



**МАТЕРИАЛЫ
XXVIII МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Москва, НИЯУ МИФИ, 30-31 января 2025 г.

Сборник научных трудов

**Москва
2025**

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»

МАТЕРИАЛЫ
XXVIII МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Москва, НИЯУ МИФИ, 30-31 января 2025 г.

Сборник научных трудов

Москва
2025

ББК 22.333
УДК 533.9 (06)
В 40

Материалы XXVIII Международной конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью». Москва, 30-31 января 2025 г.: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2025. – 100 с.

Сборник содержит материалы докладов, представленных на ежегодно проводимую в НИЯУ МИФИ XXVIII Международную конференцию по взаимодействию плазмы с поверхностью. Тематика конференции охватывает экспериментальные и теоретические исследования взаимодействия плазмы с поверхностью в установках управляемого термоядерного синтеза.

Материалы сборника могут быть полезны научным работникам, аспирантам и студентам в научно-исследовательской, учебно-методической и практической работе.

Аннотации докладов, входящих в сборник, опубликованы в авторской редакции при минимальной редакционной правке.

Материалы получены до 20 января 2025 г.

Редакционная коллегия:

Ю.М. Гаспарян

Д.Н. Синельников

М.В. Гришаев (ответственный редактор)

© Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
2025

ISBN 978-5-7262-3134-1

Программа 28-й конференции
«ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ»

Заседание №1

Четверг, 30 января

начало в 10.00

Председатели – Ю.М. Гаспарян

НЛК аудитория 2.2

9.45 – 10.00	Открытие
10.00 – 10.25	Ю.М. Гаспарян <i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</i> Обзор работ по взаимодействию плазмы с поверхностью в НИЯУ МИФИ
10.25 – 10.50	П.Ю. Пискарев¹, А.А. Герваш¹, Д.А. Глазунов¹, Е.В. Окунева¹, С.В. Бобров¹, Р.В. Рулев¹, В.В. Рузанов¹, И.В. Мазуль¹, В.А. Васильев¹, Д.В. Лянзберг¹, А.В.Лапин¹, А.Б. Путрик² <i>¹АО «НИИЭФА»</i> <i>²Частное учреждение «Проектный центр ИТЭР»</i> Внутрикамерные компоненты ИТЭР: состояние и статус работ в НИИЭФА
10.50 – 11.15	В.П. Будаев^{1,2}, Ю.В. Мартыненко¹ <i>¹НИЦ «Курчатовский институт»</i> <i>²Национальный исследовательский университет «МЭИ»</i> Испытания материалов и систем термоядерного реактора в современных плазменных установках
11.15 – 11.40	Кофе-брейк
11.40 – 12.00	С.Д. Федорович¹, В.П. Будаев^{1,2}, Д.И. Кавыршин¹, Л.Н. Химченко³, В. К. Чан¹, М.В. Лукашевский¹ <i>¹Национальный исследовательский университет «МЭИ»</i> <i>²НИЦ «Курчатовский институт»</i> <i>³Частное учреждение “Проектный центр ИТЭР”</i> Испытание защитного покрытия карбида бора на вольфраме в стационарной гелиевой плазме установки ПЛМ-М

12.00 – 12.20	<p>Л.Н. Химченко¹, В.П. Будаев^{2,3} ¹Частное учреждение “Проектный центр ИТЭР” ²НИЦ «Курчатовский институт» ³Национальный исследовательский университет «МЭИ» Образование фрактального вещества в термоядерных установках</p>
12.20 – 12.40	<p>И.И. Архипов^{1,2}, Р.Х. Залавутдинов², С.А. Грашин¹, Н.Ю. Свечников¹, Р.Г. Чумаков¹, А.В. Лукашевич³ ¹НИЦ «Курчатовский Институт», Москва ²ИФХЭ им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва ³Национальный исследовательский университет «МЭИ» Изучение морфологии, состава и электронной структуры углеродных пленок из токамака Т-15МД</p>
12.40 – 13.00	<p>С.А. Крат, Б. Ж. Чектыбаев², Э.Г. Батырбеков³, И.А. Сорокин^{4,1}, В. А. Лузанов⁴, Т. Соларевич¹, С. С. Довганюк¹, Ю. М. Гаспарян¹, И.Л. Тажибаева², Е.А. Кашикбаев², Д.А. Ольховик ¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» ²Филиал Института Атомной Энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан ³Национальный ядерный центр Республики Казахстан. Курчатов, Казахстан ⁴Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино Московской обл. Методика анализа эрозии стенки в токамаке КТМ</p>
13.00 – 14.00	Обед

Председатели – А.А. Писарев, С.А. Крат

НЛК аудитория 2.2

14.00 – 14.20	В.П. Афанасьев, Л.Г. Лобанова <i>Национальный исследовательский университет «МЭИ»</i> Рециклинг энергии в термоядерных установках с учетом релаксации плазменных возмущений в конструкционных материалах
14.20 – 14.40	L.G. Lobanova^{1,2}, S. Wang¹, H. Lian¹, X. Cui¹, J. Chen¹, R. Yan¹, L. Zhang¹, V.P. Afanas'ev², H. Liu¹ <i>¹Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, China</i> <i>²Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия</i> Плазменно-химический механизм разрушения поверхности зеркал в токамаке EAST
14.40 – 15.00	С.С. Ананьев <i>¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва</i> <i>²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва</i> <i>³Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва</i> Системное моделирование и оптимизация тритиевого топливного цикла токамака – стационарного термоядерного источника нейтронов
15.00 – 15.20	В.В. Кулагин¹, Р. Делпорт-Матюран², Э.А. Одилль³, М.С. Зибров⁴ <i>¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, РФ</i> <i>²Массачусетский технологический институт, Кембридж, США</i> <i>³Комиссариат по атомной и альтернативным видам энергии, Сен-Поль-ле-Дюранс, Франция</i> <i>⁴Институт Макса Планка, Гархинг, Германия</i> Верификация и валидация кинетической модели поверхности в коде FESTIM
15.20 – 15.40	Е.Д. Маренков Ф.Р. Колесов <i>Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ</i> Кинетическая теория быстрой редепозиции
15.40 – 16.00	Кофе-брейк

16.00 – 16.20	<p>Синегрибов С. В., Полянский М. С., Смирнов А. О. <i>ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности»</i> О нормативном правовом регулировании безопасности термоядерных и гибридных систем</p>
16.20 – 16.40	<p><u>О.В. Огородникова</u>^{1,2}, З.Р. Арутюнян¹, А.С. Умеренкова¹, А.А.Никитин^{1,2}, Ю.М. Гаспарян¹, Э. Сал^{3,4}, К. Гарсия-Розалес^{3,4} ¹<i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва</i> ²<i>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва</i> ³<i>СЕИТ-Баскский научно-технический альянс (as BR), Пасео Мануэль де Лардиза-баль 15, 20018 Сан-Себастьян, Испания</i> ⁴<i>Университет штата Ифарра, Те Ифнун, Пасео Мануэль де Лардизабаль 13, 20018 Сан-Себастьян, Испания</i> Корреляция накопления дейтерия в W-Cr-Y со структурными изменениями при отжиге</p>
16.40 – 17.00	<p>К.С.Гришаков, Н.Н. Дегтяренко ¹<i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</i> О конкуренции изотопов водорода в вольфраме</p>
17.00 – 17.20	<p><u>А.В. Голубева</u>¹, Т.А. Шишкова¹, А.П. Персианова¹, Н.О. Степанов¹, А.Е. Алёшин², Д.А. Козлов¹, Д.И Черкез¹, И.Ю. Литовченко³, В.М. Чернов^{1,4} ¹<i>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»</i> ²<i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</i> ³<i>ИФПМ СО РАН, Томск</i> ⁴<i>ВНИИИМ им. А.А. Бочвара, Москва</i> Захват и проникновение дейтерия сквозь малоактивируемую аустенитную хромомарганцевую сталь, первые результаты</p>
17.20 – 17.40	<p>М.М. Цвентух¹ ¹<i>Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), Москва</i> Лавины взрывов нанофрагментов вольфрамовых нановолокон в слоях W fuzz</p>
17.40 – 18.30	Дискуссия
18.30	Welcome together в корпусе 33

Председатели – Ю.М. Гаспарян, Я.А. Садовский

НЛК аудитория 2.2

9.50 – 10.00	Открытие второго дня
10.00 – 10.20	<p><u>О.С. Медведев</u>^{1,2}, Е.В. Шубина^{1,3}, А.Г. Раздобарин¹, М.В. Гришаев², Д.И. Елец^{1,2}, И.В. Мирошников¹, Ю.М. Гаспарян² ¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе ²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» ³Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург</p> <p>Количественный анализ содержания изотопов водорода в материалах первой стенки токамака методом оптической спектроскопии пеннинговского разряда</p>
10.20 – 10.40	<p><u>В.Л. Буховец</u>¹, А.Е. Городецкий¹, С.Ю. Рыбаков¹, А.В. Маркин¹, Т.В. Рыбкина¹, Р.Х. Залавудинов¹, Д.И. Елец², А.Г. Раздобарин², Е.Е. Мухин² ¹Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва ²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург</p> <p>Очистка молибденовых зеркал в плазме разряда в гелии от продуктов взаимодействия с водяным паром</p>
10.40 – 11.00	<p><u>В.Л. Буховец</u>, А.Е. Городецкий, А.В. Маркин, Р.Х. Залавудинов ¹Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва</p> <p>Длительное распыление сапфира и кварца ионами изотопов водорода и гелия</p>
11.00 – 11.20	<p><u>А.А. Степаненко</u>, Ю.М. Гаспарян Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</p> <p>Восстановление параметров захвата газа в твердое тело с использованием методов машинного обучения для задач лазерно-индуцированной десорбционной диагностики</p>

11.20 – 11.40	<p>Е.В. Шубина^{1,3}, О.С. Медведев^{1,2}, М.В. Гришаев², А.Г. Раздобарин¹, Д.И. Елец^{1,2}, И.В. Мирошников¹, С.В. Филиппов¹, Ю.М. Гаспарян² ¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе ²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» ³Санкт-Петербургский государственный университет</p> <p>Количественный анализ накопления изотопов водорода в первой стенке токамака Глобус-М2 методами лазерно-индуцированной абляции и лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии</p>
11.40- 12.00	<p>М.В. Гришаев¹, О.С. Медведев^{1,2}, Е.В. Шубина^{1,3}, Н.Е. Ефимов¹, Д.Н. Синельников¹, А.Г. Раздобарин², И.А. Никитин¹ ¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва ²Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург ³Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург</p> <p>Особенности применения CF-LIBS в диагностики накопления изотопов водорода</p>
12.00 – 12.20	<p style="text-align: center;">Кофе-брейк</p>
12.20 – 12.40	<p>И.А. Никитин, Д.Н. Синельников, Н.Е. Ефимов, М.В. Гришаев Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» Анализ адсорбции протия и дейтерия на материалы ТЯУ с помощью ионного рассеяния и атомов отдачи</p>
12.40 – 13.00	<p>В.А. Иванов, М.А. Терещенко, М.Е. Кобышев, Т.И. Камолова Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН Потоки заряженных частиц на отрицательный электрод в плазме</p>
13.00 – 13.20	<p>Н.С. Попов¹, А.Н. Сучков¹, В.О. Кириллова¹, М.Ю. Жарков², А.В. Вертков² ¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва ²АО "Ордена Ленина НИКИЭТ им. Н.А. Доллежалы", Москва Композит вольфрам-сталь (WSS) как основа для капиллярно-пористых структур: структура и теплопроводность</p>

13.20 – 14.20	Обед
------------------	------

Председатели – Л.Б. Беграмбеков, Д.Н. Синельников ЛК аудитория 2.2

14.20 – 14.40	Т.Л. Бобровский* , А.Ф. Гурбич , М.В. Боховко <i>¹АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»</i> Ядерно-физические методы анализа содержания легких элементов в поверхности конструкционных материалов
14.40 – 15.00	С.С. Довганюк , Л.Б. Беграмбеков , Ю.И. Рукина , Е.А. Нарских <i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</i> Особенности захвата и удержания водорода в соединениях, образованных при осаждении на поверхность металлов атомов алюминия и бора, распыленных ионами аргоновой плазмы с соответствующих мишеней
15.00 – 15.20	Р.Х. Хисамов¹ , Н.Н. Андрианова^{2,3} , А.М. Борисов^{1,3} , М.А. Овчинников³ , Р.Р. Мулюков¹ <i>¹Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа</i> <i>²Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва</i> <i>³Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва</i> Морфология поверхности ультрамелкозернистого вольфрама при облучении ионами гелия
15.20 – 15.40	Е.З. Бирюлин , И.А. Алябьев , И.М. Позняк , В.Ю. Цыбенко , С.Ю. Фомичева , А.Ю. Луциков <i>¹ГНЦ РФ ТРИНИТИ</i> Численная модель, описывающая обтекание мишени потоком плазмы в экспериментах на плазменных ускорителях
15.40– 16.00	Г.А. Рыжков¹ , Д.Е. Черепанов^{1,2} , Л.Н. Вячеславов¹ , А.А. Касатов^{1,3} , В.А. Попов^{1,3} <i>¹Институт ядерной физики им. Будкера СО РАН, Новосибирск</i> <i>²Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск</i> <i>³Новосибирский государственный университет, Новосибирск</i> Эрозия покрытия из карбида бора в результате воздействия импульсно-периодической тепловой нагрузки

16.00 – 16.20	<p>Н.Н. Андрианова^{1,2}, А.М. Борисов^{1,2,3}, Е.А. Воробьева¹, М.А. Овчинников¹</p> <p><i>¹Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва</i></p> <p><i>²«Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)» Москва</i></p> <p><i>³Московский государственный технологический университет “СТАНКИН”, Москва</i></p> <p>Имитация высокодозного реакторного облучения высокоориентированного пиролитического графита имплантацией ионов гелия и углерода</p>
16.20 – 16.40	<p>Д.С. Никитин*, А. Насырбаев, И.И. Шаненков, А.А. Сивков</p> <p><i>Национальный исследовательский Томский политехнический университет</i></p> <p>Формирование металломатричных композитов, армированных частицами сверхтвердых карбидов, в электроразрядной плазме</p>
16.40 – 17.00	<p>Р.А. Селиванов^{1,2}, С.А. Крат¹, И.А. Сорокин^{1,2}, Д.Ю. Шувалов¹, В.В. Захаров³, А.В. Руденко³</p> <p><i>¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</i></p> <p><i>²Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.И. Котельникова РАН</i></p> <p><i>³Институт высокотемпературной электрохимии Уральского отделения РАН</i></p> <p>Исследование физических свойств литий-борного композита</p>
17.00	<p>Закрытие конференции</p>

Ю.М. ГАСПАРЯН

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**YMGasparyan@mephi.ru*

ОБЗОР РАБОТ ПО ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ В НИЯУ МИФИ

Выбор материала облицовки обращенных к плазме элементов (ОПЭ) остается одним из наиболее острых вопросов при проектировании термоядерных установок (ТЯУ). В ходе эксплуатации ОПЭ подвергаются экстремальным потокам тепла и частиц, включая нейтроны, образующиеся в термоядерных реакциях, что накладывает жесткие ограничения. В ходе эксплуатации происходит непрерывное распыление и миграция материала по поверхности ОПЭ и в удаленные области. При использовании нескольких материалов облицовки ОПЭ такая миграция приводит к изменению состава поверхности. Может происходить значительная модификация рельефа поверхности, что влияет на взаимодействие с плазмой. Важным свойством стенки является возможность удерживать в себе падающие на поверхность частицы изотопов водорода. По мере увеличения мощности и длительности разрядов контролю обратного потока частиц со стенки необходимо уделять все большее внимание [1].

Наиболее перспективным решением видится реализация концепций возобновляемой поверхности ОПЭ, среди которых можно выделить методы на основе применения жидких металлов и нанесения покрытий на поверхность ОПЭ непосредственно внутри токамака.

В НИЯУ МИФИ активно развиваются сразу несколько направлений. Открыта новая лаборатория по изучению физических основ обращенных к плазме элементов на основе жидкого лития, в рамках которой проводятся эксперименты по изучению особенностей взаимодействия водородной и гелиевой плазмы с жидким литием, а также коррозии контактирующих с литием материалов. Разрабатывается также технология формирования потока жидкого лития по поверхности ОПЭ для обеспечения непрерывного возобновления поверхности [2].

Ведутся работы по изучению взаимодействия водородной плазмы с бор-карбидными слоями, изучаются режимы, при которых на поверхности ОПЭ образуется стехиометрический карбид бора, обладающий рядом преимуществ [3]. Возобновление защитного покрытия в данном случае можно реализовать при разложении в плазме газообразного карборана.

Важной составляющей исследований является развитие методов

моделирования взаимодействия плазмы со стенкой в масштабах реальных термоядерных установок с учетом реальной геометрии и параметров плазмы. Такой подход позволяет на основе детального изучения элементарных процессов в лабораториях предсказать поведение в реальных условиях.

Для верификации моделей продолжается активное изучение особенностей элементарных процессов взаимодействия ионов водорода, гелия и других характерных для ТЯУ примесей с перспективными материалами облицовки обращенных к плазме элементов.

Изучение физических основ взаимодействия плазмы с поверхностью позволяет развивать плазменные технологии для широкого круга задач. Развиваются методы плазменного азотирования и нанесения функциональных покрытий различными способами, включая разработку методов высокоскоростного осаждения. Разработаны новые подходы по созданию защитных покрытий для ТВЭЛов атомных реакторов, а также к их ускоренным коррозионным испытаниям.

В области водородной энергетики выполнен проект по изучению соосаждения водорода с различными материалами в поддержку концепции создания тонкопленочных накопителей водорода.

[1] Ю.М. Гаспарян, С.А. Крат. Влияние выбора материала облицовки стенок термоядерных установок на накопление изотопов водорода. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2024, т. 47, вып. 1, с.5.

[2] А.А. Писарев и др. Текущий жидкий литий как материал, обращенный к плазме. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2024, т. 47, вып. 1, с.15.

[3] Л.Б. Беграмбеков и др. Карбид бора как защитный материал контактирующих с плазмой элементов плазменных и термоядерных установок. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2024, т. 47, вып. 1, с.54.

В.П. БУДАЕВ^{1,2*}, Ю.В. МАРТЫНЕНКО¹

¹ НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МЭИ», Москва, Россия

*budaev@mail.ru

ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ И СИСТЕМ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА В СОВРЕМЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВКАХ

Испытания внутрикамерных конструкционных материалов в современных токамаках (графита в токамаках JET, T-10, TEXTOR и других, вольфрама в токамаках JET, WEST, EAST, AUG, T-10 и других, бериллия в токамаке JET, молибдена и лития в токамаке EAST), выявили ряд существенных проблем их стойкости под действием высоких плазменных, пучковых, тепловых нагрузок. В термоядерном реакторе (в том числе, в ИТЭР) ожидаются плазменно-тепловые нагрузки значительно превышающие нагрузки в современных токамаках. Кроме того, при длительной эксплуатации токамака на внутрикамерных компонентах образуются пористые поверхностные слои и пленки, способные захватывать большое количество рабочего газа. В термоядерном реакторе при работе с тритием такие поверхности могут поглощать и удерживать большое количество трития, в том числе формируя углеводородные плёнки, что негативно повлияет на эффективность и безопасность реактора, а также на характеристики рециклинга и режимы удержания плазмы.

Эксперименты на токамаках до 2000-х годов, использующих преимущественно графит в качестве теплозащитной облицовки первой стенки и дивертора (в том числе, в D-T экспериментах на токамаках TFTR и JET в 1990-х гг.) продемонстрировали существенное влияние захваченного в графите рабочего газа на режимы работы токамака (рециклинг и пр.). Для уменьшения негативного эффекта накопления изотопов водорода в обращённых к плазме компонентах начиная с 2000-х годов на токамаках начались эксперименты с металлической стенкой (с вольфрамом, а также с бериллием на JET) с надеждой на уменьшение захвата водорода в металлах в сравнении с графитом. В последние годы в мировых термоядерных центрах проведены экспериментальные испытания предлагаемых для реактора внутрикамерных обращённых к плазме компонентов (ОПК) на основе металлов (вольфрама, молибдена, бериллия, сталей) при критически высоких стационарных нагрузках более десятка МВт/м² и на порядки больше импульсных нагрузках (см. обзор об испытаниях вольфрама [1]), которые

показали возможность эрозии и даже разрушения металлов, значительной модификации обращённых к плазме материалов. Проведённые эксперименты на токамаках, а также плазменно-тепловые испытания вольфрамовых материалов и макетов пластин теплозащитной облицовки в плазменных установках (плазменных ускорителях КСПУ, электронно-пучковых и плазменных установках - симуляторах дивертора) показали, что ожидаемое преимущество металлической стенки (вольфрама и др.) не оправдывается из-за негативного влияния большого поступления атомов расплывлённого металла в плазменный разряд, приводя к радиационному охлаждению, и формирования под действием плазмы поверхностных пористых слоев, поглощающих большое количество рабочего газа.

В этой связи встаёт вопрос о переоценке перспективы использования графита в термоядерном реакторе в конструкциях ОПК, учитывая положительный опыт эксплуатации графита в токамаках и преимущества графита, такие как низкий атомный номер, высокая теплостойкость и другие. Необходимо проанализировать полученные в последние годы экспериментальные результаты испытаний материалов, в том числе графита в сравнении с металлами (вольфрама), применяемых в токамаках, и предложить дополнительные испытания.

