

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD) по образовательной программе 8D05302 – «Техническая физика»

Миниязова Армана Жанарбековича

Влияние теплового и плазменного воздействий на структурное состояние и свойства карбидного приповерхностного слоя вольфрама

Общая характеристика работы

Диссертационная работа посвящена исследованию изменений структурного состояния и свойств карбидного приповерхностного слоя вольфрама в результате воздействия тепловой нагрузки и гелиевой плазмой. В диссертации разработан способ высокотемпературного испытания вольфрама с карбидным слоем и установлены основные закономерности влияния высокой тепловой нагрузки и облучения гелиевой плазмой на плазменно-пучковой установке на структурное состояние и свойства приповерхностного карбидного слоя вольфрама.

Актуальность темы исследования

Как известно, в настоящее время в области развития термоядерных технологий активно изучается возможность применения вольфрама и его сплавов в качестве конструкционных материалов первой стенки и дивертора для разрабатываемых установок термоядерного синтеза. Изучение взаимодействия плазмы с поверхностью, и, самое главное, прогнозирование поведения конструкционных материалов в условиях реальной эксплуатации термоядерной установки осложняется формированием комплексных процессов в области взаимодействия плазмы с облицовкой защиты первой стенки и дивертора. Продукты этих процессов, включая эрозию, накапливаются в диверторной области термоядерной установки.

При эксплуатации термоядерных установок с графитовой облицовкой первой стенки (JT-60, Токамак КТМ) имеет место проблема эрозии углеродсодержащих материалов с последующим осаждением эродированных частиц углерода на поверхности других конструкционных материалов. В плазме эродированные частицы будут подвергаться ионизации под воздействием высокоэнергетических электронов и затем вместе с изотопами водорода взаимодействуют с плазмообращенной поверхностью конструкционного вольфрама. Результатом воздействия плазмы на материалы являются их распыление и испарение, изменение структуры и фазового состояния, а также формирование новых химических соединений на поверхности материала. При этом, в зависимости от параметров воздействия плазмы, может произойти образование приповерхностного карбидного слоя вольфрама. Эти факторы могут оказать значительное влияние на характер взаимодействия материалов, обращенных к плазме, с изотопами водорода в пограничной области.

В этой связи, перед специалистами стоит задача – изучить процессы образования приповерхностных карбидных соединений вольфрама и установить закономерности их влияния на структурное состояние и эксплуатационные характеристики материала в результате плазменного облучения. При создании термоядерного реактора на основе токамака выбор конструкционных

материалов, которые способны выдерживать как постоянное, так и интенсивное мощное импульсное воздействие плазмы, является ключевой задачей. Поэтому, на наш взгляд, экспериментальные и теоретические исследования, связанные с изучением изменений структуры поверхности материалов, используемых для первых стенок и диверторных пластин в термоядерных установках, под воздействием плазменных потоков, имеют большое значение. Однако, экспериментальная сложность и многоаспектность взаимодействия плазмы термоядерного реактора с кандидатными материалами, а также высокие затраты на полномасштабные натурные испытания, обуславливают необходимость проведения экспериментальных исследований с помощью специализированных малых имитационных установок.

Цель настоящей работы: установить основные особенности изменений структурного состояния и свойств приповерхностного карбидного слоя вольфрама в результате высокотемпературного теплового и плазменного воздействий на плазменно-пучковой установке (ППУ).

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

1) разработать расчетную модель температурного поля в вольфраме с приповерхностным карбидным слоем при высокотемпературном плазменном облучении;

2) разработать способ высокой тепловой нагрузки на вольфрам с карбидным слоем методом электронно-лучевого нагрева на ППУ;

3) установить закономерности влияния высокой тепловой нагрузки на структурное состояние и свойства приповерхностного карбидного слоя вольфрама;

4) исследовать изменения структурного состояния и свойств приповерхностного карбидного слоя вольфрама в результате высокотемпературного облучения гелиевой плазмой.

Основные положения, выносимые на защиту

1) Приповерхностный карбидный слой оказывает значительное влияние на характер распределения температурного поля в вольфраме при облучении плазмой. Установлено, что при тепловой нагрузке 10 МВт/м^2 и 20 МВт/м^2 плазменного облучения температура на плазмообращенной поверхности вольфрама с карбидным слоем составляет $905 \text{ }^\circ\text{C}$ и $1750 \text{ }^\circ\text{C}$ соответственно, тогда как температура поверхности вольфрама без карбидного слоя составляет $1115 \text{ }^\circ\text{C}$ и $2189 \text{ }^\circ\text{C}$ при соответствующих плазменных нагрузках.

2) Способ высокотемпературного воздействия на вольфрам с приповерхностным карбидным слоем методом электронно-лучевого нагрева на плазменно-пучковой установке в условиях высокого вакуума и газовой среды.

Способ основан на мощном электронно-лучевом воздействии плазменно-пучковой установки в вакуумной и газовой (гелий) среде с выдержкой в течение 3-х часов и контролируемым ($1 \text{ }^\circ\text{C/с}$) охлаждением. Способ обеспечивает высокотемпературный нагрев в диапазоне температур от $20 \text{ }^\circ\text{C}$ до $2500 \text{ }^\circ\text{C}$, со скоростью от $10 \text{ }^\circ\text{C/с}$ до $500 \text{ }^\circ\text{C/с}$. Разработанный способ позволил достичь

расчетные температуры и параметры высокотемпературного нагрева вольфрама с приповерхностным карбидным слоем.

