation Effects in the Surface Layers of Copper and Copper-Gallium Alloy under Pulsed Irradiation in a Plasma Focus Unit // Inorganic Materials: Applied Research. 2020. Vol. 11. No. 5. pp. 1093-1102. DOI: 10.1134/S2075113320050056, Q3
6. Pimenov V. N., Borovitskaya I. V., Gribkov V. A., Demin A. S., Епифанов Н. А., Maslyaev S. A., Morozov E. V., Sasinovskaya I. P., Bondarenko G.G., Gaydar A. I., Paduch M. Influence of Pulsed Flows of Deuterium Ions and Deuterium Plasma on Cu–Ni and Cu–Ni–Ga Alloys // Journal of Surface Investigation, 2022. Vol. 16. No. 1. P. 33-41. DOI: 10.1134/S1027451022010153, Q3
7. Borovitskaya, I.V., Pimenov, V.N., Maslyaev, S.A., Mikhailova, A.B., Bondarenko, G.G., Matveev, E.V., Gaidar, A.I., Padukh, M., Demin, A.S., Epifanov, N.A., Morozov, E.V. Effect of High-Temperature Pulsed Deuterium Plasma on the Structure and Mechanical Properties of the Surface of Cu–Ga and Cu–Ga–Ni Alloys. Russian Metallurgy (Metally), 2022, pp. 48-56. DOI: 10.1134/S0036029522010050, Q3