В современных токамаках, а также в ИТЭР, используется прогрев стенки камеры и внутрикамерных ОПК с использованием специальных нагревателей; прогрев также обеспечивается плазменными потоками из разряда на ОПК. Температура непрерывного прогрева стенки и ОПК достигает 120-300 °С (температура зависит от технических возможностей и принятых технических решений конкретного токамака, а также плазменной нагрузки). Во время разряда элементы ОПК (края лимитеров и зоны диверторных пластин в контакте с сепаратрисой), принимающие плазменные потоки с наибольшим энергосодержанием, могут прогреваться до 2000 °С и более. Плазменно-тепловая нагрузка в термоядерном реакторе (по оценкам для ИТЭР [1]) на ОПК может быть в диапазоне от 0,1 МВт/м² до 15 МВт/м² в стабильной фазе и достигать гигаваттных нагрузок при неустойчивостях ЭЛМах, срывах, вертикальном смещении (т.н. переходных процессах).

Наиболее негативное свойство графита в качестве обращённого к плазме материала в токамаке – это повышенная эрозия (коэффициент химической эрозии ионами водорода) при температуре графита в диапазоне ~ 200÷700 °С (диапазон включает температуру 120÷300 °С применяемую технологически для прогрева внутрикамерных компонентов в токамаках, чтобы удалить с поверхности молекулы воды, газа). Также неблагоприятным свойством

графита традиционно рассматривается захват водорода, в том числе в виде формирования углеводородов, на поверхности графита как с изначальной гладкой структурой, так и после плазменного облучения с формированием пористой поверхности, переосажденных пористых слоев и образованных пылевых частиц.

Уменьшить эти негативные факторы можно, если эксплуатировать графит при высокой температуре поверхности более 1000 °С, при которой коэффициент распыления графита частицами плазмы и накопление водорода будут значительно снижены, см. [3]. При такой высокой температуре поверхность графита, включая области разрушений и пористые области, и переосажденные слои и плёнки, будет очищена от захваченных газов (в том числе, от изотопов водорода в реакторе); углеводородные материалы (в том числе с содержанием трития и дейтерия) будут распадаться и удаляться откачкой.

В данной работе предлагается план испытаний высокими температурами перспективных графитовых внутрикамерных компонентов для оценки применения в теплозащитной облицовке камеры в реакторе, в том числе в ТИН. Предлагается рассмотреть схему плазменных и пучковых испытаний графита, при которой его поверхность будет нагреваться до температуры 1000 °С. Для этого необходима система термостабилизации, обеспечивающая охлаждение графитовых модулей теплозащитной облицовки при тепловой нагрузке мощностью до ~10 МВт/м² на поверхность модулей. Модуль должен обеспечивать крепление графитовой пластины к трубке охлаждения, изготовленной из металла с высокими характеристиками теплообмена и теплостойкости. Характеристики теплообмена системы должны обеспечивать поддержание температуры графитовой поверхности модуля в заданном диапазоне температуры 700 ÷ 1000 °С и более.

План испытаний графитовых модулей ОПК с термостабилизацией при 700 ÷ 1000 °С должен включать:

- плазменные испытания графитовых модулей в плазме с мощностью стационарной нагрузки от 1 МВт/м² до 10 МВт/м².
- термоциклические испытания графитовых модулей в электронно-пучковой установке с нагрузками до 50 МДж м⁻² с^{-1/2}, соответствующим нагрузкам в переходных процессах ЭЛМах, срывах, явлениях VDE;
- плазменно-тепловые нагрузки при дуговых процессах, соответствующих униполярным дугам в плазме.
- тепловые испытания модулей ОПК с графитовой облицовкой, укрепленной на трубках охлаждения из молибдена и тантала, при температуре нагрева

поверхности до 1000 °С, с целью оценки использования молибдена, тантала в схемах охлаждения и термостабилизации;

-испытания схем интенсивного охлаждения с термостабилизацией при температуре нагрева до 1000 °С графитовых модулей при тепловой нагрузке мощностью до $10 \div 15 \text{ МВт/м}^2$ на поверхность модулей.

Испытания перспективных графитовых модулей ОПК термоядерного реактора будут выполняться на плазменных стационарных и импульсных установках в России: ПЛМ-М, ПР-8, ПФ-3, электронно-лучевых установках. В НИЦ «Курчатовский институт» разрабатывается проект и будет сооружён универсальный многозадачный исследовательский комплекс УНИМАТ-ТС для проведения необходимых плазменно-пучковых, тепловых и водородных испытаний и исследований свойств перспективных материалов и конструкций ОПК, в том числе из графита, плазменно-физических технологий для применения в термоядерных реакторах и нейтронных источниках. Экспериментальные испытания материалов мощными плазменными нагрузками на современных плазменных установках обеспечат также развитие новых плазменных технологий [2] для синтеза новых материалов с запрограммированными свойствами для ядерных, химических, аэрокосмических технологий, для биотехнологий и биомедицинских применений.

Работа выполнена по комплексной теме 15П НИЦ «Курчатовский институт» и госзаданию FSWF-2025-0001.

Литература

- [1]. Будаев В.П. Вопросы атомной науки и техники. Термоядерный синтез. 2015, 38, 4, 5.
- [2]. Будаев В.П. Инновационные направления развития плазменных технологий. Труды XLV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 2 – 6 апреля 2018 г.
- [3]. Мартыненко Ю.В. в кн. Итоги Науки Техники. Сер. Физика плазмы, ВИНТИ, 1982, т.3 с.119-175.

С.Д. ФЕДОРОВИЧ^{1*}, В.П. БУДАЕВ^{1,2}, Д.И. КАВЫРШИН¹,
Л.Н. ХИМЧЕНКО³, В. К. ЧАН¹, М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ»

²НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

³Частное учреждение «Проектный центр ИТЭР», Москва.

*FedorovichSD@email.com

ИСПЫТАНИЕ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ КАРБИДА БОРА НА ВОЛЬФРАМЕ В СТАЦИОНАРНОЙ ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЕ УСТАНОВКИ ПЛМ-М

Для изготовления обращенных к плазме компонентов первой стенки в установках реакторного масштаба планируется использовать вольфрам. В международном термоядерном экспериментальном токамаке-реакторе ИТЭР будет эксплуатироваться вольфрамовый дивертор, рассматриваются вопросы использования вольфрама в термоядерном источнике нейтронов (ТИН) и термоядерном реакторе следующего поколения ДЕМО. Специальные испытания вольфрама мощными плазменными и пучковыми нагрузками в плазменных и пучковых установках, в том числе, по программе испытаний для ИТЭР, показали существенную деградацию поверхности [1], включая охрупчивание после термоциклических нагрузок уровня ЭЛМов, крупномасштабное растрескивание, рекристаллизацию и ухудшение механических свойств. Использование вольфрама для изготовления обращенных к плазме элементов приводит к дополнительным потерям энергии из центральных областей плазмы и необходимости резкого увеличения мощности нагрева. Перспективным материалом для защитного покрытия вольфрама, в частности, для токамака с реакторными технологиями (ТРТ, Россия), можно считать карбид бора [2].

В НИУ «МЭИ» в экспериментах на плазменной установке ПЛМ-М [3] был испытан вольфрамовый образец с защитным покрытием карбида бора, полученным методом плазменного напыления (ИТПМ СО РАН, Новосибирск). Образец, изготовленный в форме бруска размером 20x20x15мм, изображен на рисунке 1 в потоке гелиевой плазмы (а) и после плазменного воздействия (б). Красным цветом на рисунке 1 (б) отмечены четыре области для анализа поверхности методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и определения элементного состава по результатам энергодисперсионного рентгеновского анализа. Точка 3 соответствует переходной области от слоя В₄С к открытой вольфрамовой поверхности на ребре бруска.



Рисунок 1 – Фотография поверхности образца

Оптический спектр излучения плазмы вблизи поверхности образца был измерен с помощью монохроматора-спектрографа MS7504(i) в диапазоне от 200 до 1100 нм со спектральным разрешением 0,013 нм. На рисунке 2 представлено распределение концентраций гелия и примесей по радиусу плазменного потока с шагом 0,1 мм, полученное по измеренным интенсивностям спектральных линий. Температура электронов плазмы 1 – 2 эВ, концентрация электронов до $5 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$.

Расстояние от центра образца, см

Рисунок 2 – Распределение концентраций гелия и примесей по радиусу плазменного потока. Температура поверхности образца достигала 920 К

На рисунке 2 грань бруска с покрытием из карбида бора выделена оранжевым цветом. Видно, что над этой поверхностью образца (слева от оранжевой линии) зарегистрированные относительные концентрации примесей C, W и Fe существенно выше, чем с противоположной стороны образца (справа), защищенной от воздействия плазмы пластиной держателя, изготовленной из нержавеющей стали. Полученные распределения являются немонотонными. Вблизи поверхности с покрытием из карбида бора наблюдаются основные пики интенсивности излучения примесей, при удалении от образца интенсивность пиков сначала уменьшается, а далее наблюдается второй пик, для углерода и вольфрама с провалом в центре. Углерод и железо входили в состав поверхности исходного образца, который подвергался испытаниям на установке КСПУ-Т (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»). Атомы вольфрама в спектре плазмы появляются, в основном, из-за открытых вольфрамовых поверхностей вблизи рёбер бруска (область 3 на рисунке 1) не защищенных слоем карбида бора. Влияние на состав спектра двух

вольфрамовых нитей диаметром 0,3 мм, используемых для крепления образца, к пластине держателя можно оценить по правой части графика на рисунке 2 с противоположной стороны образца.

Характерное отсутствие в оптическом спектре на рисунке 2 спектральных линий бора является следствием особенностей зависимости коэффициента распыления бора от температуры. В плазме вследствие амбиполярности потока частиц всегда есть электрическое поле, направленное к поверхности, которое принудительно вытягивает ионы из плазмы на поверхность и тормозит электроны, поэтому попадающие в плазму примеси, ионизируются и в разной степени возвращаются обратно. Как показано в работе [4], коэффициенты распыления бора и карбида бора в плазме изотопов водорода с энергией до 100 эВ не превышают значений 10^{-3} при температурах поверхности образца до 1200 К для бора и 1800 К для карбида бора и резко возрастают при температурах выше указанных. В настоящей работе был проведён эксперимент с образцом гексаборида лантана в гелиевой плазме установки ПЛМ-М с энергией ионов гелия 80 эВ. При температурах образца в интервале 1200 – 2000 К в оптическом спектре плазмы вблизи поверхности образца наблюдалась интенсивная спектральная линия атомов бора В I на длине волны 417,9 нм. При температурах меньше 1200 К эта спектральная линия не наблюдалась. Элементный состав поверхности исследуемого образца после испытаний в установке ПЛМ-М по результатам энергодисперсионного рентгеновского анализа в центральной области 1 (рисунок 1) представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Элементный состав поверхности исследуемого образца

Элемент	Весовой %	Атомный%
B	14.65	36.32
C	5.12	11.42
O	17.24	28.87
Al	2.87	2.85
Si	3.11	2.96
Cr	5.64	2.90
Fe	18.50	8.88
W	28.69	4.18
Zr, Na, Ca, Ni,	2.84; 0.11; 0.40; 0.83	0.83; 0.13; 0.27; 0.38

По результатам анализа изображений поверхности, полученных методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) после воздействия гелиевой плазмы на исследуемый образец в установке ПЛМ-М, наблюдаются

столбчатые структуры, дендриты и фрактальные кристаллиты. Не исключено, что предварительные испытания исследуемого образца на установке КСПУ-Т (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ») сняли часть покрытия карбида бора и кратеры от дуг достигли подложки – вольфрама.

Работы на ПЛМ-М выполнены при поддержке проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FSWF-2023-0016.

Литература

[1] Будаев В.П. Результаты испытаний вольфрамовых мишеней дивертора при мощных плазменно-тепловых нагрузках, ожидаемых в ИТЭР и токамаках реакторного масштаба (обзор) // ВАНТ, сер. Термоядерный синтез, 2015, т.38, вып.4, с. 5 – 33.

[2] Красильников А.В., Коновалов С.В., Бондарчук Э.Н. и др. Токамак с реакторными технологиями (TRT): концепция, миссии, основные особенности и ожидаемые характеристики // Физика плазмы, 2021, т. 47, № 11, с. 970 – 985.

[3] Будаев В.П., Федорович С.Д., Дедов А.В. и др. Испытания вольфрамовой облицовки дивертора в плазменной установке ПЛМ // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2024, т. 47, вып.2, с. 49 – 57.

[4] Беграмбеков Л.Б., Айрапетов А.А., Грунин А.В. и др. Карбид бора как защитный материал контактирующих с плазмой элементов плазменных и термоядерных установок. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2024, т. 47, вып.1, с. 54 – 64.

Л.Н.ХИМЧЕНКО¹, В.П. БУДАЕВ^{2,3}
¹ ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР»,
² НИЦ «Курчатовский институт»,
³ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

ОБРАЗОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНОГО ВЕЩЕСТВА В ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ С ПРЕДЕЛЬНЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ НА МАТЕРИАЛЫ.

При проектировании термоядерного реактора, например ИТЭР, выбираются материалы первой стенки и дивертора, которые по своим свойствам вписываются в баланс энергии и частиц реактора. При этом в проекте учитываются не только параметры материалов, но и результаты экспериментов на термоядерных установках. В модельных экспериментах на плазменных установках, при испытаниях кандидатных материалов плазменными потоками, ожидаемыми в ИТЭР, были обнаружены явления, которые могут критически повлиять на работу термоядерного реактора. Например, было экспериментально обнаружено, что распылённый и переосаждённый материал, имеет особую структуру и свойства. А именно – фрактальную структуру [1], с фрактальной размерностью 2.1 – 2.3, (рис.1)

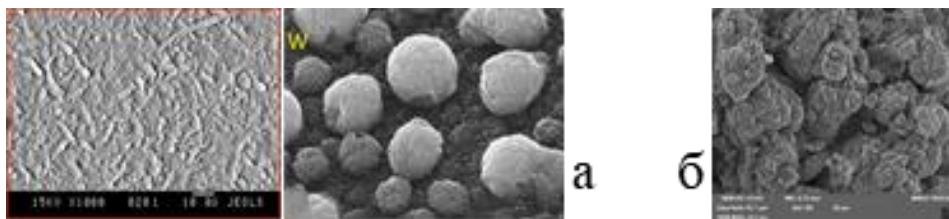


Рис.1. Фрактальные кластеры: а) вольфрама, б) лития.

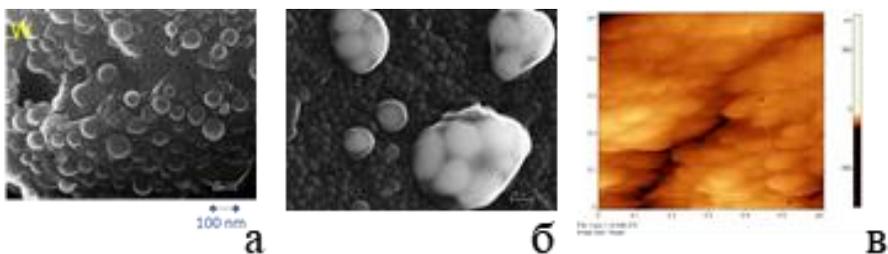


Рис.2. Проточастицы: а,в) вольфрам, б) бериллий.

На токамаке Т-10 было обнаружено, что графитовая пыль, оседаемая в нижней части вакуумной камеры имеет вид агломератов. Распределение пыли по размерам подчиняется степенному закону в диапазоне размеров 20-200 нм и фрактальной размерностью $D = 2,3$. При этом напылённые углеродные плёнки также имели фрактальную структуру. Исследование структуры плёнок на синхротронном ускорителе (СИ) показало, что они «... обладают афинной структурой во фрактальных комплексах, размером до ~ 30 нм, образуя открытую пористость, благодаря которой плёнки обладают высокой поглощающей способностью» [2].

Эксперименты на КСПУ, моделирующие воздействие ITER ELMs на бериллий, графит и вольфрам, показали, что перепылённый материал образует одинаковые структуры, не зависящие от вида материала. А именно - фрактальные кластеры, состоящие из «проточастиц» с минимальным размером порядка 15-50 нм, (рис.2), число которых в кластере составляет 10-50 тысяч. Такая структура появлялась вследствие повышенной подвижности проточастиц на поверхности материала. Фрактальные структуры обладают большой пористостью и, соответственно, сорбционной способностью и большой внутренней энергией. За счёт этой энергии фрактальный материал может, даже при незначительном воздействии, переходить в другое агрегатное состояние. Эксперименты с воздействием на переосаждённый вольфрам с фрактальной структурой слабого пучка аргона привели к перестройке структуры в кристаллическое состояние с образованием вискерсов.

Объяснение лежит на поверхности: при прохождении через плазму и осаждении, т.е. при рекомбинации, расплывённые атомы могут сохранять возбуждённое, метастабильное, состояние. И при этом могут возникать т.н. ридберговские атомы, имеющие увеличенный размер и значительное время жизни в таком состоянии. Из-за увеличенного размера они не могут

«встроится» в кристаллическую решётку и, поэтому, на поверхности агломерируют в плёнки и пыль с фрактальной структурой. Благодаря эффекту «поверхностного натяжения» ридберговские атомы собираются в кластеры, своеобразные молекулы, с числом в 10-50 тыс. атомов.

В ИТЭР такие структуры могут поглотить значительную часть трития. Кроме того, модификация перепылённых вольфрамовых плёнок может привести к образованию покрытий с неконтролируемыми свойствами. И, вообще, изучение ридберговской материи имеет фундаментальное научное значение.

Для технологических целей, это имеет большие перспективы для получения материалов с новой композитной структурой, которую невозможно получить химическими или традиционными методами металловедения, поскольку при распылении плазмой формируются условия с большой энергией распыления на нуклон.

Вышеперечисленные явления имеют высокий потенциал для развития новых перспективных плазменных технологий для получения новых материалов для термоядерной и тепловой энергетики, а также для применения в аэрокосмической технике и биомедицинских технологиях.

Литература

- [1] В.П.Будаев и др., ВАНТ, сер. Термоядерный синтез, 2015, т.38, №4. стр.5
- [2] В.Г.Станкевич и др. ВАНТ, сер. Термоядерный синтез, 2012, №3, стр. 19-26

И.И. АРХИПОВ^{1,2*}, Р.Х. ЗАЛАВУТДИНОВ², С.А. ГРАШИН¹,
Н.Ю. СВЕЧНИКОВ¹, Р.Г. ЧУМАКОВ¹, А.В. ЛУКАШЕВИЧ³

¹НИЦ «Курчатовский Институт», Москва

²ИФХЭ им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва

³НИУ «Московский Энергетический Институт», Москва

[*igor_arkhipov_54@mail.ru](mailto:igor_arkhipov_54@mail.ru)

ИЗУЧЕНИЕ МОРФОЛОГИИ, СОСТАВА И ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК ИЗ ТОКАМАКА Т-15МД

С помощью системы собирающих зондов детально исследованы углеродные пленки, которые образовались на внутрикамерных элементах конструкции токамака Т-15МД в период его подготовки к рабочим импульсам. Показано влияние тлеющих разрядов в Ar, He и H₂, а так же 84 рабочих разрядов в H₂ длительностью от 20 до 120 мс на образование и свойства С-пленок.

Для сбора распыленного материала использованы зонды-подложки из нержавеющей стали, W и Si размером 7×7 мм², которые крепились на специальный держатель. Вдоль тороидального направления, а также по полоидальному направлению в двух противоположных секторах токамака 5 и 13 было размещено более двадцати таких держателей.

Следует отметить, что лицевая поверхность зондов-подложек находилась на одном уровне с внешней поверхностью защитных углеродных плиток, определенное количество которых (примерно, 20%) было установлено на крепежных панелях вакуумной камеры токамака. Кроме того, в 5 сечении находился графитовый лимитер, который пространственно ограничивал плазму в отсутствии графитового покрытия дивертора. Таким образом, система зондов-подложек позволяла экспериментально изучить транспорт и осаждение примесей на некоторых элементах конструкции дивертора и первой стенки токамака [1].

Для изучения морфологии поверхности, определения толщины и состава С-пленок, помимо оптического микроскопа, использовались растровая электронная микроскопия и энергодисперсионный рентгеновский микроанализ. Получено пространственное распределение примесей по внутренней поверхности камеры токамака. Определены области преимущественной эрозии и осаждения.

Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии проведены исследования электронной структуры тонких (~10 нм) углеродных пленок на зондах-подложках.

На пленках с подложками из W и Si в спектрах C1s, W4f и Si2p были впервые обнаружены карбиды вольфрама и кремния (1.2-5.6 и 0.8 ат.%, соответственно). Таких фаз не было выявлено в токамаке Т-10 (НИЦ КИ) с графитовым лимитером и диафрагмой, а также в сильноточном плазменном ускорителе КСПУ-Т (ТРИНИТИ, г. Троицк) при облучении мощным импульсным пучком водородной плазмы, после экспериментов с графитой мишенью [2]. В целом, в пленках на этих установках наблюдалось небольшое количество примесей (<1 и 0.2–5 ат.%, соответственно). При этом в пленках из токамака Т-15МД во время подготовки к рабочим разрядам обнаружено гораздо большее их содержание, в том числе в виде железа и хрома (по спектрам Fe2p и Cr2p) в окисленной форме (5–18 ат.%). По нашему мнению, эти примеси являются результатом распыления металлических элементов конструкции вакуумной камеры токамака.

Кроме тонких пленок на зодах-подложках, была исследована толстая (1.2 мкм) С-пленка, образовавшаяся на смотровом окне вакуумной камеры токамака Т-15-МД. Гладкая поверхность этой пленки, обращенная к стеклу, была изучена с помощью оптического и электронного микроскопа. Энергодисперсионный рентгеновский микроанализ показал, что кроме основного элемента – углерода, в пленке присутствует заметное (до 30 ат.%) количество металлов, входящих в состав нержавеющей стали (Fe, Cr, Ni).