3) Особенности изменения структурного состояния приповерхностного карбидного слоя вольфрама в результате высокой тепловой нагрузки.

Установлено, что при 905 °С ($q=10$ МВт/м²) приповерхностный карбидный слой вольфрама характеризуется высокой термической стабильностью структуры и препятствует эрозии поверхности. Тепловая нагрузка при 1750 °С ($q=20$ МВт/м²) приводит к разрушению карбидного слоя WC, образованию трещин и деградации структуры поверхности материала.

4) Влияние высокотемпературного облучения гелиевой плазмой на структурное состояние и свойства приповерхностного карбидного слоя вольфрама.

Установлено, что при облучении гелиевой плазмой карбидные слои отрицательно влияют на свойства поверхности вольфрама, ускоряя образование коралловой структуры и гелиевых пузырьков при 905 °С. Определено, что приповерхностный карбидный слой WC имеет более слабое сопротивление к гелиевому повреждению, чем карбидный слой на основе W₂C. Гелиевое облучение при температуре 1750 °С приводит к более обширному повреждению поверхности материала с образованием оплавленных выступов.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней впервые:

– разработан и апробирован способ высокотемпературного испытания вольфрама методом электронно-лучевого воздействия на ППУ в вакуумной и газовой среде (Патент на изобретение № 35911 от 21.10.22 г. Бюллетень №42);

– установлены особенности изменения структурно-фазового состояния и свойств приповерхностного карбидного слоя вольфрама в результате высокого теплового воздействия и высокотемпературного облучения гелиевой плазмой.

Объект исследования: вольфрам с приповерхностным карбидным слоем в условиях высокоомощного теплового и плазменного воздействий.

Предмет исследования: влияние теплового и плазменного воздействий на структурное состояние и свойства вольфрама с приповерхностным карбидным слоем.

Методы исследования

Для расчета температурного поля модели моноблока дивертора термоядерного реактора и моделирования тепловой нагрузки при плазменном облучении использовался программный комплекс ANSYS. Эксперименты по тепловому воздействию и плазменному облучению выполнены на ППУ. В экспериментах применены методы оптической спектрометрии и масс-спектрометрии, контактные и бесконтактные методы контроля температуры, метод зондовой диагностики для определения вольтамперных характеристик плазмы. Для анализа накопления газов в образце использовали метод термодесорбции. Исследования структурного состояния и фазового состава образцов проводили с использованием методов металлографического и микроструктурного анализа, включая оптическую, сканирующую и просвечивающую электронную микроскопии, а также рентгеноструктурный анализ. Определение площади поверхности образцов производилось с

использованием стереоскопического микроскопа в программной среде Altami Studio. Количественную и качественную оценку микроструктуры образцов проводили с применением программного обеспечения AXALIT. Определение элементного состава проводилось методом рентгеноспектрального микроанализа. Физико-механические свойства образцов изучали методом измерения микротвердости по Виккерсу на автоматическом твердомере Q10A+, массы на аналитических весах Mettler Toledo MS205DU и шероховатости поверхности образцов с помощью профилометра Mitutoyo SurfTest SJ-410.

Практическая значимость работы

1) Разработанный способ высокотемпературного нагрева и методика исследования взаимодействия плазмы с приповерхностным карбидным слоем вольфрама апробированы в ходе проведения настоящих исследований и внедрены в процедуру подготовки и проведения экспериментов по испытанию конструкционных материалов на плазменно-пучковой установке в рамках научно-технической деятельности филиала «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК (Акт о разработке методики №12-230-02/1579вн от 24.08.2022 г. Акт о внедрении №12-230-02/1584вн от 02.10.2023г.).

2) Полученные данные в рамках диссертационной работы используются в реализации задач Программы научных исследований на Казахстанском материаловедческом токамаке КТМ на 2021-23 годы от 12.03.2021 г.

3) Результаты исследований о влиянии карбидного слоя на свойства вольфрама при воздействии высокой тепловой нагрузки и плазменного облучения могут быть рекомендованы практикам материаловедов в области разработки и испытания элементов термоядерного реактора, и анализе рабочих ресурсов.

4) Получен акт о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс кафедры Технической физики и теплоэнергетики Некоммерческого акционерного общества «Университет имени Шакарима города Семей».

Личный вклад автора

Автор непосредственно принимал участие в выполнении экспериментальных исследований и выборе методов исследования, в постановке цели и задач диссертационной работы, анализировал результаты патентного поиска и литературного обзора. Анализ результатов, полученных в ходе проведения диссертационного исследования, а также формулировка основных выводов и заключения выполнены совместно с научными консультантами.

Все экспериментальные работы проводились в тесном сотрудничестве с ведущими учеными и специалистами филиала «Институт атомной энергии» Республиканского государственного предприятия «Национальный ядерный центр Республики Казахстан» (ИАЭ РГП НЯЦ РК).