Таким образом показано, что в период подготовки рабочих импульсов на токамаке Т-15МД, кроме сильного распыления материалов, непосредственно контактирующих с плазмой, в удаленных от плазмы местах происходит осаждение толстых углеродных пленок. С одной стороны, такие пленки могут негативно влиять на оптические диагностики плазмы, а с другой, способны защитить от распыления внутрикамерные элементы конструкции токамака, тем самым способствуя снижению концентрации тяжелых примесей в плазме.

Литература

- [1] И.И. Архипов, С.А. Грашин, А.В. Лукашевич. Материалы XXVII конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью». Москва, 24-25 января 2024 г.: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2024. Стр. 28 – 29
- [2] V.G. Stankevich, N.Y. Svechnikov, B.N. Kolbasov, *Symmetry*, **15**, 623 (2023)

С. А. КРАТ^{1,*}, Б. Ж. ЧЕКТЫБАЕВ², Э.Г. БАТЫРБЕКОВ³, И.А. СОРОКИН^{4,1},
В. А. ЛУЗАНОВ⁴, Т. СОЛАРЕВИЧ¹, С. С. ДОВГАНЮК¹, Ю. М.
ГАСПАРЯН¹, И.Л. ТАЖИБАЕВА², Е.А. КАШИКБАЕВ², Д.А. ОЛЬХОВИК²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,
Российская Федерация

²Филиал Институт Атомной Энергии Национального ядерного центра Республики
Казахстан, Курчатов, Казахстан

³Национальный ядерный центр Республики Казахстан. Курчатов, Казахстан

⁴Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.
Котельникова РАН пл. Введенского, 1, Фрязино Московской обл., Российская
Федерация

*sakrat@mephi.ru

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ЭРОЗИИ СТЕНКИ В ТОКАМАКЕ КТМ

Предложен метод определения распределения эрозии и осаждения по стенке токамака КТМ на временах от одной экспериментальной кампании. Метод заключается в размещении специальных образцов-маркеров, предварительно покрытых слоем углерода известной толщины, на поверхностях тайлов стенки токамака на время кампании, и измерении толщины маркерных углеродных слоёв после экспериментальной кампании. В качестве образцов используются специальные винты, устанавливаемые заподлицо с поверхностью тайлов в технологические крепёжные отверстия, имеющиеся в каждом тайле стенки, что позволяет масштабировать пространственное разрешение диагностики в широком диапазоне. Толщины углеродных слоёв измерялись при помощи анализа электронным пучком по методу энерго-дисперсионной спектроскопии путём сравнения величин сигналов маркерного слоя и материала винта подложки слоя. Начальная толщина маркерных слоёв составляла ~ 250 нм, что составляет половину максимальной толщины, которую можно определить данным методом.

Получены результаты за суммарное время двух кампаний 2024 года. Определены зоны преимущественной эрозии и осаждения. Установлено, что области наибольшей скорости эрозии стенки находятся вблизи экваториальной плоскости и на верхнем куполе с внутренней стороны. Зоны осаждения выявлены на внешнем обходе с нижней стороны камеры, скорости осаждения составляют не более $\sim 3 \times 10^{20}$ ат/м²с. Вблизи внутренней ноги дивертора скорость осаждения составляет не более $\sim 5 \times 10^{20}$ ат/м²с.

В.П. АФАНАСЬЕВ^{1*}, Л.Г. ЛОБАНОВА¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

[*v.af@mail.ru](mailto:v.af@mail.ru)

РЕЦИКЛИНГ ЭНЕРГИИ В ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ С УЧЕТОМ РЕЛАКСАЦИИ ПЛАЗМЕННЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

Процессы рециклинга в термоядерных установках последовательно на прочной научной базе стали обсуждаться в классической монографии [1]. Традиционно данные процессы связывают с отражением частиц плазмы обратно в плазму. К этим процессам добавляются явления вторичной электронной эмиссии, фотоэффекта и другие, которые необходимо учитывать при определении плотности потока мощности, поглощаемой первой стенкой. Настоящая работа посвящена вопросам неупругих потерь энергии частиц на возбуждение плазменных колебаний в первой стенке. Потери энергии электронов на возбуждение плазменных колебаний составляет более 50% общих потерь энергии. Заметную часть потерь энергии ионов составляют потери на возбуждение плазмонов [2].

Традиционно [3,4] считалось, что плазменные колебания свободных электронов в твердых телах релаксируют в ионно-звуковые волны. Время жизни плазменного колебания в соответствии с [3,4] составляет $\Delta t = 10^{-12}$ с. Следовательно энергетическая ширина плазмонного пика должна составлять $\Delta E = \hbar / \Delta t = 4.136 \cdot 10^{-3}$ эВ. Данные утверждения противоречат экспериментальным данным по REELS и XPS [5], где ширина плазмонного пика составляет несколько эВ.

Эксперименты по вторичной электронной эмиссии при электронной и ионной бомбардировке [6,7] утверждают, что энергия, выделяемая при плазмонной релаксации, идет на рождение вторичных электронов с энергией, равной энергии плазмона за вычетом работы выхода. В работах по прямой регистрации оптического излучения на энергиях плазменных колебаниях регистрировалась пики, повторяющие сечение потерь энергии на возбуждение плазмонов [8]. Электромагнитные кванты, рождаемые в результате плазмонной релаксации, допускают прямую оптическую регистрацию и были зафиксированы в интервале длин волн 250 – 400 нм. Наиболее интересна для регистрации продольных квантов область длин волн 15 – 400 нм, что следует из экспериментальных и теоретических данных по дифференциальным сечениям неупругих потерь энергии электронов на возбуждение плазменных колебаний, которые определяют энергетический

спектр плазмонных возбуждений.

Литература

- [1] В.А. Курнаев, Е.С. Машкова, В.А. Молчанов Отражение легких ионов от поверхности твердого тела, Энергоатомиздат, Москва, 1985.
- [2] R.A. Baragiola, C.A. Dukes, Phys. Rev. Lett. 1996, V. 76 (14). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.2547>
- [3] В.А. Липеровский, В.Н. Цитович, ПМТФ, 1965, № 5, С. 15 – 22
- [4] X. Wu, B. Liu, T. Frauenheim, S. Tretiak, C. Yam, Y. Zhang, J. Chem. Phys., 2022, V. 157 (21), P. 214201. <https://doi.org/10.1063/5.0127435>
- [5] V.P. Afanas'ev, A.S. Gryazev, D.S. Efremenko, P.S. Kaplya, Vacuum, 2017, V. 136, P. 146 – 155. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2016.10.021>
- [6] W. Werner, K. Glantschnig, C. Ambrosch-Draxl, J. Phys. Chem. Ref. Data, 2009, V. 38, P. 1013, <http://dx.doi.org/10.1063/1.3243762>
- [7] W.S.M. Werner et al., Phys. Rev. B, 2013, V. 88, 201407. <http://dx.doi.org/10.1103/physrevb.88.201407>
- [8] С.С. Поп, В.А. Крицкий, И.П. Запесочный, Письма в ЖТФ, 1979, Т. 5, № 23, С. 1452 – 1455

L.G. LOBANOVA^{1,2*}, S. WANG¹, H. LIAN¹, X. CUI¹, J. CHEN¹, R. YAN¹, L. ZHANG¹, V.P. AFANAS'EV², H. LIU¹

¹*Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, China*

²*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия*

*lidiia@ipp.ac.cn

ПЛАЗМЕННО-ХИМИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРКАЛ В ТОКАМАКЕ EAST

Для обеспечения работы пассивных и активных методик оптической диагностики термоядерной плазмы используются зеркала. Самые напряженные условия эксплуатации создаются для «первых зеркал», расположенных в наиболее удаленных от точки детектирования излучения зонах токамака. Наиболее оптимальным материалом «первых зеркал» считается молибден [1].

В работе рассматриваются проблемы, возникающие в результате циклического режима эксплуатации зеркал в токамаке EAST. Первое - фаза разряда, в результате которого зеркала подвергаются воздействию пристеночной плазмы; второе - фаза подготовительных работ. В режиме подготовительных работ благодаря относительно большому количеству воды в камере токамака происходит активное окисление очищенной плазмой поверхности Mo. В фазе разряда благодаря температурному и плазменному воздействию происходит удаление оксида молибдена MoO₃, обладающего высокой летучестью.

Компонентный, послойный и химический анализ поверхности зеркал, которые эксплуатировались в токамаке EAST, выполнен на основе рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Отмечено малое, не превышающее одного процента, содержание перепыленных конструкционных материалов, таких как В, Fe, Cu, Zn. Установлено, что вся поверхность зеркал покрыта оксидом MoO₃. Прогрев образцов приводил к устранению оксидов.

Оптическая микроскопия показала, что наиболее активное разрушение поверхности зеркал за счет химической эрозии идет по межкристаллитным областям и вдоль трещин, возникших в результате процесса дефектообразования поверхности Mo потоком плазмы.

В работе отмечается, что подобный процесс циклического, плазменно-химического разрушения также происходит и с легко окисляемой

поверхностью W, оксиды которого обладают высокой летучестью.

Литература

[1] ITER Design Description Document. Diagnostics. (DDD 5.5.C.01), N 55 DDD 5 01-07-23 W 0.3, <https://iter.org>

С.С. АНАНЬЕВ^{1,2,3} *

¹ *Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва*

² *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва*

³ *Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва*

* *Ananyev_SS@nrcki.ru*

СИСТЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТРИТИЕВОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА ТОКАМАКА – СТАЦИОНАРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ

Для концептуального проектирования установок управляемого термоядерного синтеза необходимо оценивать количество топлива, требуемое для запуска установки, а на этапе технического проектирования установки – сформулировать технические требования к ключевым системам. Количество компонентов топлива (в первую очередь, радиоактивного трития) будет определяться потоками газа через вакуумную камеру установки, изотопным составом этого потока и технологиями, используемыми для обработки газа.

Установки термоядерного синтеза должны иметь системы, обеспечивающие требуемые условия синтеза и генерации нейтронов, в том числе, плотность плазмы и ее изотопный состав (с учетом диффузионных и стимулированных потерь) в течение разряда. В зависимости от способа ввода частиц топлива в плазму (типа инжекции) может формироваться различный профиль плотности и обеспечиваться различный изотопный состав плазмы (при раздельной подпитке/инжекции компонентами топлива).

Потоки газа в вакуумную камеру экспериментальных установок превышают темп выгорания в реакции синтеза в 100-1000 раз. Перспективные установки с длительными или стационарными разрядами должны иметь топливный цикл [1] отличный от экспериментальных установок для непрерывной (стационарной) обработки газа без его чрезмерного накопления [2]. Снизить количество содержащегося в топливном цикле установки трития также можно путем выбора оптимальных технологий [2, 3] обработки (очистки, разделения и др.) газа – для этого требуются предварительные сведения об ожидаемых потоках газа (через эти системы) и его изотопного состава.

Потоки частиц D/T в топливном цикле, таким образом, определяются в первую очередь требованиями к параметрам основной плазмы (требуемыми потоками через системы инжекции), а также потоками в системе откачки, поступающими из вакуумной камеры в системы обработки. Поэтому для определения количества трития в системах установки, оптимизации

структуры топливного цикла установки и выбора кандидатных технологий для систем топливного цикла должно быть выполнено моделирование процессов в системах топливного цикла токамака.

В докладе описывается системное моделирование топливного цикла токамака применительно к проектам стационарного термоядерного источника нейтронов. С использованием согласованного моделирования основной и диверторной плазмы токамака (в предполагаемых сценариях работы) предложена методика определения вклада частиц D/T от различных систем инжекции в итоговую плотность плазмы и расчета её изотопного состав – с учетом влияния нейтралов из дивертора (с изотопным составом отличным от основной плазмы). На основании оценок требуемых потоков D/T в системах топливной инжекции и откачки могут быть определены потоки и изотопный состав газа через системы топливного цикла, необходимые для обеспечения стационарных параметров плазмы. На основании этого может быть оптимизирована структура топливного цикла, выбраны кандидатные технологии обращения с изотопами водорода. Для выбранных технологических решений для систем топливного цикла может быть оценено количество трития, содержащееся в них. Путем моделирования различных сценариев подпитки плазмы/инжекции компонентов топлива могут быть найдены оптимальные решения, обеспечивающие наименьшее количество трития на установке.

Предлагаемый подход может быть применен для моделирования проектов термоядерного реактора (ДЕМО), гибридной реакторной установки (ГРУ), токамака с реакторными технологиями (ТРТ), а также установок с нерадиоактивными изотопами водорода в качестве компонентов топлива – например, токамаков Т-15МД, МИФИСТ, Глобус-2М и других.

Литература

- [1] C. Day et al, The pre-concept design of the DEMO tritium, matter injection and vacuum systems, *Fusion Engineering and Design* 179 (2022) 113139
- [2] В.Е. Черковец, В.В. Фрунзе, Тритиевые комплексы термоядерных установок с магнитным удержанием, Москва: Тривант, 2019. - 232 с. : ил. - Библиогр.: с. 218-232.
- [3] S.S. Ananyev, B.V. Ivanov, and B.V. Kuteev, Analysis of promising technologies of DEMO-FNS fuel cycle, *Fusion Eng. Des.*, 161, 111940 (2020).

В.В. КУЛАГИН^{1*}, Р. ДЕЛАПОРТ-МАТЮРАН², Э.А. ОДИЛЛЬ³,
М.С. ЗИБРОВ⁴

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, РФ

²Массачусетский технологический институт, Кембридж, США

³Комиссариат по атомной и альтернативным видам энергии, Сен-Поль-ле-Дюранс,
Франция

⁴Институт Макса Планка, Гархинг, Германия

**VVKulagin@mephi.ru*

ВЕРИФИКАЦИЯ И ВАЛИДАЦИЯ КИНЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОВЕРХНОСТИ В КОДЕ FESTIM

Накопление и транспорт водорода в материалах являются актуальными вопросами во множестве областей исследований, таких как управляемый термоядерный синтез, водородная энергетика, материаловедение и т.д. Численное моделирование динамики водорода в материалах играет важную роль в этих областях, позволяя выполнять прогностические оценки, проверять теоретические модели и строить новые. Для моделирования транспорта водорода в материалах существует множество специализированных программных пакетов (например, TMAP7 [1], MHIMS [2], TESSIM-X [3]) обладающих своими преимуществами и недостатками.

Среди широкого списка программного обеспечения FESTIM (Finite Element Simulation of Tritium In Materials) [4] является одним из немногих с открытым исходным кодом, доступным интерфейсом, написанном на языке Python, и активным сообществом. Это гибкий программный пакет для моделирования транспорта водорода и/или теплопереноса в 1D-3D геометриях, состоящих из одного или нескольких материалов. В частности, FESTIM был успешно применен в исследованиях по удержанию изотопов водорода в диверторных моноблоках [5], влиянию нейтронного облучения на удержание водорода [6], влиянию воздействия импульсно-периодических плазменных нагрузок на захват водорода [7] и т.д.

Физическая модель FESTIM охватывает широкий спектр объемных и поверхностных процессов, определяемых концентрацией растворенного водорода. Для поверхностных процессов – это приближение, основанное на равновесии концентраций адсорбированного и абсорбированного водорода вблизи поверхности. Однако существуют условия [3, 8], когда необходимо учитывать эволюцию концентрации водорода, адсорбированного на поверхности. Типичным примером является захват водорода в материале при облучении низкоэнергетичными атомами или молекулами. При малой (менее

нескольких эВ) энергии, недостаточной для преодоления поверхностного барьера для имплантации, приходящие частицы адсорбируются на поверхности и затем могут перейти в абсорбированное состояние.

В версии FESTIM v1.3 была добавлена кинетическая модель поверхности, позволяющая учитывать эволюцию концентрации адсорбированного водорода. Эта модель открывает возможности для детального изучения динамики водорода в материалах во время экспериментов по сорбции, быстрых переходных процессах во время плазменных разрядов, атомизации водорода на поверхности и т. п.

В данном докладе представлен обзор основных возможностей кода FESTIM и разработанной кинетической модели поверхности. Для демонстрации корректности реализации модели поверхности проведена ее верификация и валидация на основе экспериментальных результатов по захвату изотопов водорода в различных материалах. Помимо этого, проведено сравнение результатов моделирования в коде FESTIM с результатами, полученными с помощью двух других программных пакетов: MHIMS и TESSIM-X. Проведенное сравнение показало хорошее согласие как с экспериментальными результатами, так и с результатами моделирования, полученными с помощью других кодов, демонстрируя надежность имплементации модели.

Литература

- [1] Longhurst G. R., TMAP7 User Manual 2008
- [2] Hodille E. A. et al. Nucl. Fusion 2024. Vol. 64. P. 046022
- [3] Schmid K., Zibrov M., Nucl. Fusion 2021. Vol. 61. P. 086008
- [4] Delaporte-Mathurin R. et al. Int. J. Hydrog. Energy 2024. Vol. 63. P. 786
- [5] Delaporte-Mathurin R. et al. Nucl. Fusion 2023. Vol. 64. P. 026003
- [6] Dark J. et al. Nucl. Fusion 2024. Vol. 64. P. 086026
- [7] Kulagin V., Gasparyan Yu. J. Nucl. Mater. 2025. Vol. 603. P. 155370
- [8] Pisarev A. A. et al. Fus. Eng. Des. 1998. Vol. 41. P. 103

КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ БЫСТРОЙ РЕДЕПОЗИЦИИ

Магнитное поле токамака направлено почти параллельно поверхности компонентов, обращенных к плазме (КОП). Обычно материалы КОП распыляются как нейтральные атомы. Если распыленный атом ионизуется вблизи поверхности КОП, он может немедленно вернуться на поверхность под воздействием магнитного поля и электрического поля слоя Дебая-Чодуры. Эффективность быстрого переосаждения (редепозиции) можно охарактеризовать коэффициентом быстрого переосаждения R_p , определяемым как отношение переосажденного потока к потоку эродированных частиц.

Наиболее распространенным способом получения коэффициента быстрого переосаждения является моделирование Монте-Карло. Расчеты этим методом позволяют включить практически любые интересующие эффекты, однако вычисления занимают значительное время и, поэтому, их трудно использовать, например, в программах для моделирования пристеночной плазмы токамака, таких как SOLPS или UEDGE. Кроме того, сходимость метода Монте-Карло обычно трудно оценить.

В этом смысле аналитические уравнения, оценивающие эффективность быстрого переосаждения, выглядят более многообещающими. Основным результатом был получен Фуссманном [1]. Несмотря на то, что уравнение Фуссмана не учитывает электрическое поле слоя и применимо только для косинусного распределения распыленных атомов, оно по-прежнему используется в моделировании SOL для оценки R_p .

В настоящей работе мы разрабатываем математически точный способ вычисления R_p , который состоит в решении кинетических уравнений, описывающих движение распыленных атомов и ионов вблизи поверхности, обращенной к плазме [2]. По определению быстрой редепозиции, такие уравнения являются бесстолкновительными и, поэтому, допускают решение методом характеристик. Магнитное поле предполагается однородным и параллельным поверхности, а электрическое поле задается произвольным потенциалом ϕ , зависящим от расстояния до поверхности. Решая кинетические уравнения для атомов и ионов, получена функция распределения ионов, возвращающихся на поверхность под действием этих полей. По этой функции можно определить коэффициент быстрой

редепозиции, то есть отношение потока вернувшихся ионов к потоку распыленных атомов, а также любую другую их характеристику, например, средний угол или среднюю энергию.

Пример вычисления коэффициента R_p показан на рисунке 1 для безразмерного потенциала вида $\varphi = \mu(1 - \exp(-ky))$ в зависимости от параметра $p = \omega\tau$, где ω - ларморовская частота иона, а τ - время ионизации. Видно, что с ростом параметра k значения R_p все больше отличаются от значения R_p без электрического поля ($k=0$), которое совпадает с оценкой по формуле Фуссмана.

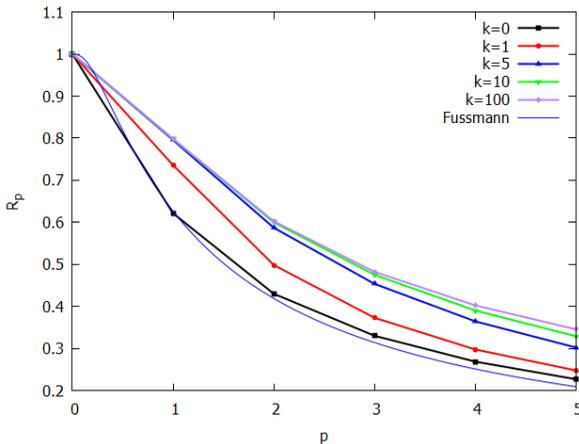


Рисунок 1 - Коэффициент быстрой редепозиции для $\mu = 1$ и различных значений k

Литература

[1] Fussmann G, et.al., 1995 High-Z elements as target materials in fusion devices *Plasma Physics and Controlled Fusion Research 1994. Fifteenth Conference Proceedings. Seville, Spain, 26 September - 1 October 1994, Vol. 2* (International Atomic Energy Agency (IAEA): IAEA) pp 143–8

[2] Marenkov E.D. 2024 The kinetic theory of prompt redeposition in the case of thin Debye sheath *Phys. Plasmas* **31**

О.В. ОГОРОДНИКОВА^{1,2*}, З.Р. АРУТЮНЯН¹, А.С. УМЕРЕНКОВА¹,
А.А.НИКИТИН^{1,2}, Ю.М. ГАСПАРЯН¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва
²Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва
*olga@plasma.mephi.ru

КОРРЕЛЯЦИЯ НАКОПЛЕНИЯ ДЕЙТЕРИЯ СО СТРУКТУРОЙ W и W-Cr-Y

Ключевой проблемой в создании реактора термоядерного реактора (ТЯУ) является разработка надежных материалов, взаимодействующих с плазмой. Одними из перспективных материалов для применения в термоядерной энергетике являются самопассивируемые дисперсно-упрочненные оксидами иттрия «умные» вольфрамовые сплавы W-10%Cr-0,5%Y, разработанные в качестве потенциального материала, взаимодействующего с плазмой, для демонстрационной термоядерной электростанции ДЕМО, в которых наноразмерные оксидные включения равномерно распределены на границах зерен, а хром находится в растворенном состоянии в матрице металла [1-2]. Эти сплавы устойчивы к окислению и технологическим выбросам радиоактивного трития в случае аварии с утечкой теплоносителя и попадании воздуха в систему охлаждения. Накопление изотопов водорода влияет на термомеханические свойства материалов, топливный баланс в реакторе, контроль плотности плазмы, а также является проблемой с точки зрения безопасности и экономики (запас трития ограничен). Так как тритий является радиоактивным, то контроль за его накоплением в стенках ТЯУ имеет первостепенное значение с точки зрения безопасности. Накопление трития не должно превышать 700 г по нормам безопасности [3]. В данной работе исследуется накопление дейтерия в исходном W-Cr-Y сплаве и сплавах, отожженных при 1273 и 1473 К по сравнению с поликристаллическим и нанокристаллическим вольфрамом. Проведено всестороннее исследование (i) микро- и нано- структуры материалов с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDXS), атомно-зондовой томографии (APT) и наноиндентирования, и (ii) удержания дейтерия с помощью термодесорбционной спектроскопии (TDS) до и после отжига сплава при температурах 1273 и 1473 К, а также чистого вольфрама с разной структурой.

В результате отжига при 1273 К был получен наноструктурированный сплав W-Cr-Y с двумя фазами (α W,Cr) и (W, α Cr). Был измерен средний размер зерен, составляющий около $0,10 \pm 0,03$ мкм. После отжига при 1473 К

наноструктура сплава W-Cr-Y сохранилась со средним размером зерен $0,27\pm 0,08$ мкм, что несколько больше размера зерен в случае сплава, отожженного при 1273 К, но фаза α Cr не была обнаружена. Средний размер частиц иттрия в исходном сплаве W-Cr-Y, измеренный методом ПЭМ, составил 30 ± 20 нм. Оба отжига при 1273 и 1473 К привели к уменьшению среднего размера частиц иттрия, который, согласно измерениям ПЭМ, составил 10 ± 3 и 13 ± 3 нм, соответственно. Однако, как было измерено методом АРТ, в распределении частиц иттрия преобладают кластеры иттрия со средним размером $2,9\pm 0,1$ нм, плотность которых на порядок превышает плотность кластеров со средним размером 10 ± 3 нм, которые были обнаружены в сплаве, отожженном при 1273 К, с использованием измерений ПЭМ. Таким образом, было показано, что для определения микро- и наноструктуры материалов необходимо использовать несколько экспериментальных методов, поскольку каждый из них имеет свои ограничения.

Содержание дейтерия (D) коррелирует со структурными изменениями сплава после отжига (Рис. 1). Наибольшее содержание D было обнаружено в отожженном сплаве W-Cr-Y с наименьшим размером зерен и частиц иттрия. Принимая во внимание сравнение данных TDS для сплава и чистого вольфрама с поли- и нано-структурой, было высказано предположение, что увеличение удержания D в отожженных сплавах связано с увеличением границ зерен, а не с плотностью частиц иттрия.

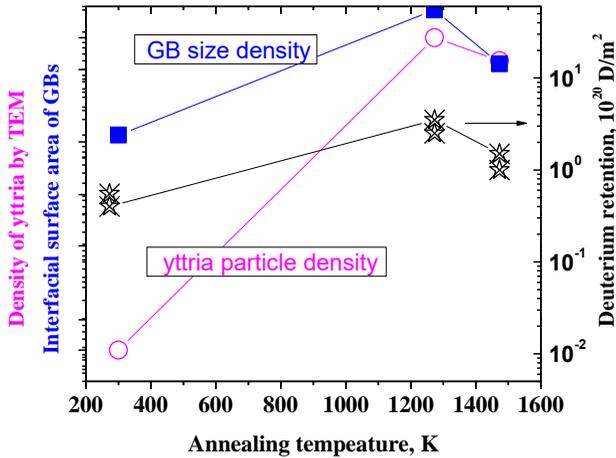


Рис. 1. Накопление дейтерия в W-Cr-Y сплавах и измерение плотности границ зерен и иттриевых частиц как функция температуры отжига. Облучение дейтерием было при следующих условиях: энергия ионов 670 эВ/D при 470 К до дозы 10^{22} D/m².

Литература

- [1] J.W. Coenen, S. Antusch, M. Aumann, *et al.*, Materials for DEMO and reactor applications-boundary conditions and new concepts, Phys. Scr., 2016 (T167) (2016), p. 014002
- [2] F. Koch, S. Köppl, H. Bolt, Self passivating W-based alloys as plasma-facing material J. Nucl. Mater. 386–388 (2009) 572-574
- [3] J. Roth et al., ‘Tritium inventory in ITER plasma-facing materials and tritium removal procedures’ Plasma Physics and Controlled Fusion. 08/2008; 50(10):103001

О КОНКУРЕНЦИИ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В ВОЛЬФРАМЕ

Вопрос о накопления водорода и, в частности, трития в стенке термоядерного реактора является серьезной проблемой [1]. Достоверных экспериментальных данных о процессах, приводящих к преимущественному накоплению какого-либо изотопа водорода в материалах первой стенки нет. Интерес к вопросу о возможной конкуренции изотопов водорода очевиден. Однако, в литературе проблема рассматривается на уровне феноменологических предположений. Для случая моноизотопного водорода в вольфраме термодинамический подход развит в работах [2,3]. Термодинамика для разных изотопов водорода ранее в литературе не рассматривалась.

В данной работе впервые в рамках термодинамического подхода рассмотрен вопрос о конкуренции различных изотопов за расположение в ловушках вакансионного типа в матрице вольфрама. Для простоты, рассматривается случай двух изотопов водорода – протия и трития. Методом теории функционала плотности получены значения свободной энергии системы (включая соответствующие фононные вклады), состоящей из атомов вольфрама с вакансиями и изотопов водорода, внедренных в вакансии и междоузлия.

Зависимость от изотопного состава проявляется в отличии энергий нулевых колебаний и фононной части вклада в свободную энергию Гельмгольца для различных конфигураций. Учитывается вклад в свободную энергию от конфигурационной энтропии. Условие термодинамического равновесия при заданной температуре и концентрации изотопов, приводит к системе нелинейных уравнений, определяющих температурную зависимость концентраций вакансий и их заселенности различными изотопами водорода, а также концентраций изотопов в междоузельном положении. Некоторые результаты решения этой системы показаны на рис. 1. Отметим, что в интервале температур 400-600 К термодинамически выгоден захват в вакансии атомов протия, обладающих более высокими частотами колебаний по сравнению с атомами трития, т.к. их колебательная энергия будет меньше, чем в междоузельном положении. С другой стороны, это соответствует большей концентрации атомов трития в междоузельном положении.

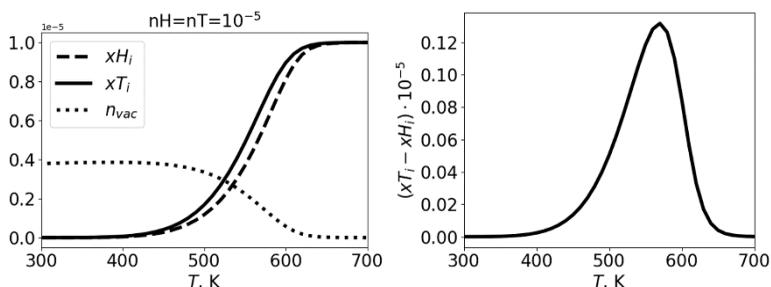


Рис. 1. Температурная зависимость: слева – концентраций междуузельных атомов изотопов (сплошная кривая – тритий, пунктирная кривая – протий) и общего количества вакансионных ловушек (точечная кривая); справа – относительная разница концентраций трития и протия в междуузельном положении.

Выводы: Спектр колебаний изотопов водорода в вакансии соответствует меньшим частотам, чем в междуузельном положении.

Отношение частот колебаний атомов в междуузельном положении для протия к тритию порядка корня из отношения масс изотопов, т.е. энергия колебаний атомов протия больше, чем энергия колебаний трития.

Частоты колебаний атомов в вакансии возрастают (≤ 1.5 раз) при увеличении числа атомов в вакансии, т.е. потенциальная яма для колебаний этих атомов формируется, в том числе, соседними атомами водорода, захваченными в вакансию. С увеличением числа атомов в ловушке относительное возрастание средней частоты колебаний слабо зависит от типа изотопов.

В интервале температур 400-600 К термодинамически выгоден захват в вакансии атомов протия, обладающих более высокими частотами колебаний по сравнению с атомами трития, т.к. их колебательная энергия будет меньше, чем в междуузельном положении. С другой стороны, это соответствует большей концентрации атомов трития в междуузельном положении.

Литература

- [1] J. Roth, et al., J. Nucl. Mater. 390–391 (2009) 1–9
- [2] A. Widdowson, et al., Phys. Scr. T171 (2020), 014051,
- [3] N. Fernandez, et al. Acta Materialia 94 (2015) 307–318
- [4] K. Ohsawa, et al. J. Nucl. Mater. 458 (2015) 187–197
- [5] P. Giannozzi, et.al. J.Phys.: Cond. Mat. 29, 465901 (2017).
- [6] K. Ohsawa, et.al. Phys. Rev. B 85, 094102

А.В. ГОЛУБЕВА^{1*}, Т.А. ШИШКОВА¹, А.П. ПЕРСИАНОВА¹, Н.О. СТЕПАНОВ¹, А.Е. АЛЁШИН², Д.А. КОЗЛОВ¹, Д.И. ЧЕРКЕЗ¹, И.Ю. ЛИТОВЧЕНКО³, В.М. ЧЕРНОВ^{1,4}

¹НИЦ «Курчатовский институт»

²НИЯУ МИФИ, Москва

³ИФПМ СО РАН, Томск

⁴ВНИИИМ им. А.А. Бочвара, Москва

*golubeva_av@nrcki.ru

ЗАХВАТ И ПРОНИКНОВЕНИЕ ДЕЙТЕРИЯ СКВОЗЬ МАЛОАКТИВИРУЕМУЮ АУСТЕНИТНУЮ ХРОМОМАНГАНЦЕВУЮ СТАЛЬ, ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Материал вакуумной камеры термоядерного реактора ИТЭР – аустенитная никелевая сталь SS316L-IG. Недостаток сталей этого класса – высокая активация и длительный спад наведённой активности после облучения нейтронами. До недавних пор в качестве материалов камер термоядерных реакторов следующих поколений рассматривали в основном малоактивируемые ферритно-мартенситные стали. Основным недостатком этих материалов заключается в их магнитных свойствах, что может создать сложности при их использовании в установках с сильным магнитным полем.

Новая малоактивируемая хромоманганцевая сталь (МААХМС) [1] была недавно разработана как потенциальный конструкционный материал ядерных и термоядерных установок.

Объектом исследования данной работы были образцы МААХМС плавки №4.

При исследовании захвата часть образцов была облучена дейтериевой плазмой при температуре 200 °С до дозы 10^{25} D/m², вытягивающий потенциал составлял 100 эВ. Часть образцов выдерживали в газообразном дейтерии при давлении 5 атмосфер и при той же температуре в течение 24 часов. Захват дейтерия в МААХМС был исследован методом термодесорбционной спектроскопии. При облучении плазмой образцы стали МААХМС захватывают в 20 раз большее количество дейтерия, чем образцы малоактивируемой ферритно-мартенситной стали ЭК-181. При выдержке в газообразном дейтерии образцы МААХМС и ЭК-181 захватывали одинаковое количество дейтерия.

Проникновение дейтерия сквозь мембрану из МААХМС исследовали при давлениях над входной поверхностью 10 – 500 мбар и температурах 250 –

350 °С. По проведённым оценкам, коэффициент диффузии дейтерия в стали МААХМС в 20 раз ниже, чем никелевых аустенитных сталях.

Литература

[1] Литовченко И.Ю., Полехина Н.А., Аккузин С.А., Спиридонова К.В. и др., Малоактивируемая хромомарганцевая аустенитная сталь, Патент на изобретение № RU 2821535 С1, Россия, 2024 г

М.М. Цвентух

Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН),

Москва

elley@list.ru, mmtsv@lebedev.ru

ЛАВИНЫ ВЗРЫВОВ НАНОФРАГМЕНТОВ ВОЛЬФРАМОВЫХ НАНОВОЛОКОН В СЛОЯХ W FUZZ

При взаимодействии плазмы с поверхностью происходит развитие рельефа, в частности, образование наноструктуры из вольфрамовых нановолокон (W fuzz) [1-2]. Нановолокна содержат большое количество гелия [3], из-за чего их проводимость существенно падает. Присутствие таких слоев на поверхностях первой стенки термоядерных установок облегчает зажигание самостоятельных электрических разрядов, когда металлическая плазма образуется из нановолокон электрическим взрывом протекающим эмиссионным током [4-7].

На основе результатов численного моделирования [8-10] и экспериментов [11] сформулирована модель "лавины" взрывов нановолокон, обеспечивающих наблюдаемые параметры (средняя плотность тока), в которых "взаимодействие" между взрывающимися протекающим током нановолокнами происходит через поток энергии переносимый газом (гелием) быстро высвобождающимся из нановолокна при пикосекундном нагреве [12].

Для определения проводимости σ или электрического сопротивления

$$\rho = 1/\sigma = m_e/n_e e^2 \times \tau$$

требуется знать частоту рассеяния электронов на фонах и дефектах $\nu = 1 / \tau$. В случае нанопузырей гелия в вольфраме в W fuzz наноструктуре пространственное распределение пузырей и распределение их по размеру было рассчитано методом молекулярной динамики. Показано, что при различной энергии падающих ионов общий вид глубины внедрения отличается - при больших энергиях распределение более плоское и распространяется глубже, но средняя концентрация пузырей и их радиус примерно постоянны. Они составили соответственно 10^{20} см^{-3} и 0.3 нм. Это дает возможность вычислить частоту столкновений электронов с нанопузырями

$$v_1 = n v_F \sigma,$$

где v_F - средняя скорость Ферми в вольфраме ($v_F = 9.71 \times 10^7$ cm/s [13]), а $\sigma = 4\pi r^2$ - сечение рассеяния электронной волны на потенциальном горбе радиуса r [14]. При этом в [13] были *ab initio* вычислены удобные величины

$$\tau\rho = m_e/n_e e^2$$

для ряда металлов (для вольфрама $\tau\rho = m_e/n_e e^2 = 8.44e-20$ Ohm cm s), которые дают возможность определить базовую частоту рассеяния электронов при нормальных условиях (при 300 K, $\rho_0 = 5.28 \mu\Omega$ cm) $\nu_0 = 1/(16$ фс) = $6.25e13$ c⁻¹.

Величина частоты рассеяния

$$v_1 = n v_F \sigma = 1.1 \times 10^{14} \text{ s}^{-1},$$

и соответствующее сопротивление

$$\rho_1 = \tau\rho \times (\nu_0 + \nu_1) = 14.56 \mu\Omega \text{ cm},$$

что несколько выше ρ_0 . Ввиду конечных вычислительных мощностей в расчетах использовалась сниженная доза облучения ($\Phi_0 = 2 \times 10^{15}$ cm⁻²) по сравнению с экспериментальной ($\Phi = 8.7 \times 10^{16}$ cm⁻² [3]). Был предложен скейлинг частоты по дозе. Верхняя граница может быть получена при $\sigma = \text{const}$, тогда концентрация (и частота) просто линейно растет с дозой $n = \text{const} * \Phi$. Нижняя граница - соответствует $n = \text{const}$ и росту размера пузырей как $\sigma^{2/3} = \text{const} * \Phi$.

Возьмем простое среднее, тогда

$$\nu_2 = \nu_1 \times [(\Phi/\Phi_0)^{2/3} + \Phi/\Phi_0]/2 = 3.1 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$$

И сопротивление одного нановолокна

$$\rho_2 = \tau\rho \times (\nu_0 + \nu_2) = 0.265 \text{ m}\Omega \text{ cm}$$

Учитывая объемную пористость $\eta \sim 1/20$ [2] можно получить оценку роста частоты для слоя нановолокон

$$\nu_3 = \nu_2 \eta^{-2/3}$$

Тогда сопротивление составит

$$\rho_3 = \tau\rho \times (v_0 + v_3) = 1.92 \text{ m}\Omega \text{ cm}$$

Соответствующее значение теплопроводности

$$\lambda_3 = LT/\rho_3 = 3.8 \text{ мВт см}^{-1} \text{ К}^{-1}$$

хорошо согласуется с измеренным диапазоном $2.5 - 4.5 \text{ мВт см}^{-1} \text{ К}^{-1}$ [15].

Рост сопротивления с температурой может быть аппроксимирован как

$$\rho_T = \rho_0 \times (T/300 \text{ К})^{4/3}$$

Тогда итоговые выражения для сопротивления нановолокна и слоя нановолокон можно записать как $\rho_2 + \rho_T$ и $\rho_3 + \rho_T$ соответственно. Отметим, что ρ_T достигает уровня ρ_2 при температуре 5.6 кК и уровня ρ_3 при температуре 25 кК – соответствующей переходу в плазменное состояние.

На основе данных оценок проводимости, учитывающих рассеяние электронов на ансамбле нанопузырьков гелия, рассмотрена динамика выделения джоулевой энергии в вольфрамовых нановолокнах, заполненных гелием. Было получено минимальное значение плотности тока, соответствующее преобладанию джоулева нагрева над охлаждением за счет теплопроводности. И в случае ансамблей нанопроволок микронного размера, образующих катодное пятно, или для одиночной нанопроволоки, минимальное значение составляло $\sim 10 \text{ МА/см}^2$.

Для макроскопического пятна это значение согласуется с экспериментальными наблюдениями [11]. Продолжительность взрывного перегрева ансамбля нанопроволок (катодного пятна) будет составлять сотни наносекунд. Было показано, что время перегрева одиночной нанопроволоки, заполненной гелием, должно составлять менее $\sim 10 \text{ пс}$ – быстрее, чем время взрыва нанопузырей [9-10] – «отжига дефектов» нанопроволоки. Соответствующая плотность тока составляет около 1 ГА/см^2 . Это обеспечивает выделение энергии примерно в 100 ТВт/см^3 .

Быстрый (10 пс) взрыв нанопроволоки приводит к массивному выделению гелия, поток которого к соседней нанопроволоке может обеспечить быструю передачу энергии (сравнимой со значением

100 ТВт/см³), способствующей ее взрыву. Следовательно, взрывающиеся нанопроволоки могут "взаимодействовать" посредством больших потоков He, массивованно выделяющихся из них, обеспечивая лавинообразное умножение взрывов.

Гидродинамическое время образования нанокпель и взрывающихся наноперешейков из оставшегося вольфрама также измеряется пикосекундами. Это характерное время также связано с процессом электрон-фононной релаксации, когда в неидеальной плазме формируется зарядовое состояние, наблюдаемое экспериментально.

Работа поддержана РФФ, грант № 22-12-00274.

- [1] Shin Kajita *et al* 2009 *Nucl. Fusion* **49** 095005
- [2] D. Nishijima, M. Baldwin, R. Doerner, J. Yu, 2011 *J. Nucl. Mater.* **415(1)** S96
- [3] Yu. Gasparyan, V. Efimov, and K. Bystrov, 2016 *Nucl. Fusion* **56**, 054002.
- [4] Shin Kajita, Shuichi Takamura and Noriyasu Ohno 2009 *Nucl. Fusion* **49** 032002
- [5] M. Tokitani, S. Kajita, S. Masuzaki, Y. Hirahata, N. Ohno, T. Tanabe and LHD Experiment Group 2011 *Nucl. Fusion* **51** 102001
- [6] Kajita S., Noiri Y., Ohno N. 2015 *Phys. Scr.* **90** 095604
- [7] Rongshi Zhang, *et al* 2022 *Nuclear Materials and Energy* **31** 101178
- [8] Tsventoukh M.M., Kulagin V.V. 2024 *Phys. Plasmas* **31** 092509
<https://pubs.aip.org/aip/pop/article/31/9/092509/3313710/Impact-of-helium-nanobubbles-on-tungsten-fuzz>
- [9] Кулагин В.В., Цвентух М.М., 2024 *ЖЭТФ* **165** 742
- [10] Kulagin and Tsventoukh "Bursting of helium bubbles in tungsten due to helium implantation" *Journal of Nuclear Materials submitted*
- [11] Kaziev *et al* "Characterization of individual spontaneous arcs on fuzzy tungsten surfaces irradiated in a radiofrequency helium plasma" *Physics of Plasmas submitted*
- [12] Tsventoukh "Avalanches of explosions of helium-filled tungsten nanowires in plasma-surface interactions" *Physics of Plasmas submitted*
- [13] D. Gall 2016 *J. Appl. Phys.* **119** 085101
- [14] Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. 1976 *Квантовая механика*, т. 3, с. 623
- [15] S. Kajita *et al* 2023 30th *ISDEIV Okinawa Japan pp.* 526-528

О.С. МЕДВЕДЕВ^{1,2}, Е.В. ШУБИНА^{1,3}, А.Г. РАЗДОБАРИН¹, М.В. ГРИШАЕВ², Д.И. ЕЛЕЦ^{1,2}, И.В. МИРОШНИКОВ¹, Ю.М. ГАСПАРЯН²

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

³Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург

*o.medvedev@mail.ioffe.ru

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В МАТЕРИАЛАХ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТОКАМАКА МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ПЕННИНГОВСКОГО РАЗРЯДА

В термоядерных установках, таких как ITER, предусмотрены режимы работы с использованием в качестве топлива дейтерий-тритиевой (D-T) смеси. Изотопы водорода имеют свойство накапливаться в контактирующих с плазмой конструкционных материалах термоядерных установок – первой стенке и диверторе. Захват термоядерного топлива приводит к следующим негативным эффектам: 1) ограниченный срок эксплуатации реактора, связанный с накоплением радиоактивного трития; 2) возможный выход изотопов из стенок во время разряда, что приводит к нарушению соотношения компонентов топлива; 3) низкая экономическая эффективность [1, 2].