Связь работы с научно-исследовательскими программами

Диссертационная работа выполнена в рамках Республиканской бюджетной программы 036 «Развитие атомных и энергетических проектов» подпрограмма 105 «Прикладные научные исследования технологического характера в сфере атомной энергетики» мероприятие «научно-техническое обеспечение

экспериментальных исследований на Казахстанском материаловедческом токамаке КТМ» Министерства энергетики Республики Казахстан, где автор участвовал в качестве основного исполнителя и руководителя:

– по теме 01.01. «Экспериментальные исследования влияния покрытий на свойства материалов, обращенных к плазме, на имитационном стенде с плазменно-пучковой установкой» раздела 01. Отработка методик проведения исследований на КТМ и средств контроля физических параметров высокотемпературной плазмы КТМ в процессе ее взаимодействия с материалами в 2018–20 г.г. (Госрегистрация №0115РК02433);

– по теме 02.01. «Исследование взаимодействия плазмы с карбидизированной поверхностью вольфрама» раздела 02. «Разработка и экспериментальное обоснование инновационных технологий для создания термоядерного реактора» в 2021–2023 г.г. (Госрегистрация №0115РК02433).

Степень достоверности и обоснованности полученных результатов обеспечивается корректностью и системностью проведенных расчетно-экспериментальных исследований. Основные результаты получены с помощью прямых, хорошо апробированных экспериментальных методов исследования. Полученные результаты опубликованы в статьях изданий, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, а также в статьях в рецензируемых зарубежных научных журналах, включенных в базы данных Scopus и Web of Science, в сборниках трудов международных научных конференций ближнего и дальнего зарубежья. Получен патент на изобретение, опубликованный в бюллетене РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности».

Апробация диссертационной работы

Материалы диссертационной работы широко апробированы и представлены на следующих научных мероприятиях:

1) 14-я Международная конференция "Gas Discharge Plasmas and Their Applications", г. Томск, РФ, 15 – 21 сентября 2019 г.

2) 24-я Международная конференция «Взаимодействие ионов с поверхностью» (ISI-2019), г. Москва, РФ, 19 – 23 августа 2019 г.

3) II Международный научный форум «Ядерная наука и технологии», ИЯФ, г. Алматы, 24 – 27 июнь 2019 г.

4) VII Международный конгресс «Energy Fluxes and Radiation Effects» (EFRE 2020), Tomsk, Russia, 14 – 25 сентября 2021 г.

5) 15-я Международная конференция “Gas Discharge Plasmas and Their Applications”, г. Томск, РФ, 5 – 10 сентября 2021 г.

6) Международная онлайн конференция “Advanced manufacturing materials and research: new technologies and techniques AMM&R2021”, г. Усть-Каменогорск, 19 февраля 2021 г.

7) IX Международная конференция “Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала”. г. Курчатов, 7 – 9 сентября 2021 г.

8) Семинар-конкурс постерных докладов «Shakarim Poster Event». НАО «Университет имени Шакарима города Семей», г. Семей, 13 апреля 2022 г.

9) Международная научно-практическая конференция «Увалиевские чтения – 2022. Актуальные проблемы науки и образования в условиях современных вызовов». г. Усть-Каменогорск, 23 – 24 сентября 2022 г.

10) Международный научно-технический семинар «30 лет научно-технического сотрудничества в области мирного использования атомной энергии». г. Курчатов, 17 – 20 мая 2022 г.

11) 10-я Международная конференция «Nanomaterials and Advanced energy storage systems» г. Астана, 4 – 6 августа, 2022 г.

12) 32-й Симпозиум по термоядерным технологиям «Symposium on Fusion Technology» (SOFT 2022). г. Дубровник, Хорватия. 18 – 23 сентября 2022 г.

13) XV Международная конференция «Физика твердого тела». г. Астана, 8 – 10 декабря, 2022 г.

14) Third Annual Meeting of Kazakh Physical Society. г. Курчатов, 7 – 11 июня 2023 г.

15) XXVI Международная конференция «Взаимодействие ионов с поверхностью-ISI2023». г. Ярославль, РФ. 21 – 25 августа 2023 г.

16) Международная конференция «Семипалатинский испытательный полигон». г. Курчатов. 12 – 14 сентября 2023 г.

17) 29-я Международная конференция «International Fusion Energy Conference», г. Лондон, Великобритания, 16 – 20 октября 2023 г.

Также результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика» НАО «Университет имени Шакарима г. Семей», на заседаниях Научно-технического совета РГП НЯЦ РК и филиала «Институт атомной энергии», а также на семинарах PhD-докторантов.

Публикации

Всего по результатам изложенных в диссертации исследований опубликованы 20 печатных работ, в том числе в рецензируемом научном издании РК, рекомендованном КОКНВО МНВО РК – 1, в журналах, индексируемых в Scopus и Web of Science – 4, патент на изобретение РГП НИИС – 1 и в сборниках трудов международных конференций – 12, и в других изданиях 2.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников. Изложена на 108 страницах, содержит 46 рисунков, 11 таблиц и список использованных источников из 197 наименований.