Масс-спектрометрия является универсальным методом измерения концентрации компонентов газовой среды. Однако для осуществления точного количественного анализа необходимо проводить калибровку для каждой отслеживаемой массы. Чувствительность детектирующей системы зависит от характеристик вакуумной системы и неодинакова для разных химических соединений.

Эмиссионная спектроскопия разряда Пеннинга заключается в анализе интенсивности линий исследуемых химических элементов при возбуждении нейтрального газа. Изменение интенсивности линейно зависит от концентрации элементов в газовой среде [2, 3]. Спектральное положение линий α -серии изотопов водорода ($H\alpha$ – 656.27 нм, $D\alpha$ – 656.11 нм, $T\alpha$ – 656.03 нм) предъявляет требование к разрешающей способности спектрометров не хуже, чем 0.1 Å. Использование ячейки Пеннинга при остаточном давлении газа 10^{-5} – 10^{-4} Па приводит к низкой интенсивности регистрируемых линий изотопов водорода, поэтому для регистрации сигнала необходима высокая светосила спектрометра и высокочувствительные детекторы на основе EMCCD, ICCD, CMOS. Преимуществами метода оптической спектроскопии разряда Пеннинга является возможность

регистрации He, как продукта D-T реакции, возможность работы в диапазоне давлений 10^{-5} – 10^{-1} Па [4], регистрация изотопов водорода вне зависимости от химического соединения (HD, HDO, CxDu и др.) [5].

Для определения оптической чувствительности системы к потоку дейтерия была проведена калибровка сигнала при напуске чистого дейтерия в вакуумную камеру с помощью системы газонапуска. В процессе калибровки абсолютные значения потоков газа измерялись по калиброванным данным квадрупольного масс-спектрометра (QMS). Полный диапазон потоков, используемых при калибровке, определялся характеристиками QMS и системой газонапуска и составлял от $\sim 2 \cdot 10^{17}$ с⁻¹ при давлении в камере $1.8 \cdot 10^{-3}$ Па до $6 \cdot 10^{17}$ с⁻¹ при давлении $5.6 \cdot 10^{-3}$ Па. В текущей конфигурации экспериментального стенда надежно детектируемым потоком дейтерия в пеннинговской ячейки является значение ~ 2 – $5 \cdot 10^{16}$ с⁻¹.

Далее был проведен эксперимент по анализу смеси газов (6 компонентная газовая смесь D2 – 10%, H2 – 10%, CH4 – 10%, CO2 – 5%, N2 – 10%, Ar – 10 %) для проверки предположения, что оптическая спектроскопия разряда Пеннинга позволяет регистрировать изотопы водорода вне зависимости от химического соединения. Методами квадрупольной масс-спектрометрии и оптической спектроскопии необходимо было показать, что количество атомов протия к атомам дейтерия будет составлять 3. В данном эксперименте с помощью игольчатого натекателя в вакуумной камере устанавливалось несколько значений давления. В диапазоне давлений $6 \cdot 10^{-4}$ – $9 \cdot 10^{-3}$ Па фиксировался сигнал от QMS и оптический сигнал от ячейки Пеннинга. При давлениях свыше $1 \cdot 10^{-2}$ Па записывались данные только с ячейки Пеннинга. При обработке оптических спектров учитывались различные значения сечения эмиссии H α , CH α и D α , в случае QMS данных учитывалась различная чувствительность к различным компонентам газовой смеси. Полученный результат представлен на рис. 1 красными кругами для ячейки Пеннинга, синими звёздами для QMS. Как видно из рис.1 для оптического сигнала в случае низких давлений (до 10^{-3} Па) соотношение линий значительно отличается от ожидаемого значения 3. Что может быть связано с неучтённым эффектом различных вкладов атомной и молекулярной фракций в интенсивность линий. Другая причина расхождения может заключаться в необходимости повышений оптической чувствительности регистрирующей системы при низких давлениях. В случае давления свыше 10^{-2} Па соотношение становится близким к 3, которое присутствует в исходной смеси газов.

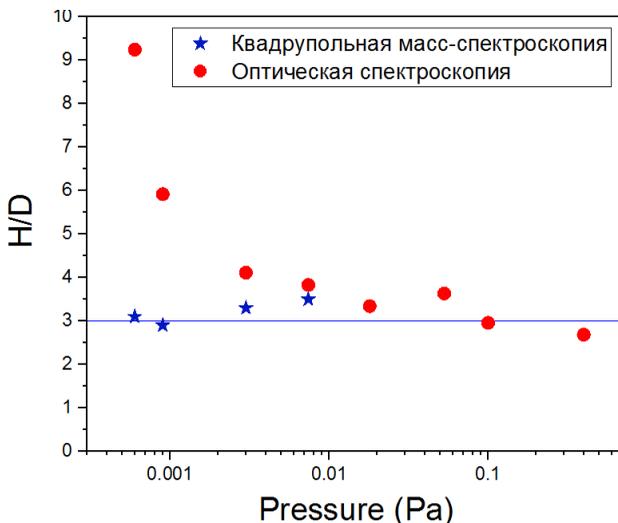


Рисунок 1 – Соотношение атомов протия и дейтерия при различных давлениях в вакуумной камере при натекании смеси газов

Эксперименты по лазерно-индуцированной абляции проводились на образцах углеводородных осадений, полученных при экспонировании вольфрамовой облицовки дивертора в токамаке Глобус-М2 [6]. В данной серии экспериментов изучались слои толщиной 300–600 нм (ЭПС_3) и толщиной 5–6 мкм (ЭПС_5). При абляции углеводородных осадений проводилась регистрация интенсивности линии D_α в ячейки Пеннинга и сигнала 3-ей и 4-ой масс в QMS. В данных экспериментах давление в камере во время абляции углеводородных осадений составляло $\sim 1 \cdot 10^{-2}$ Па (базовое давление в камере $2 \cdot 10^{-4}$ Па), т.е. случай, когда QMS имеет линейный отклик и ячейка Пеннинга имеет оптимальные условия возбуждения атомарных линий H_α и D_α .

В таблице 1 представлены потоки атомов дейтерия, зарегистрированные методом QMS и оптической спектроскопии разряда Пеннинга. Для расчёта потока атомов дейтерия из интенсивности оптического сигнала линии D_α использовался коэффициент $1.74 \cdot 10^{-15}$, полученный при калибровке. Из таблицы видно, что поток дейтерия, вычисленный оптическим методом, превышает в 3–4 раза значение потока по данным QMS при регистрации только 3-ей и 4-ой масс. Одной из потенциальных причин наблюдаемого

различия является возможное выделение дейтерия в составе летучих углеводородов в случае переосаждений в токамаке Глобус-М2 с графитовой первой стенкой. Как следствие, при QMS анализе необходимо отслеживать значительно большее количество масс для более точного количественного анализа, что в свою очередь будет требовать калибровки на каждую регистрируемую массу. Другая причина – неучтённый вклад атомарной и молекулярной фракций в интенсивность сигнала линии H_{α} и D_{α} , регистрируемой в разряде Пеннинга, что связано с их различными сечениями эмиссии [7].

Таблица 1. Поток атомов дейтерия, зарегистрированный методами квадрупольной масс-спектрометрии и оптической спектроскопии разряда Пеннинга.

Метод регистрации	ЭПС 3, с ⁻¹	ЭПС 5, с ⁻¹
QMS	$4.3 \cdot 10^{15}$	$1.3 \cdot 10^{16}$
Ячейка Пеннинга	$2.2 \cdot 10^{16}$	$3.4 \cdot 10^{16}$

Литература

- [1] Zakharov, A. P., Gorodetsky, A. E., Alimov, V. K., Kanashenko, S. L., & Markin, A. V., Journal of nuclear materials, 241, 52-67 (1997). DOI: 10.1016/S0022-3115(97)80030-X
- [2] Hillis, D. L., Morgan, P. D., Ehrenberg, J. K., Groth, M., Stamp, M. F., Von Hellermann, M., Kumar, V. Review of scientific instruments, 70(1), 359-362 (1999). DOI: 10.1063/1.1149301
- [3] Mukhin, E. E., Andrew, P., Anthoine, A. D., Bazhenov, A. N., Barnsley, R., Bukreev, I. M., ... & Walsh, M. J. Nuclear Fusion, 56(3), 036017 (2016). DOI: 10.1088/0029-5515/56/3/036017
- [4] Klepper, C. C., Biewer, T. M., Marcus, C., Andrew, P., Gardner, W. L., Graves, V. B., Hughes, S. Journal of Instrumentation, 12(10), C10012 (2017). DOI: 10.1088/1748-0221/12/10/C10012
- [5] Vizgalov, I. V., Sorokin, I. A., Kurnaev, V. A. In Journal of Physics: Conference Series (2016, September), 747(1), 012020. DOI: 10.1088/1742-6596/747/1/012020
- [6] Gusev, V. K., Alimov, V. K., Arkhipov, I. I., Balden, M., Denisov, E. A., Gorodetsky, A. E., ... & Zalavutdinov, R. K. Journal of nuclear materials, 386, 708-711 (2009). DOI: 10.1016/j.jnucmat.2008.12.291
- [7] Sawada, K., Eriguchi, K., & Fujimoto, T. Journal of applied physics, 73(12), 8122-8125(1993). DOI: <https://doi.org/10.1063/1.353930>

В.Л. БУХОВЕЦ^{1*}, А.Е. ГОРОДЕЦКИЙ¹, С.Ю. РЫБАКОВ¹,
А.В. МАРКИН¹, Т.В. РЫБКИНА¹, Р.Х. ЗАЛАВУТДИНОВ¹,
Д.И. ЕЛЕЦ², А.Г. РАЗДОБАРИН², Е.Е. МУХИН²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук, 119071, г. Москва, Ленинский проспект д. 31, корп. 4

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

[*utqexplorer@gmail.com](mailto:utqexplorer@gmail.com)

ОЧИСТКА МОЛИБДЕНОВЫХ ЗЕРКАЛ В ПЛАЗМЕ РАЗРЯДА В ГЕЛИИ ОТ ПРОДУКТОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ВОДЯНЫМ ПАРОМ

В работе исследовали стойкость макетов зеркал диагностики томсоновского рассеяния в диверторе в условиях аварийных ситуаций в ИТЭР (взаимодействие с парами воды) и возможность восстановления оптических характеристик зеркал после плазменной очистки их поверхностей от продуктов взаимодействия с водяным паром. Выполнен анализ модификации поверхности макетов после выдержки в паре и очистки от осадков. Макеты зеркал были изготовлены из монокристаллов молибдена с гранями Mo(111), Mo(110) и Mo(100), параллельными поверхностями.

Образцы выдерживали в водяном паре при температурах 200–250 °С и времени экспозиции до 4,7 часа.

Анализ структуры, химического состава поверхностных слоев и оптических свойств образцов до и после воздействия пара проводили методами оптической микроскопии (ОМ), дифракции рентгеновских лучей на отражение (ДРЛО), оптической спектрометрии (ОС), рентгеноспектрального микроанализа (РСМА), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

Длительное распыления исходного зеркала и очистку молибденовых зеркал от продуктов взаимодействия с водяным паром, производили в созданной авторами установке комбинированного разряда постоянного тока и тока высокой частоты в гелии при давлении 15 Па, расходе газа 12–13 см³/мин при н. у. и смещении –300 В.

В ходе десятичасового распыления исходного образца было обнаружено, что убыль массы образцов в зависимости от времени представляла собой экспоненциально–линейную зависимость типа:

$$\Delta m(t) = A[1 - \exp(-t/B)] + Ct,$$

где $A/B + C$ – начальная скорость распыления, а C – установившаяся, стационарная скорость распыления. Значения параметров: $A = (50 \pm 10)$ мкг/см^2 , $B = (2.2 \pm 0.8)$ час, стационарная скорость распыления $C = (47 \pm 1)$ мкг/см^2 час.

Общая толщина распыленного слоя за 10 часов составила 0,6 мкм. Рельеф поверхности на изображениях СЭМ изменился по сравнению с исходным. Остались только самые глубокие размытые полировочные канавки и появились неупорядоченные ямки эрозии. Такая картина свидетельствовала о практически полном удалении поверхностного слоя, образовавшегося при полировке монокристалла Мо. Полное отражение от зеркала уменьшилось по сравнению с исходным на 8% в коротковолновой области диапазона 400–1000 нм.

На трех образцах зеркал, подвергшихся воздействию пара, методами РСМА и ДРЛО были обнаружены слои MoO_3 толщиной до 20 нм. В связи с заметным негативным влиянием длительной экспозиции зеркала на его отражательную способность, было выбрано время чистки не более 2 часов – постоянной времени установления стационарного режима распыления. На каждом этапе лицевую, зеркальную сторону образцов, контролировали визуально и в ОМ. По мере продолжения чистки наблюдалось уменьшение загрязнений на поверхности. Тем не менее, на всех трех образцах после чистки в течение 2 часов полное отражение не улучшилось, хотя MoO_3 на поверхности в пределах чувствительности РСМА обнаружено не было.

Возможно, финишный слой полировки легко разрушается как при адсорбции воды при экспозиции в водяном паре, так и при длительном распылении в плазме.

В дальнейшем вместо Не можно использовать разряды в дейтерии или протии, в которых скорость распыления Мо значительно ниже и можно ожидать восстановления оксидов.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке за счет средств госконтракта № Н.4а.241.19.24.1024 от 20.03.2024

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

В.Л. БУХОВЕЦ*, А.Е. ГОРОДЕЦКИЙ, А.В. МАРКИН,
Р.Х. ЗАЛАВУТДИНОВ

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук,
119071, г. Москва, Ленинский проспект д. 31, корп.4
[*utqexplorer@gmail.com](mailto:utqexplorer@gmail.com)*

ДЛИТЕЛЬНОЕ РАСПЫЛЕНИЕ САПФИРА И КВАРЦА ИОНАМИ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА И ГЕЛИЯ

Оптически полированные монокристаллический лейкосапфир (ЛС) и кварцевое стекло КУ–1 (КУ), площадью порядка 10x10 мм и толщиной 2,1 мм (КУ) и 0,7 мм (ЛС) были экспонированы в электрических разрядах в Н₂, D₂ и He.

Цель работы состояла в анализе влияния длительного воздействия разряда на изменение скорости распыления, на топографию поверхностного слоя окон и образование стационарных структур, на изменение микротвердости и возможное изменение светопропускания. Постановка такой задачи может оказаться полезной в микроэлектронике и оптике. В частности, ЛС и КУ могут быть использованы в качестве защитных окон перед первыми зеркалами в оптических диагностиках в ИТЭР [1]. В этом случае чистящий разряд будет применен для удаления пленок бериллия или бора [2], осажденных на окнах в результате распыления первой стенки во время рабочих импульсов. В силу неоднородности осадков, некоторые очищенные участки поверхности окон будут подвергаться длительному воздействию разряда.

Эксперименты проводили на разработанной авторами установке комбинированного разряда постоянного тока (ПТ) и тока высокой частоты (ВЧ). Разряд ПТ осуществлялся в трубке оптического кварца внутренним диаметром 1,95 см между заземленным анодом и полым катодом, подключенным к отрицательному выходу высоковольтного источника. Величину ПТ в экспериментах устанавливали 30 мА. Перпендикулярно оси положительного столба разряда ПТ зажигался асимметричный ВЧ разряд частотой 13,56 МГц, который создавал отрицательное смещение электрода (и диэлектрического образца) и локально увеличивал плазменную плотность. На высоковольтном электроде площадью 2,27 см² крепили исследуемые образцы. Расположенный напротив заземленный электрод имел площадь 10 см². Используемый генератор позволял регулировать величину падающей мощности и, с помощью согласующего устройства, устанавливать

минимальную величину отраженной мощности. При установленной мощности 50 Вт и отраженной мощности 2–3 Вт величина ВЧ смещения образца относительно плазмы составляла –300 В. Давление газов в экспериментах поддерживали 15 Па при расходах 12–13 см³/мин при н. у. Температура электрода не превышала 100 °С.

Под воздействием отрицательного ВЧ смещения положительные ионы из плазмы ускорялись, претерпевая несколько столкновений с нейтральными частицами газов в слое между плазмой и поверхностью образца. В использованных параметрах разряда кинетическая энергия, поступающих из плазмы ионов не превышала 300 эВ, а средняя энергия ионов по нашим оценкам были близки к порогам распыления исследуемых материалов.

Плотности ионного тока на диэлектрический образец при ВЧ смещении непосредственно не измеряли. Для определения величины тока проводили специальные калибровочные эксперименты: образцы металлов Al и Ni распыляли, подавая смещение –300 В от источника ПТ и измеряли величину ионного тока. Затем образцы тех же металлов распыляли при подаче ВЧ смещения –300 В. Полагали, что скорость распыления пропорциональна плотности тока. В результате получили, что плотности ионных токов к поверхности образца в плазме Н₂, D₂ и He были равны 2,64 мА/см² (16,5 × 10¹⁵ ион/см²с), 1,76 мА/см² (11,0 × 10¹⁵ ион/см²с) и 1,17 мА/см² (7,3 × 10¹⁵ ион/см²с) соответственно.

Определение убыли массы образца (на единицу площади) $\Delta m(t) = m(0) - m(t)$ от суммарного времени экспозиции в плазме t осуществляли взвешиванием *ex situ*. Зависимости убыли массы образцов от времени представляли собой экспоненциально–линейные зависимости типа $\Delta m(t) = A[1 - \exp(-t/B)] + Ct$, где $A/B + C$ – начальная скорость распыления, а C – установившаяся, стационарная скорость распыления. Установившиеся скорости распыления были ниже начальных для КУ и ЛС во всех трех газах, а постоянные времени B составляли величину порядка 1 часа.

Часть образцов подвергли анализу методом ТДС. Было обнаружено, что в результате экспозиции КУ и ЛС в течение 12 часов в образцах накопилось достаточно большое количество атомов He и D: He в ЛС – 2,72 × 10¹⁶; He в КУ – 1,39 × 10¹⁶; D₂ в ЛС – 1,12 × 10¹⁶; D₂ в КУ – 0,66 × 10¹⁶ ат./см². Причем в ЛС обоих типов атомов обнаружено больше, чем в КУ, и для каждого типа образцов He оказалось примерно в 2 раза больше, чем D.

Микротвердость (МТ) образцов измеряли до экспозиции в плазме и после экспозиции в течение 12 часов. Согласно измерениям, экспозиция КУ в разряде в гелии привела к катастрофическому понижению МТ при глубине

отпечатка до 1 мкм. Но МТ ЛС изменялась незначительно. При облучении КУ и ЛС ионами протия и дейтерия МТ не претерпевала значительных изменений.

По данным АСМ в облученном гелием кварце наряду с субмикронными выступами и впадинами образовались ямки размером в 1 мкм и более и глубиной до 15–20 нм.

В облученном водородом и гелием ЛС проявилась тенденция к формированию ансамблей выступов и впадин размером 30-100 нм. Среднегеометрическая шероховатость ($R_q = 1-2$ нм) по сравнению с исходной шероховатостью не изменилась.

Несмотря на значительные изменения в топографии и микротвердости КУ светопропускание облученных трех образцов КУ и трех образцов ЛС практически не претерпело изменений в интервале длин волн 400-1000 нм.

Проведенные эксперименты показали, что более прочное окно из ЛС имеет некоторые преимущества перед кварцем КУ в качестве защитного окна в диагностике плазмы методом томсоновского рассеяния света, однако требуются дополнительные эксперименты по совместному одновременному облучению дейтерием и гелием и учет радиационной повреждаемости окон энергичными нейтронами.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122011300053-8: «Поверхностные явления в коллоидно-дисперсных системах, физико-химическая механика, адсорбционные и хроматографические процессы»).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература

- [1] [1] Mukhin E.E., Semenov V.V., Razdobarin A.G., Tolstyakov S.Yu, et al. First Mirrors in ITER: Material Choice and Deposition Prevention/Cleaning Techniques. // Nuclear Fusion. – 2012. – Vol. 52.– ArticleNo.013017.
- [2] Xu W., Sun Z., Maingi R., Zuo G.Z., et al. Active Wall Conditioning Through Boron Powder Injection Compatible ELM Control in EAST. // Nuclear Materials and Energy. – 2023. – Vol. 34. – No3.– Article No.101359.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАХВАТА ГАЗА В ТВЕРДОЕ ТЕЛО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ДЕСОРБЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ

Дистанционный контроль локального содержания газа в конструкционных элементах установки — один из элементов обеспечения радиационной безопасности на термоядерном реакторе ИТЭР [1]. К неразрушающим методам контроля содержания трития в стенке реактора относится метод лазерно-индуцированной десорбционной диагностики, заключающийся в локальном нагреве поверхности обращенных к плазме материалов реактора импульсами лазерного излучения с последующим измерением полного числа десорбированных из мишени атомов [2]. Основной сложностью метода является ограниченность объема диагностических данных, требующая применения методов машинного обучения для обработки данных экспериментальных наблюдений.

В работе представлены результаты по разработке численного инструмента для решения обратной задачи лазерно-индуцированной десорбционной диагностики — восстановления параметров захвата газа в поверхностные слои твердого тела. Обсуждается алгоритм решения задачи, модель десорбции газа для построения синтетической базы данных значений числа десорбированных из мишени атомов под действием импульсов лазерного излучения. С использованием методов машинного обучения построена численная аппроксимация для рассчитанного массива значений. Качество полученной аппроксимации проверено путем решения прямой задачи диагностики — восстановления числа десорбированных атомов при облучении мишени с известными параметрами захвата газа. Показано, что построенная аппроксимация обеспечивает точность решения задачи в пределах 20 %. Построенная аппроксимирующая функция использована также для решения обратной задачи диагностики в эксперименте на токамаке Глобус-М2. Параметры захвата газа в твердом теле восстановлены по известным измерениям числа атомов, десорбированных из мишени под воздействием импульса лазерного излучения с заданными характеристиками. Показано, что восстановленные параметры твердого тела позволяют с высокой точностью аппроксимировать экспериментальные значения, однако

оказываются чувствительны к точности и объему измеренных значений числа десорбированных атомов. Обсуждаются дальнейшие шаги по усовершенствованию предлагаемой методики.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект Государственного задания № 0723-2020-0043.

Литература

- [1] Roth J. et al. Tritium inventory in ITER plasma-facing materials and tritium removal procedures // Plasma Phys. Control. Fusion. 2008. V. 50. P. 103001.
- [2] Zlobinski M. et al. Laser induced desorption as tritium retention diagnostic method in ITER // Fusion Eng. Des. 2011. V. 86. P. 1332-1335.

Е.В. ШУБИНА^{1,3*}, О.С. МЕДВЕДЕВ^{1,2}, М.В. ГРИШАЕВ², А.Г.
РАЗДОБАРИН¹, Д.И. ЕЛЕЦ^{1,2}, И.В. МИРОШНИКОВ¹, С.В. ФИЛИППОВ¹,
Ю.М. ГАСПАРЯН²

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

³Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург
*evsmirnova@mail.ioffe.ru

АНАЛИЗ НАКОПЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В ПЕРВОЙ СТЕНКЕ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2 МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНО- ИНДУЦИРОВАННОЙ АБЛЯЦИИ И ЛАЗЕРНО-ИСКРОВОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Изучение накопления изотопов водорода в первой стенке и диверторе токамака имеет критическое значение для термоядерного синтеза и безопасной эксплуатации реакторов будущего поколения [1, 2]. Тритий, как радиоактивный изотоп водорода, требует особого контроля в процессе работы реактора. Детальное отслеживание накопления трития в системах токамака необходимо, поскольку это влияет на баланс изотопов и эффективность термоядерных реакций.

Современные методы диагностики с использованием лазерного излучения позволяют отслеживать накопление изотопов в реальном времени с высоким пространственным разрешением. Среди *in-situ* технологий анализа накопления изотопов водорода выделяют лазерно-индуцированную десорбцию и лазерно-индуцированную абляцию совместно с масс-спектрометрией (англ. Laser-induced ablation – Quadrupole mass-spectrometry – LIA-QMS). В настоящее время изучается возможность применения метода LIA-QMS для количественного анализа содержания изотопов в облицовке первой стенки [3, 4]. Основное преимущество LIA-QMS – возможность совместного использования с лазерно-искровой эмиссионной спектроскопией (англ. Laser-induced breakdown spectroscopy – LIBS) для качественной и количественной оценки состава аблируемого слоя и профилирования по глубине осадений.

В настоящей работе был выполнен анализ накопления изотопов водорода в углеводородных осадениях на углеродных и вольфрамовых тайлах дивертора токамака Глобус-М2 методами LIA-QMS и LIBS. Для проведения исследования были совмещены оптические системы ввода излучения и регистрации оптического сигнала от лазерной искры (рис. 1).

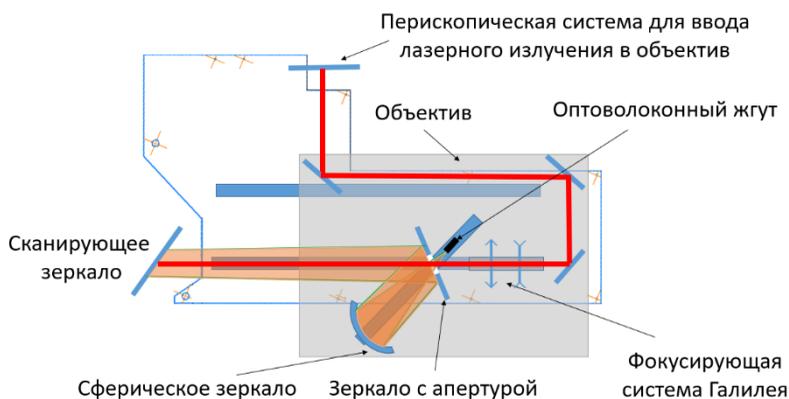


Рисунок 1 – Схематическое изображение оптической системы ввода лазерного излучения и сбора света при совмещении методов LIA-QMS и LIBS

Система ввода излучения состояла из лазерного источника, фокусирующей системы Галилея, поворотного и сканирующего зеркал. В качестве источника лазерного излучения использовался импульсный Nd:YAG-лазер с длиной волны излучения 1064 нм, энергией в импульсе 0.18 Дж и частотой импульсов 10 Гц, плотность энергии на поверхности образца составляла ~ 25 Дж/см². При исследовании сканировалась область 1x2 см², где каждый лазерный импульс приходился на новую точку.

Система регистрации оптического сигнала от лазерной искры состоит из двух зеркал – плоского зеркала с апертурой в центре и сферического зеркала с фокусным расстоянием 228 мм. Оптическая схема объектива спроектирована таким образом, чтобы наиболее эффективно осуществить передачу излучения лазерной искры с площади 10x10 мм² в семижильное оптоволокно, в котором волноводные жилы диаметром 400 мкм выстроены в круг. Сигнал регистрировался двумя спектрометрами – спектрометром высокого разрешения SPT-DDHR4 с матричным детектором EMCCD для разрешения линий Na и Ca и широкодиапазонным спектрометром AvaSpec-3648-USB2 с линейным CCD детектором.

Для анализа остаточных газов на Глобус-M2 используется квадрупольный масс-спектрометр Pfeifer PrismaPlus QMG220, который также использовался в экспериментах LIA-QMS. Для количественного анализа методом LIA-QMS предварительно была изготовлена течь с диапазоном потоков дейтерия $5 \cdot 10^{15} - 10^{18}$ с⁻¹, который может изменяться за счёт давления в буферном объёме течи.

Калибровка QMS проводилась до начала экспериментов LIA-QMS/LIBS при двух давлениях в буферном объёме – 1.5 Торр и 3 Торр, которые соответствуют потокам дейтерия $1.8 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$ и $3.6 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$.

На рисунке 2 представлен типичный вид трендов 3 и 4 масс рис. 2 (Б) и оптических спектров (рис. 2 (В, Г)), которые представляют собой набор спектров, снятый в каждой отдельной точке сканирования по триггеру от лазера для вольфрамового тайла из 5 ряда дивертора (рис. 2 (А)) [5].

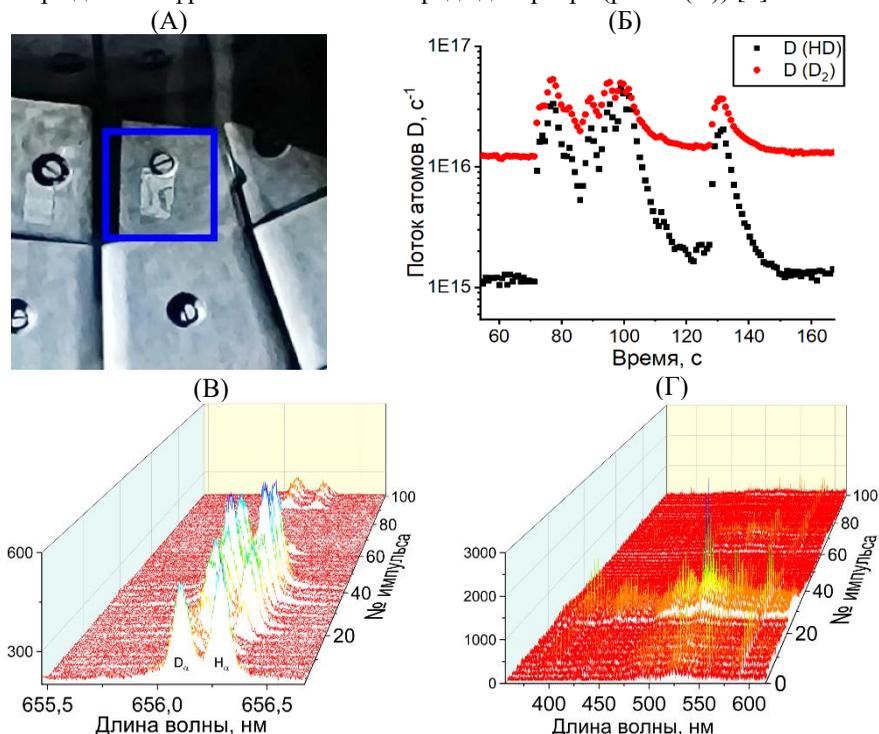


Рисунок 2 – Экспериментальные результаты масс-спектрометрии (Б) и оптической спектроскопии (В, Г) исследованной области вольфрамового тайла (А)

На обзорных оптических спектрах (рис. 2 (Г)) были идентифицированы линии вольфрама и углерода, при этом существенное увеличение сигнала в диапазоне 30–40 импульсов вызвано аблорированием материала винта (Mo), фиксирующего тайл к вакуумной камере. Последующее отсутствие сигнала на масс-трендах и оптических спектрах связано с повторным испарением уже

облучённой области без углеводородных осадений. На спектрометре высокого разрешения полученного сигнала от одиночных лазерных импульсов достаточно для чёткой идентификации линий $\text{H}\alpha$ и $\text{D}\alpha$ и их отношения. Это позволит в будущем развить метод Calibration-free-LIBS (CF-LIBS) для определения концентрации изотопов водорода в осадениях на тайлах токамака. Количественный анализ методом LIA-QMS показал, что поверхностная плотность атомов дейтерия составила $5.6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Данное значение, согласно результатам работы [3], свидетельствует о толщине осадений порядка 1000 нм (в приближении схожей структуры осадений и отсутствия изотопного обмена).

В работе проведен анализ накопления изотопов водорода в тайлах дивертора токамака Глобус-М2 методами LIA-QMS и LIBS. Разработанная оптическая система позволяет регистрировать линии $\text{H}\alpha$ и $\text{D}\alpha$ на спектрометре высокого разрешения и спектральные линии металлов на широкодиапазонном спектрометре. Дальнейшее развитие диагностики накопления изотопов водорода в токамаке Глобус-М2 предполагает реализацию метода CF-LIBS для количественного анализа при совмещении с методом LIA-QMS.

Литература

- [1] Schlußner D. et al. Hydrogen isotope inventories in the ASDEX Upgrade tungsten coated divertor tiles //Journal of nuclear materials. – 1999. – Т. 266. – С. 1296-1302.
- [2] Hirohata Y. et al. Hydrogen isotopes retention in JT-60U //Journal of nuclear materials. – 2007. – Т. 363. – С. 854-861.
- [3] Medvedev O. S. et al. LIA-QMS method for the quantity analysis of the hydrogen isotopes retention in first-wall components of Globus-M2 tokamak //Nuclear Materials and Energy. – 2024. – Т. 41. – С. 101829.
- [4] Yehia-Alexe S. A. et al. Considerations on hydrogen isotopes release from thin films by laser induced ablation and laser induced desorption techniques //Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. – 2023. – Т. 208. – С. 106774.
- [5] Gusev V. K. et al. Recrystallized graphite behavior as the first wall material in Globus-M spherical tokamak //Journal of nuclear materials. – 2009. – Т. 386. – С. 708-711.

М.В. ГРИШАЕВ^{1*}, О.С. МЕДВЕДЕВ^{1,2}, Е.В. ШУБИНА^{1,3},
Н.Е. ЕФИМОВ¹, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ¹, А.Г. РАЗДОБАРИН²,
И.А. НИКИТИН¹

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

² Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург

³ Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург
MVGrishaev@mephi.ru

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ CF-LIBS В ДИАГНОСТИКИ НАКОПЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА

Одним из актуальных направлений исследований в области термоядерной энергетики сегодня является создание методов контроля накопления изотопов водорода в обращенных к плазме элементах. Это обусловлено требованиями безопасной эксплуатации установок, работающих с радиоактивным тритием. Одним из перспективных подходов для решения данной задачи является метод laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS)[1].

В работе проводился LIBS анализ модельных вольфрам-дейтериевых пленок, полученных методом лазерного осаждения на медную подложку и графитовых тайлов экспонированных в токамаке Глобус-М2. Для реализации LIBS использовался лазер LQ529 (Solar LS) Nd:YAG 1064 нм, 450 мДж, 10 Гц с длительностью импульса 12 наносекунд.

Для первичной оценки температуры по эмиссионным спектрам LIBS был использован классический подход, изложенный в статье [2]. Использовался метод графика Больцмана, по наклону которого можно оценить электронную температуру лазерной искры.

Для определения параметров плазмы методом CF-LIBS, критическую роль играет расчет температуры, погрешность которой может быть существенной. Для повышения точности расчета температуры можно использовать метод Саха–Больцмана, при котором линии от атомов и ионов одного и того же элемента включаются в линейную регрессию, что улучшает статистику[3]. Особенностью данного подхода является то, что температура плазмы и электронная плотность должны быть заведомо известны. Электронную плотность может быть оценена независимо, путем измерения параметров линий Da, уширенной за счёт эффекта Штарка [3,4]. В данной работе был использован подход описанный в статье [5] для определения электронной плотности. Для проверки выполнения ЛТР применялся критерий [6] McWhirter. Для приведенных случаев критерий выполняется.

Стендовые эксперименты LIBS в вакууме продемонстрировали низкий

уровень сигнала в данной конфигурации установки (светосильный зеркальный объектив с широкодиапазонным спектрометром AvaSpec-3648-USB2, оснащенный линейным CCD детектором). Для повышения интенсивности в камеру напускался аргон. При давлениях ниже 10 Па Ar анализ спектров затруднителен в силу низкой интенсивности и малого количества линий. С ростом давления увеличивается интенсивность сигнала, в спектре появляются линии, которые не наблюдаются при более низких давлениях, что позволяет повысить точность оценок температуры и концентрации.

Получена оценка температуры и плотности электронов $T=0,9$ эВ и $n_e=6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ соответственно. Для *in vacuo* анализа требуется дальнейшая разработка методов повышения интенсивности и обработки спектров.

Литература

- [1] Maurya G S, Marín-Roldán A, Veis P, Pathak A K and Sen P 2020 A review of the LIBS analysis for the plasma-facing components diagnostics *Journal of Nuclear Materials* **541** 152417
- [2] Ciucci A, Corsi M, Palleschi V, Rastelli S, Salvetti A and Tognoni E 1999 New Procedure for Quantitative Elemental Analysis by Laser-Induced Plasma Spectroscopy *Appl Spectrosc* **53** 960–4
- [3] Tognoni E, Cristoforetti G, Legnaioli S, Palleschi V, Salvetti A, Mueller M, Panne U and Gornushkin I 2007 A numerical study of expected accuracy and precision in Calibration-Free Laser-Induced Breakdown Spectroscopy in the assumption of ideal analytical plasma *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* **62** 1287–302
- [4] El Sherbini A M, Hegazy H and El Sherbini Th M 2006 Measurement of electron density utilizing the Ha-line from laser produced plasma in air *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* **61** 532–9
- [5] Gigosos M A, González M Á and Cardeñoso V 2003 Computer simulated Balmer-alpha, -beta and -gamma Stark line profiles for non-equilibrium plasmas diagnostics *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* **58** 1489–504
- [6] Cristoforetti G, De Giacomo A, Dell’Aglío M, Legnaioli S, Tognoni E, Palleschi V and Omenetto N 2010 Local Thermodynamic Equilibrium in Laser-Induced Breakdown Spectroscopy: Beyond the McWhirter criterion *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* **65** 86–95

И.А. НИКИТИН*, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ, Н.Е. ЕФИМОВ,
М.В. ГРИШАЕВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
** iv.an.nikitin@mail.ru*

АНАЛИЗ АДсорбЦИИ ПРОТИЯ И ДЕЙТЕРИЯ НА МАТЕРИАЛЫ ТЯЖ С ПОМОЩЬЮ ИОННОГО РАССЕЯНИЯ И АТОМОВ ОТДАЧИ

Одним из ключевых вопросов при создании будущих термоядерных установок является взаимодействие плазмы с поверхностью, которое ведёт, в частности, к накоплению изотопов водорода в обращённых к плазме элементах. Существуют строгие ограничения на допустимое количество накопленного трития, что связано с требованиями безопасности. Это приводит к необходимости развития различных методик анализа поверхности.

Спектроскопия рассеяния ионов низких энергий (LEIS, low energy ion scattering) является методикой анализа поверхности, обладающей высокой чувствительностью к составу и структуре первых поверхностных слоёв. При использовании угла рассеяния менее 90° в детектор будут попадать не только рассеянные ионы, но и ионизованная компонента атомов отдачи. Это позволяет применять малоугловую LEIS спектроскопию для анализа адсорбированного водорода [1] или воды [2]. Однако в случае количественного анализа, как, например, в [3], авторы зачастую не учитывают ряд факторов, таких как сечения рассеяния, влияние используемого энергоанализатора, что может приводить к некорректным результатам. Соответственно, требуется совершенствование этого метода анализа поверхности.

LEIS спектроскопия реализована на установке «Большой масс-монохроматор «МИФИ» (рис. 1). Ионы инертных газов или водорода, ускоренные до энергий в диапазоне 1-25 кэВ, могут применяться в качестве первичного пучка. Подробное описание данной установки может быть найдено в [4]. В описываемых в этом докладе экспериментах по исследованию адсорбции водорода применялось охлаждение мишени, для того чтобы увеличить количество адсорбата на поверхности. Кроме того, для изменения угла рассеяния использовалась мишень, помещённая на ввод движения.

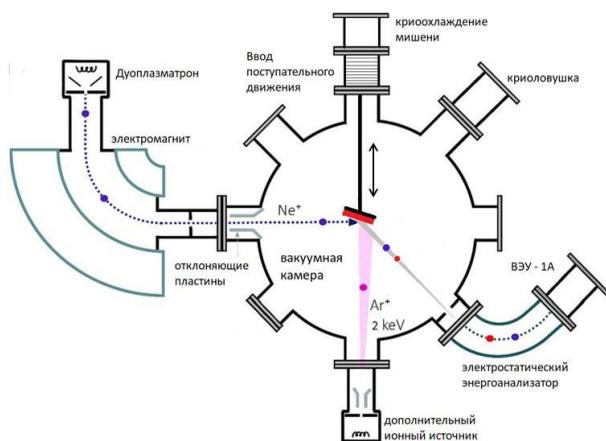


Рисунок 1 – схема установки «Большой масс-монохроматор «МИФИ»

Для демонстрации принципиальной возможности определения концентраций изотопов водорода на поверхности по энергоспектрам LEIS применялось моделирование рассеяния атомов аргона на мишени, покрытой смесью из протия и дейтерия с разными соотношениями этих элементов в коде SDTrimSP [5]. По результатам этого моделирования продемонстрировано, что определение концентраций изотопов водорода по спектрам LEIS возможно и даёт ошибку не более 9%.

В ранее проводившихся на «Большом масс-монохроматоре «МИФИ» экспериментах не удавалось с хорошей повторяемостью получить спектры рассеяния, включающие как протий, так и дейтерий. Для получения таких спектров было применено охлаждение мишени в сочетании с экспозицией образца в парах тяжёлой воды. Такой способ получения спектра применим для нахождения оптимальных условий изучения изотопов водорода на поверхности.

Также на получаемые спектры влияние оказывает геометрия эксперимента. Чтобы исследовать этот фактор, мишень закреплялась на вводе поступательного движения. В роли мишени был выбран поликристаллический полированный вольфрам. Перемещение мишени приводило к изменению угла рассеяния. Его величина определялась по энергии пика выбитого кислорода на спектре отрицательных ионов, так как для него изменение угла рассеяния приводит к наибольшему изменению энергии пика. Полученные спектры для положительных ионов представлены на рис. 1. На данных спектрах наблюдается резкая зависимость соотношения высот пиков рассеяния аргона от вольфрама и выбитого протия от угла

рассеяния. Эта зависимость не соотносится с результатами моделирования рассеяния на аналогичные углы и зависимостью соотношений сечений рассеяния от угла.

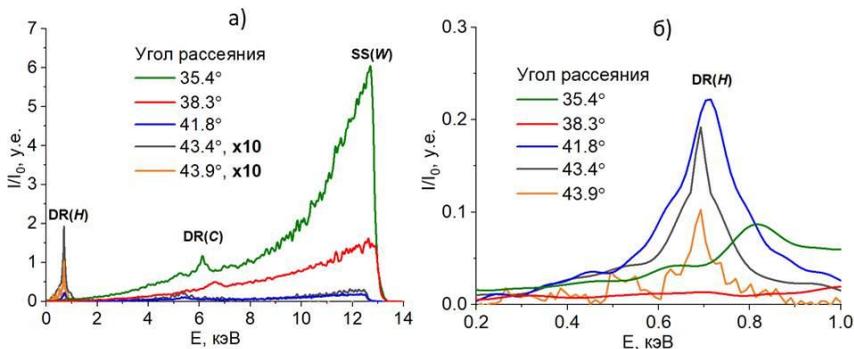


Рисунок 2 – Спектры рассеяния ионов Ar с начальной энергией 14 кэВ от мишени из W , I – ток рассеянных ионов и ионизированные атомы отдачи, I_0 – ток на мишень а) полный спектр, б) участок с пиков протия

В вышеописанных экспериментах движение мишени в направлении держателя (см. рис. 1) приводило к увеличению угла рассеяния. При этом происходило уменьшение угла падения, так как возможность вращения мишени отсутствовала. В связи с этим влияние угла падения на получаемые спектры было рассмотрено отдельно. Для этого расположенная в центре камеры взаимодействия мишень вращалась вокруг своей оси. В данном эксперименте появление пика протия не наблюдалось, что показывает отсутствие связи между наблюдавшимся изменением соотношений амплитуд пиков рассеяния и выбитого протия и углом падения.

Таким образом, в работе с помощью средств численного моделирования показана принципиальная возможность проведения анализа адсорбции изотопов водорода на поверхности с помощью спектроскопии малоуглового рассеяния ионов. Экспериментально продемонстрировано, что чувствительность данной методики к водороду на поверхности вольфрама растёт с увеличением угла рассеяния значительно более резко, чем она должна была бы расти в соответствии с сечениями рассеяния. Причина данного феномена на текущий момент неясна, что требует дальнейшего изучения.

Литература

[1] I. Kambali et al. Applied Surface Science 254 (2008) 4245-4250

- [2] M.H. Mintz, N. Shamir *Applied Surface Science* V. 252 (2005) 633–640
- [3] Z.A. Piazza et al. *J. Phys. Chem.*, 125 (2021) 16086-16096
- [4] D. Bulgadaryan et al. *J. Phys. Conf. Ser.* 748 (2016) 012016
- [5] A. Mutzke et al. *SDTrimSP Version 6.00: IPP report 2019-02* (2019) 91 p

В.А. Иванов, М.А. Терещенко, М.Е. Коныжев, Т.И. Камолова
Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,
г. Москва, e-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

ПОТОКИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ОТРИЦАТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОД В ПЛАЗМЕ

Воздействие плазмы на металлы используется в ряде технологических процессов, включая очистку металлов от поверхностных загрязнений, модификацию структуры поверхностных слоев металлов, а также для формирования прочного микрорельефа на их поверхности. Для стабильной воспроизводимости этих процессов необходимо разработать методы расчета потоков электронов и ионов из плазмы на металл, при различных значениях электрического потенциала металла. В результате баланса потоков плазменных частиц вблизи поверхности электрода происходит возникновение области разделения зарядов и сильного электрического поля, которое приводит к возникновению автоэлектронной и взрывной эмиссии, а также к возбуждению микроплазменных разрядов [1,2]. Воздействие плазмы этих разрядов упрочняет поверхностный слой большинства конструкционных металлов, а также формирует стойкий микрорельеф на поверхности практически всех твердых сплавов [3], применяемых в композитных материалах.

Цель работы состоит в определении основных процессов, формирующих потоки заряженных частиц в плазме на металл, находящийся под отрицательным потенциалом.

Рассматривается двухтемпературная одномерно-неоднородная плазма (температура электронов T_e превышает температуру ионов T_i), взаимодействующая с металлическим электродом, находящимся под отрицательным потенциалом Ψ_0 . При этом в силу большой подвижности электронов по нормали к поверхности металла (ось Ox) будет формироваться область разделения зарядов. Считаем, что поверхность металла располагается в точке $x=0$. Направление скоростей и потоков заряженных частиц от металла в сторону невозмущенной плазмы будем считать положительным, а направление скоростей и потоков частиц к металлу будем считать отрицательными. При этом для простоты, в основном, ограничимся рассмотрением ион-электронной плазмы с зарядами, равными элементарному e , массой ионов m_i и массой электрона m_e . Будем учитывать действие трех

сил: силу $F_e = -e \frac{\partial \Psi}{\partial x}$, действующую на заряженные частицы вследствие существования градиента локального электрического потенциала $\Psi(x)$, силу

$F_g = -\frac{T_e}{n_e} \frac{\partial n_e}{\partial x}$, связанную с градиентом давления электронного компонента

плазмы, и силу, связанную со столкновениями электронов с ионами

$F_{fr} = m_e \cdot \frac{u_e - u_i}{\tau_{ei}}$ (или силы «электрон-ионного трения»), здесь характерное

время τ_{ei} передачи импульса между электронами и ионами

$\tau_{ei} = \frac{3}{4\sqrt{2\pi}} \frac{T_e^{3/2} m_e^{1/2}}{Z_{ef} e^4 n_e \Lambda}$, Λ – кулоновский логарифм, Z_{ef} – средний заряд

иона. Изменение направленной скорости плазменных электронов, реализующееся под действием этих трех сил, определится из выражения:

$$\frac{du_e}{dt} = \frac{\partial u_e}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = u_e \frac{\partial u_e}{\partial x} = -\frac{e}{m_e} \frac{\partial \Psi}{\partial x} - \frac{T_e}{m_e n_e} \frac{\partial n_e}{\partial x} - \frac{u_e - u_i}{\tau_{ei}}. \quad (1)$$

Условие постоянства потока частиц $u_e(x) \frac{\partial n_e(x)}{\partial x} + n_e(x) \frac{\partial u_e(x)}{\partial x} = 0$ в

отсутствие столкновений $\tau_{ei} \rightarrow \infty$ и при $\frac{T_e}{m_e} \gg u_e^2(x)$ дает соотношения:

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{e}{m_e} \frac{\partial \Psi}{\partial x} + \left(\frac{T_e}{m_e} \right) \left(\frac{\partial n_e}{n_e \partial x} \right); \\ \frac{e}{T_e} \frac{\partial \Psi}{\partial x} &= -\frac{\partial}{\partial x} \ln(n_e(x)); \\ n_e(x) &= n_{\infty} \exp\left(-\frac{e\Psi(x)}{T_e} \right) \\ n_e(x=0) &= n_{e0} = n_{\infty} \exp\left(-\frac{e\Psi_0}{T_e} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

Решение (2) дает ненулевое значение плотности электронов на поверхности электрода.

Поток электронов из плазмы на металлический электрод при потенциале Ψ_0 рассчитывается с помощью максвелловского распределения электронов

плазмы при $v_{e\min} = \sqrt{\frac{2e\Psi_0}{m_e}}$:

$$(n_e v_e)_0 = n_{e\infty} \int_{-v_{\min}}^{-\infty} \left(\frac{m_e}{2\pi T_e}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{m_e v^2}{2T_e}\right) v dv; \quad (3)$$

$$(n_e v_e)_0 = -n_{e\infty} \left(\frac{m_e}{2\pi T_e}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{e\Psi_0}{T_e}\right)$$

Так как величина потока электронов на поверхность металла и в невозмущенной плазме должна сохраняться $(n_e u_e)_\infty = (n_e u_e)_0$, то из (3) получаем величину направленной скорости электронов вдали от электрода в области невозмущенной плазмы:

$$u_{e\infty} = -\left(\frac{T_e}{2\pi m_e}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{e\Psi_0}{T_e}\right) \quad (4)$$

В невозмущенной плазме и в плазме вблизи электрода в условиях стационара должно выполняться равенство потока электронов и ионов, тогда получаем следующее соотношение для потока ионов на поверхности электрода $(n_e v_e)_0 = (n_i v_i)_0$. При этом скорость ионов на поверхности электрода будет определяться величиной потенциала Ψ_0 из закона сохранения энергии $\frac{1}{2} m_i v_i^2 = e\Psi_0$, тогда поток ионов на электрод и величина плотности ионов на поверхности составят следующие величины:

$$(n_i v_i)_0 = -n_{i0} \sqrt{\frac{2e\Psi_0}{m_i}} = -n_\infty \left(\frac{T_e}{2\pi m_e}\right) \exp\left(-\frac{e\Psi_0}{T_e}\right)$$

$$n_i(x=0) = n_\infty \left(\frac{m_i T_e}{4\pi m_e e\Psi_0}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{e\Psi_0}{T_e}\right) \quad (5)$$

Из сравнения (2) и (5) видно, что, как правило, вблизи поверхности электрода плотность ионов существенно превосходит плотность электронов (см. данные Таблицы 1):

$$\frac{n_i(x=0)}{n_e(x=0)} = \left(\frac{m_i T_e}{4\pi m_e e \Psi_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Таблица 1. Соотношение плотностей ионов n_{i0} и электронов n_{e0} вблизи поверхности электрода в водородной плазме при различных отношениях $e\Psi_0$ к электронной температуре T_e (6)

П.п.	$\frac{e\Psi_0}{T_e}$	$\frac{n_{i0}}{n_{e0}}$	Примечание
1	0.1	38	Классический случай дебаевского экранирования
2	1	8	Случай модифицированного дебаевского слоя
3	10	3.8	Случай модифицированного дебаевского слоя
4	100	1.2	Случай модифицированного дебаевского слоя

Как показано в [4], при малых значениях параметра $\frac{e\Psi_0}{T_e} \ll 1$ реализуется классическое экранирование потенциала $\Psi(x) = \Psi_0 \exp\left(-\frac{x}{r_D}\right)$ и действует классическая формула расчета электрического поля на поверхности электрода $E_0 = \frac{\Psi_0}{r_D}$, с радиусом Дебая $r_D = \left(\frac{T_e}{4\pi n_e e^2}\right)^{\frac{1}{2}}$, в то время как при значениях $\frac{e\Psi_0}{T_e} > 1$ классическая дебаевская длина должна заменяться на

модифицированное значение $L_D = r_D \left(\frac{e\Psi_0}{2T_e}\right)^{\frac{3}{4}}$, и L_D зависит от $\frac{e\Psi_0}{T_e}$.

Литература

- [1] Месяц Г. А. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. – М.: Наука, 2000.–424с. ISBN 5-02-002507-0
- [2] А. С. Сахаров, В. А. Иванов Автоэлектронная эмиссия как механизм инициирования микроплазменных разрядов на металле в потоке плазмы // Успехи прикладной физики. 2016. Т.4. №2. С.150-166.
- [3] Л.И. Куксенова, В.Г. Лаптева., В.А. Иванов, М.Е. Кобышев Влияние микроплазменной обработки на свойства приповерхностного слоя образцов из конструкционных сплавов // Трение и смазка в машинах и механизмах. №5. 2009. С. 10-16.
- [4] В. А. Иванов Электрическое поле на поверхности погруженного в плазму металлического электрода при большом отрицательном потенциале // Успехи прикладной физики, 2022. Том 10, №4. С.343-350. DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-4-343-350

Н.С. ПОПОВ^{1*}, А.Н. СУЧКОВ¹, В.О. КИРИЛЛОВА¹, М.Ю. ЖАРКОВ², А.В. ВЕРТКОВ²

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

²АО "Ордена Ленина НИКИЭТ им. Н.А. Доллежалея", Москва

*NSPopov@mephi.ru

КОМПОЗИТ ВОЛЬФРАМ-СТАЛЬ (WSS) КАК ОСНОВА ДЛЯ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ СТРУКТУР: СТРУКТУРА И ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Капиллярно-пористые структуры (КПС) – наиболее простой способ создания возобновляемого слоя жидкого металла, который пополняется за счет капиллярной силы из резервуара [1]. Жидкий металл, такой как литий, при контакте с плазмой создает экранирующий слой, снижающий тепловую нагрузку на теплонагруженные элементы конструкции. Основой для КПС является сетка из вольфрамовой проволоки, которая крепится к стальному основанию с каналами охлаждения. Однако теплопроводность стали недостаточна для отведения больших потоков тепла. В работе рассмотрена технология изготовления композитных материалов, которая основана на пропитке вольфрамовых КПС расплавом стали. В качестве армирующей основы, обеспечивающей высокую теплопроводность рассмотрена сетка из вольфрамовой проволоки.

Срягое соединение вольфрама и железа или стали осложнено разницей в КТР и образованием хрупких интерметаллидных фаз [2]. В работе проведены исследования взаимодействия расплавов сталей X13, ЭК-181, AISI 316LN и чистого железа с вольфрамом. Методом ЭДС выявлены химические составы продуктов взаимодействия расплавов с вольфрамом. Изучено смачивание расплавами поверхности вольфрама. На КПС, пропитанных расплавом стали измерена температуропроводность.

По полученным результатам проведено моделирование эксперимент теплового потока релевантного для токамака ТРТ. Результаты моделирования представлены на рисунке 1. Теплопроводность композита на основе вольфрама и матрицы из аустенитной стали 316LN обладает теплопроводностью 48–69 Вт/мК при 100 °С, что позволяет выдерживать потоки до 10 МВт/м² течение 100 секунд.

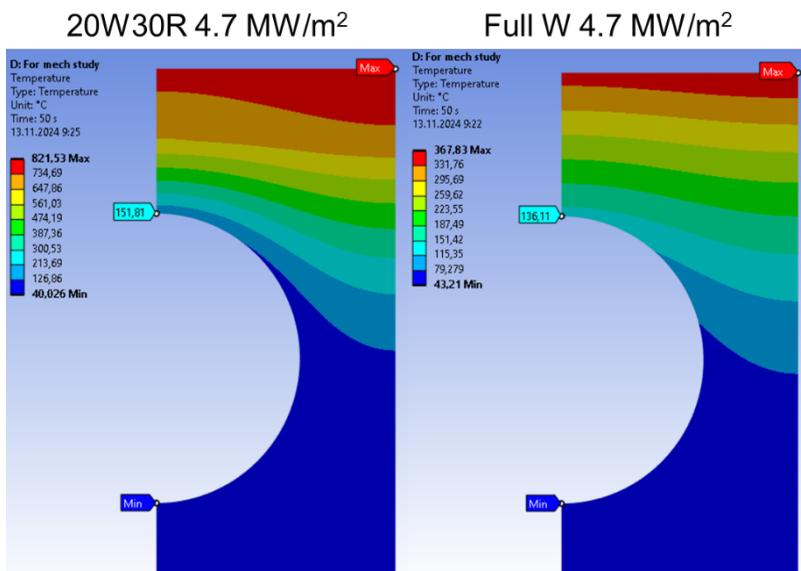


Рисунок 1 – Распределение температур по компоненту обращённому к плазме с использованием композита WSS и чистого W при тепловом потоке 4.7 МВт/м²

Результаты показывают что замена стали на композит перспективна с точки зрения улучшения теплосъёма и предотвращения перегрева жидкого металла. Однако разработанная технология имеет ограничения по максимальным размерам получаемых изделий и, также, не обеспечивает оптимальную бездефектную структуру композита.

Литература

- [1] I.E. Lyublinski, A. V. Vertkov, M.Y. Zharkov, O.N. Sevryukov, P.S. Dzhumaev, V.A. Shumskiy, A.A. Ivannikov, Selection of materials for tokamak plasma facing elements based on a liquid tin capillary pore system, Journal of Physics: Conference Series. 748 (2016).
- [2] Paúl A. et al. Phase Transformation and Structural Studies of EUROFER RAFM Alloy // MSF. 2006. Vol. 514–516. P. 500–504.

Т.Л. БОБРОВСКИЙ*, А.Ф. ГУРБИЧ, М.В. БОХОВКО

АО «ГНЦ РФ - ФЭИ», Обнинск

**timofeybobrovskiy@gmail.com*

ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА СОДЕРЖАНИЯ ЛЕГКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОВЕРХНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Исследования материалов первой стенки термоядерных установок при помощи ускоренных ионных пучков проводятся в ведущих лабораториях мира, став одним из основных методов исследований в этом направлении [1]. Это обусловлено возможностью этих методов давать количественные результаты без образцов сравнения, их точности и изотопной чувствительности. Разработанные методики позволяют извлекать информацию о содержании и профиле распределения примесных атомов в поверхностных слоях образцов из спектров обратного рассеяния ускоренных ионов, спектров продуктов реакций, спектров ядер отдачи, а также возбуждаемого ускоренным ионным пучком гамма и рентгеновского излучения. Все эти методики реализованы и применяются для анализа различных материалов в АО «ГНЦ РФ-ФЭИ». В докладе представлены примеры анализа содержания изотопов водорода, гелия, бериллия, бора и углерода в поверхности конструкционных материалов. Обсуждаются достигнутая чувствительность и точность анализа, а также эффективность ядерно-физических методов для анализа материалов, используемых в термоядерных исследованиях.

Литература

- [1] M. Rubel et al. The role and application of ion beam analysis for studies of plasma-facing components in controlled fusion devices, Nucl. Instr. Meth. B371 (2016) 4

ОСОБЕННОСТИ ЗАХВАТА И УДЕРЖАНИЯ ВОДОРОДА В СОЕДИНЕНИЯХ, ОБРАЗОВАННЫХ ПРИ ОСАЖДЕНИИ НА ПОВЕРХНОСТЬ МЕТАЛЛОВ АТОМОВ АЛЮМИНИЯ И БОРА, РАСПЫЛЕННЫХ ИОНАМИ АРГОНОВОЙ ПЛАЗМЫ С СООТВЕТСТВУЮЩИХ МИШЕНЕЙ

Вопросы накопления и удержания водорода в материалах при осаждении на них поверхностных слоев являются актуальными для термоядерных исследований и плазменных технологий. Ранее было показано [1], что при осаждении алюминия или бериллия на вольфрам на его поверхности образуется слой интерметаллида, в который захватывается большое количество водорода. Выход водорода из интерметаллида происходил при температурах, значительно больших температуры десорбции водорода из соответствующих металлов. В данной работе было предпринято термодесорбционное исследование захвата и удержания водорода в поверхностных соединениях, образованных при осаждении на вольфрам, молибден, железо, никель и сталь 12Х18Н10Т атомов алюминия и бора, распыленных с соответствующих мишеней ионами аргоновой плазмы разряда с накальным катодом.

Эксперименты показали, что во многих закономерностях захвата и удержания водорода, проявляемых при формировании поверхностных слоев на металлах, наблюдаются общие черты. В частности, в спектрах термодесорбции водорода, измеренных после осаждения алюминия и бора, появляются максимумы, не характерные ни для этих материалов, ни для материала подложки. Это свидетельствует о том, что на поверхности металлов образуются их химические соединения с атомами алюминия и бора (алюминиды и бориды), удерживающие в себе водород. Максимумы термодесорбции водорода из алюминидов и боридов металлов в большинстве случаев расположены при более высоких температурах, по сравнению с температурами десорбции водорода из алюминия, бора и материала подложки. Таким образом, как правило, данные соединения являются более глубокими ловушками для водорода, и в них удерживается значимая часть водорода, содержащегося в образце.

В зависимости от материала подложки и осаждаемого материала, формирование поверхностных соединений может сопровождаться как

накоплением водорода в образце, так и выходом водорода из образца. В частности, образование алюминидов и боридов W, алюминидов Mo и боридов Ni способствует захвату водорода, в то время как образование алюминидов и боридов Fe, алюминидов Ni и боридов Mo – десорбции водорода.

В процессе ТДС-анализа алюминиды и бориды металлов претерпевают фазовые превращения, которые сопровождаются выбросами аргона, захваченного в них на стадии их формирования в плазме. В некоторых случаях при фазовых превращениях также высвобождается часть водорода. Стоит отметить, что пики термодесорбции аргона из алюминидов и боридов исследуемых металлов характеризуются различной полушириной.

Сравнение результатов экспериментов по осаждению атомов алюминия и бора на сталь 12X18H10T и на ее компоненты (Fe, Ni) позволило установить, что, несмотря на то, что основой стали является железо, а содержание никеля составляет около 10 масс.%, на поверхности стали образуются преимущественно алюминиды и бориды никеля. Именно эти соединения определяют изменения содержания водорода при осаждении атомов алюминия и бора на сталь, а также характер десорбции водорода в процессе ТДС-анализа. Данное обстоятельство может объясняться тем, что из алюминидов всех компонентов стали NiAl является наиболее термодинамически выгодным соединением.

Литература

[1] Dovganyuk S.S., Begrambekov L.B., Butrova N.N. and others // J. Surf. Invest. 2023. Vol. 17, Suppl. 1. P. S68–S77.

Р.Х. ХИСАМОВ^{1*}, Н.Н. АНДРИАНОВА^{2,3}, А.М. БОРИСОВ^{2,3},
М.А. ОВЧИННИКОВ³, Р.Р. МУЛЮКОВ¹

¹*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия*
²*Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия*

³*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

**r.khisamov@mail.ru*

МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО ВОЛЬФРАМА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ ГЕЛИЯ

На сегодняшний день материалом для внутренних стенок термоядерного реактора рассматривается вольфрам. Актуальными являются работы по повышению стойкости вольфрама к таким нежелательным для термоядерных установок явлениям как образование пуха и блистеров при облучении ионами гелия. С целью предотвращения образования, например, блистеров формируют определенную микроструктуру в вольфраме, топографию его поверхности [1].

В настоящей работе исследовали влияние ультрамелкозернистой структуры в вольфраме и конусообразного рельефа поверхности на образование блистеров. Ультрамелкозернистую структуру в вольфраме со средним размером зерен 300 нм получили интенсивной пластической деформацией методом кручения под высоким давлением около 5-6 ГПа [2]. Конусообразный рельеф на поверхности ультрамелкозернистых образцов с концентрацией конусов около 10^9 см^{-2} формировали высокодозным облучением ионами аргона с энергией 30 кэВ [2]. Полученные образцы облучали ионами гелия с энергией 30 кэВ с дозой 10^{18} - 10^{19} ион/ см^2 при комнатной температуре и при 600°C на масс-монохроматоре НИИЯФ МГУ [3]. Для сравнения использовали мелкозернистые образцы вольфрама с размером зерен до 10 мкм.

В результате облучения ионами гелия с дозой 10^{18} ион/ см^2 при комнатной температуре на изначально гладкой поверхности мелкозернистых образцов образовались куполообразные блистеры диаметром 1-2 мкм (Рис. 1а). Диаметр блистеров зависел от ориентации зерен. Некоторые блистеры были без крышек. На поверхности ультрамелкозернистых образцов блистеры также образовались (Рис.1б). Однако по сравнению с мелкозернистым образцом, блистеры на ультрамелкозернистом образце были с целыми крышками. Диаметр и толщина крышек блистеров на мелкозернистых образцах (Рис.1в)

в среднем были больше, чем у ультрамелкозернистых образцов (Рис.1г).

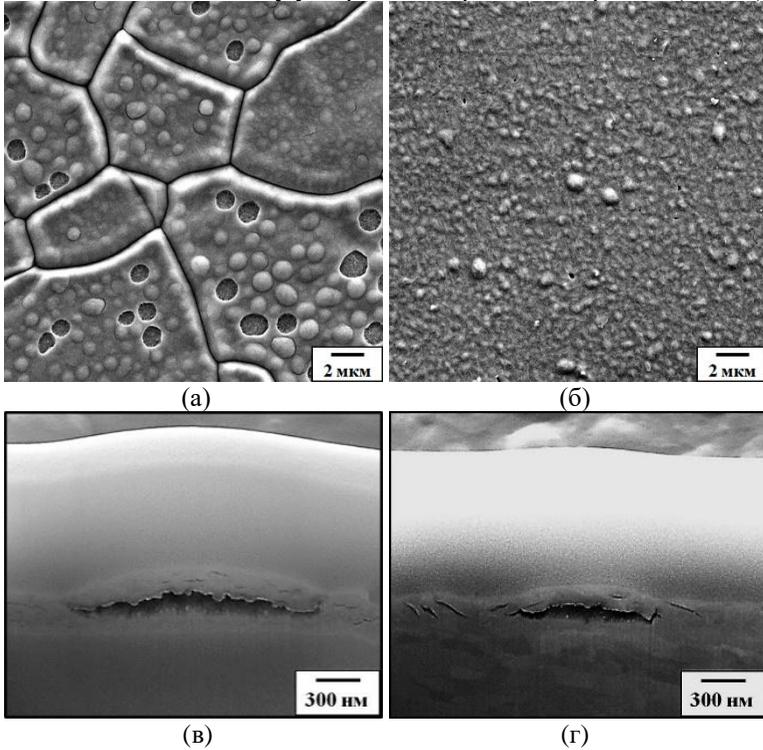


Рисунок 1 - поверхность (а,б) и приповерхностный слой (в,г) мелкозернистого (а,в) и ультрамелкозернистого (б,г) вольфрама после облучения ионами гелия с энергией 30 кэВ при комнатной температуре

На рисунке 2а представлен конусообразный рельеф на ультрамелкозернистом вольфраме, полученный высокодозным облучением ионами аргона. После облучения ионами гелия с дозой 10^{19} ион/см² конусообразный рельеф, в целом, сохранился (Рис.2б,в). Куполообразные блистеры, которые изображены на рисунке 1, не наблюдались как при облучении ионами гелия при комнатной, так и при температуре 600°С.

При облучении ионами гелия при комнатной температуре на некоторых участках рельефа появились трещины, которые, возможно, обусловлены имплантацией ионов гелия. Конические элементы после облучения ионами

гелия стали более острыми.

Облучение ионами гелия с дозой 10^{19} ион/см² при температуре 600°C привело к расщеплению конических элементов конусообразного рельефа на множество конусов (Рис.2в). На вершине некоторых конусов появились шароподобные образования, как ранее было отмечено в [4].

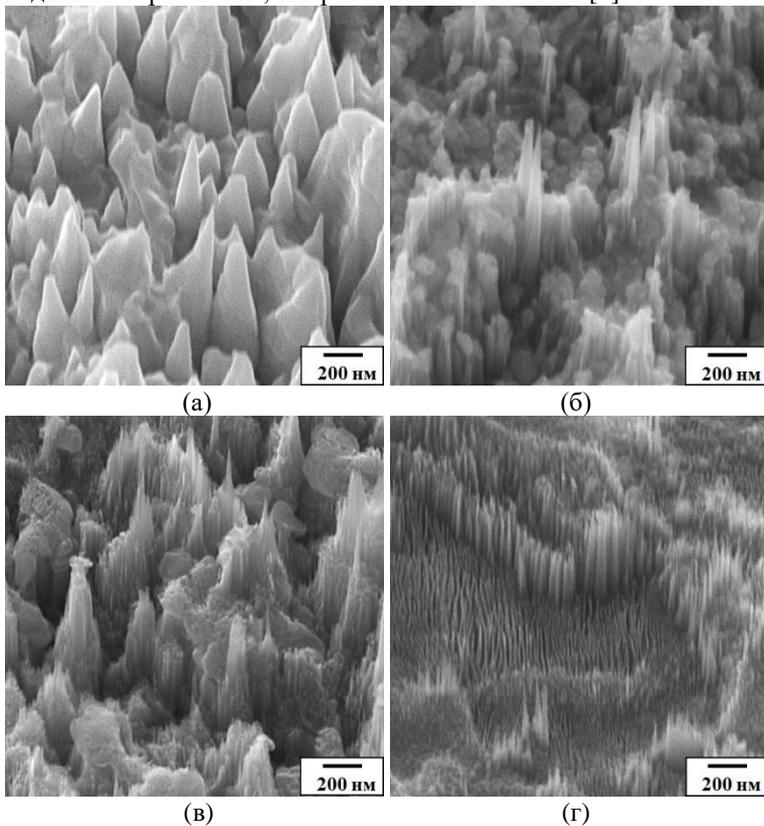


Рисунок 2 – (а) конусообразный рельеф ультрамелкозернистого вольфрама, после облучения ионами аргона, (б) после облучения ионами гелия при комнатной температуре, (в,г) при облучении ионами гелия при температуре 600°C

На относительно ровных участках поверхности ультрамелкозернистого образца, где конусообразный рельеф отсутствовал, наблюдалось расщепление зерен вдоль поверхности образца с образованием множества стенок шириной

около 10 нм и периодичностью их расположения 20 нм (Рис.2г). На уступах между зернами также появилось расщепление на конусы вдоль направления ионного пучка.

Таким образом, формирование ультрамелкозернистой структуры в вольфраме уменьшает диаметр и толщину крышек блистеров, увеличивает порог по флуенсу для отрыва крышек блистеров. Создание конусообразного рельефа на поверхности ультрамелкозернистого вольфрама предотвращает образование куполообразных блистеров. В результате высокодозного облучения ионами гелия при 600°C происходит расщепление зерен как вдоль поверхности образца, так и вдоль направления ионного пучка.

Благодарности. Работа Р.Х. Хисамова выполнена в рамках государственного задания ИПСМ РАН. Работа Р.Р. Мулюкова поддержана Евразийским НОЦ РБ. Исследования проведены на оборудовании ЦКП “Структурные и физико-механические исследования материалов” ИПСМ РАН и “Ускорительного комплекса МГУ”.

1. Р. Бериш. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Вып. II. М.: Мир, 1986. с.429.

2. R.Kh. Khisamov, N.N. Andrianova, A.M. Borisov // Phys. Atom. Nucl. 2023. V.86. Iss. 10. P. 2198-2205.

3. E.S. Mashkova, V.A. Molchanov. Medium-Energy Ion Reflection from Solids. - Amsterdam: North-Holland, 1985. - 444 p.

4. L.B. Begrambekov, A.M. Zakharov, V.G. Telkovsky // NIMB 1996. V. 115. P. 456.

Е.З. БИРЮЛИН*, И.А. АЛЯБЬЕВ, И.М. ПОЗНЯК, В.Ю. ЦЫБЕНКО, С.Ю.
ФОМИЧЕВА, А.Ю. ЛУЩИКОВ

АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»

Московский физико-технический институт НИУ

biriulin.ez@phystech.su

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ, ОПИСЫВАЮЩАЯ ОБТЕКАНИЕ МИШЕНИ ПОТОКОМ ПЛАЗМЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ПЛАЗМЕННЫХ УСКОРИТЕЛЯХ

Во время работы ИТЭР ожидается интенсивное плазменно-тепловое воздействие на защитные элементы вакуумной камеры и дивертор токамака-реактора. При переходных плазменных процессах (ELM-ы и срывы) тепловой поток на стенку токамака будет существенно превышать пороги плавления и испарения материалов облицовочных покрытий, что повлечет их интенсивную эрозию. Так как на существующих токамаках такие тепловые потоки не достигаются, эксперименты по исследованию эрозии обращенных к плазме элементов (ОПЭ) проводятся на электронных и ионных пучках, мощных лазерных установках, а также – плазменных ускорителях [1,2].

Для корректной экстраполяции результатов лабораторных экспериментов на условия ИТЭР необходимо развитие теоретических моделей, описывающих взаимодействие плазмы с поверхностью, а также механизмы эрозии ОПЭ – в широком диапазоне параметров плазменного воздействия.

В данной работе представлена численная модель, описывающая обтекание мишени плазменным потоком с параметрами, характерными для мощных плазменных ускорителей (КСПУ-Т, МК-200 – ГНЦ РФ ТРИНИТИ). Движение плазмы в модели описывается системой уравнений магнитной гидродинамики [3,4,5,6,7]. Также в модель включены уравнение теплопроводности и уравнение диффузии магнитного поля [3]. Уравнение состояния плазмы и термодинамические функции получены методами статистической физики [8,9]. Начальное распределение скорости, давления и плотности в плазменном потоке выбрано в соответствии с экспериментальными данными для установки КСПУ-Т [10]. В результате расчетов получено распределение плотности, давления, скорости плазмы вблизи поверхности мишени.

В ходе дальнейшей работы планируется провести эксперименты по облучению металлических мишеней мощными потоками плазмы на установке КСПУ-Т. Будет измерено распределение давления и плотности

примешенного слоя плазмы с помощью датчиков динамического давления и интерферометра, а также поток энергии на поверхность мишени методом калориметрии. Полученные экспериментальные данные позволят провести проверку численной модели.

Литература

- [1] Позняк И.М. [et al.] Эрозия металлов при воздействии интенсивных потоков плазмы, журнал ВАНТ Сер. Термоядерный синтез Т. 35, №4, 2012
- [2] Климов Н.С. [et al.] Разбрызгивание вольфрама при воздействии интенсивного потока плазмы, журнал ВАНТ Сер. Термоядерный синтез Т. 32, №.2, 2009
- [3] А. Г. Куликовский [et al.] Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений, журнал Физматлит, 2012
- [4] T.J. Barth D.C. Jespersen The design and application of upwind schemes on unstructured mesh, 27th Aerospace Sciences Meeting, 1989
- [5] Harten, A. High resolution schemes for hyperbolic conservation laws журнал Computational Physics, 49, 1983
- [6] А. Е. Дудоров [et al.] Квазимонотонная разностная схема повышенного порядка точности для уравнений магнитной гидродинамики, журнал Математическое моделирование, 1999
- [7] Н. В. Погорелов [et al.] Семейство приближенных решений задачи о распаде МГД-разрыва, сохраняющих условия на скачках, журнал Вычислительная математика и математическая физика, 1997
- [8] Л.П. Кудрин Статистическая физика плазмы, Атомиздат, 1974
- [9] Л.Д. Ландау Е.М. Лифшиц Статистическая физика, Наука, 1964
- [10] Н.С. Климов [et al.] Экспериментальное исследование интегральных характеристик потока плазмы и разряда квазистационарного сильноточного плазменного ускорителя с собственным магнитным полем ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез Т. 42, 2019

Г.А. РЫЖКОВ^{1*}, Д.Е. ЧЕРЕПАНОВ^{1,2}, Л.Н. ВЯЧЕСЛАВОВ¹,
А.А. КАСАТОВ^{1,3}, В.А. ПОПОВ^{1,3}

¹Институт ядерной физики им. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

*ryzhkov.george98@gmail.com

ЭРОЗИЯ ПОКРЫТИЯ ИЗ КАРБИДА БОРА В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ

Одной из ключевых проблем, возникающих в ходе создания термоядерного реактора, является проблема обращенной к плазме стенки. В реакторе с магнитным удержанием плазмы первая стенка рабочей камеры и плазмоприёмники в диверторе будут подвергаться воздействию разрушительных термических ударов (термоудары), возникающих в результате переходных процессов в плазме реактора. В последнее время уделяется все большее внимание высокотемпературным керамическим материалам в качестве защитного материала, так как они имеют невысокое среднее зарядовое число. Материалы с малым зарядовым числом имеют преимущества в том, что в случае попадания их в виде примесей в плазму не должно происходить значительного роста потерь энергии плазмы на излучение. В частности, рассматриваются покрытия обращенных к плазме компонентов, например, на основе карбида бора (B_4C).

В ИЯФ СО РАН проводятся эксперименты по моделированию влияния термоударов на керамические материалы на лазерном стенде экспериментального комплекса БЕТА [1]. В качестве инструмента, моделирующего термоудары, используется иттербиевый волоконный лазер с возможностью модуляции интенсивности выходного излучения. В данной работе исследовалась устойчивость покрытия из B_4C на вольфраме. Покрытие толщиной ~ 50 мкм было сделано с помощью метода детонационного напыления в ИГиЛ СО РАН [2]. Образец с покрытием облучался лазерным излучением, в ходе его нагрева регистрировалась температура его поверхности с помощью двухцветной пирометрии. Облучение образца производилось сериями по несколько импульсов с одинаковыми мощностями и длительностями. Между сериями импульсов состояние поверхности контролировалось с помощью сканирующего электронного

микроскопа (СЭМ).

Образец с покрытием облучался лазерными импульсами с максимальной плотностью мощности нагрева $\sim 0,46$ ГВт/м² и $\sim 0,2$ ГВт/м² с одинаковой длительностью в 1 мс. Всего образец подвергся облучению более 20000 импульсов, а между сериями импульсов проводилось исследование и характеристика эрозии покрытия. Из результатов экспериментов сделан вывод о перспективах использования В₄С в качестве защитного покрытия обращённых к плазме компонентов.

Литература

- [1] Cherepanov D. E. et al. In situ study of thermal shock damage to high-temperature ceramics // Nuclear Materials and Energy, 2023, т. 36, с. 101495.
- [2] Ulianitsky V. Y. et al. Computer-controlled detonation spraying: Flexible control of the coating chemistry and microstructure // Metals, 2019, т. 9, № 12, с. 1244.

Н.Н. АНДРИАНОВА^{1,2}, А.М. БОРИСОВ^{1,2,3}, Е.А. ВОРОБЬЕВА¹,
М.А. ОВЧИННИКОВ¹

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики имени
Д.В. Скобельцына, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²«Московский авиационный институт (Национальный исследовательский
университет)» Москва, Россия

³Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва,
Россия

ov.mikhail@gmail.com

ИМИТАЦИЯ ВЫСОКОДОЗНОГО РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ ВЫСОКООРИЕНТИРОВАННОГО ПИРОЛИТИЧЕСКОГО ГРАФИТА ИМПЛАНТАЦИЕЙ ИОНОВ ГЕЛИЯ И УГЛЕРОДА

Обращенные к плазме материалы в термоядерных установках (ТЯУ) подвергаются большим потокам атомов D, T и He, порядка $10^{19} \text{ c}^{-1}\text{cm}^{-2}$, с энергиями от десятков эВ до единиц МэВ и потокам нейтронов с энергией 14.1 МэВ. Из-за рассеяния и ядерных реакций в материале полный поток нейтронов также большой, около $10^{18} \text{ c}^{-1}\text{cm}^{-2}$ [1]. Взаимодействие потоков гелия с материалами стенок ТЯУ в настоящее время проходит обширную оценку. Считается, что значительные изменения поверхности образцов являются результатом захвата гелия вблизи внутренних или внешних структурных дефектов. Захваченные атомы гелия образуют кластеры, что приводит к увеличению искажений решетки, которые релаксируют путем схлопывания дислокационных петель, создавая заполненные гелием пузырьки увеличивающегося размера. Пузырьки гелия могут лопнуть, вызывая пористость в поверхностном слое и превращая его во все более случайную наноструктуру. Основные эффекты при нейтронном облучении — это появление радиоактивности и изменения в составе и структуре материала, которые происходят в результате ядерных реакций и радиационного повреждения решетки кристалла. Главным фактором, вызывающим радиационные повреждения при взаимодействии с нейтронами, является передача кинетической энергии атому образца. Спектр энергии таких первично выбитых атомов широк, но не превышает 100 кэВ [2].

Исследования по имитации нейтронного облучения в реакторах методом ионной имплантации, позволяющей эффективно генерировать высокие уровни радиационных смещений, проводят различными ионами [3]. Наиболее часто используют так называемое самооблучение (self-irradiation) ионами атомов мишени. Для сопоставления данных ионного и нейтронного

облучения используют универсальную дозовую характеристику радиационных повреждений в числе смещений на атом, СНА, которое для современных реакторов может достигать сотен единиц. В настоящей работе для оценки влияния радиационных смещений на модификацию углеродных материалов, вызываемую как ионами гелия, так и нейтронами, проводили сравнение результатов облучения поверхности высокоориентированного пиролитического графита (ВОПГ) пучками ионов гелия и углерода с сопоставимыми уровнями радиационных смещений.

В эксперименте образцы ВОПГ марки УПВ-1Т облучали ионами C^+ и He^+ с энергией 30 кэВ и флюенсами 1×10^{18} и 3×10^{18} ион/см², соответственно, приводящими к сопоставимым величинам радиационных смещений, в несколько десятков СНА на глубине пробега частиц согласно расчетам с помощью программы SRIM [3]. Плотность тока ионов составляла 0.3 и 0.2 мА/см² для ионов гелия и углерода. Температуру образцов T при облучении варьировали от 50 до 600°C учитывая сильные зависимости от T структурных и размерных изменений графитов как при нейтронном, так и ионном облучении [4,5]. Анализ морфологии и структуры образцов проводился при помощи растровой электронной микроскопии (РЭМ) и спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) на длине волны 473 нм.

На рисунке 1 приведены сравнительные РЭМ-изображения поверхности образцов ВОПГ после облучения при $T = 50, 400$ и 600°C . Можно видеть как сходство, так и существенные различия в морфологии поверхности, формирующейся при различных температурах. Облучение ионами гелия и углерода при $T = 50^\circ\text{C}$ приводит в обоих случаях к сетке усадочных трещин субмикронной глубины и размером ячеек порядка 0.1 мкм. Сравнение облучений ионами углерода и гелия при $T = 400^\circ\text{C}$ показывает кардинальную разницу в морфологии поверхности. Если при облучении ионами гелия слои, образованные усадкой, отслаиваются от поверхности и изгибаются вплоть до скручивания, то при облучении углеродом макроскопических трещин нет, на поверхности образуется узор из неглубоких кратеров диаметром 3-5 мкм с субмикронными стенками. Увеличение T до 600°C приводит как для гелия, так и для углерода к образованию отслоений, при этом их форма значительно различается. Отмеченное в нашей предыдущей работе [6] увеличение толщины отслоенных чешуек при увеличении T продолжает наблюдаться и при 600°C .

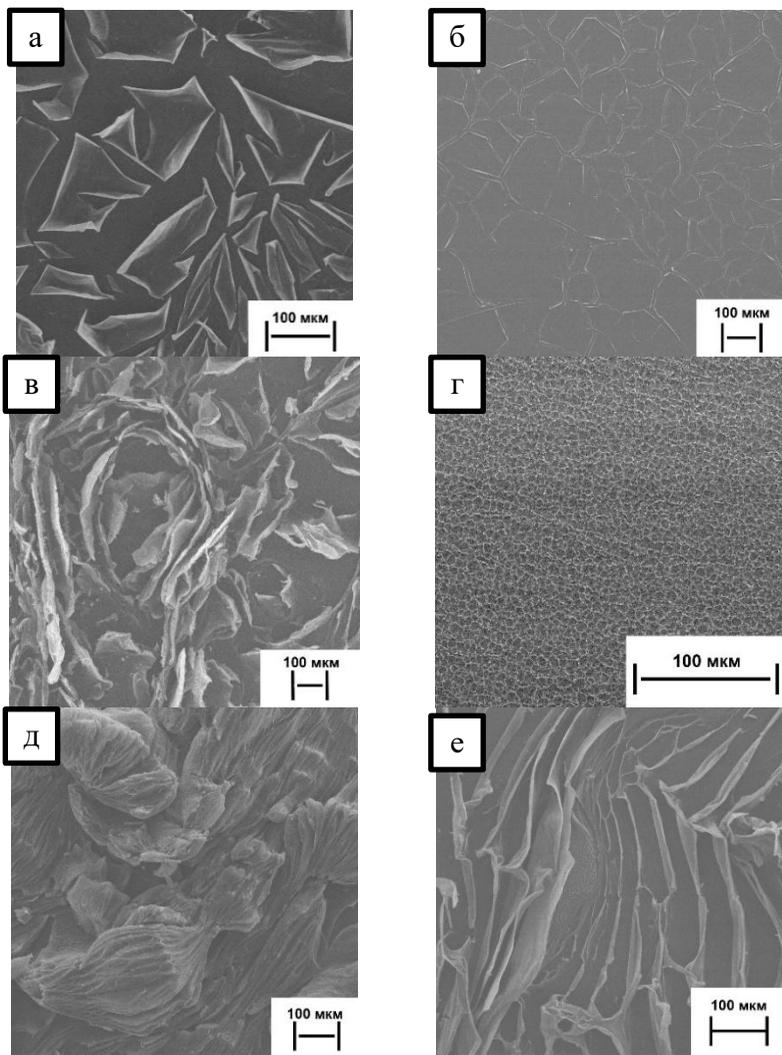


Рисунок 1. РЭМ изображения поверхности образцов после облучения ионами гелия (а,в,д) и углерода (б,г,е) с энергией 30 кэВ при температурах 50°С (а,б), 400°С (в,г) и 600°С (д,е)

При повышенной температуре имплантация гелия расслаивает чешуйки графита, увеличивая общую толщину отслоений более чем 10^3 раз, подобно расслоению интеркалированного графита при термическом воздействии и получении терморасширенного графита. Имплантация углерода при 600°C также приводит к отслоениям, но с толщиной, сопоставимой с пробегом углерода (~ 100 нм). На субмикронном уровне сходство облучений ионами углерода и гелия состоит в образовании прожилковой структуры, связываемой в [7] с механизмом «изгиба и перегиба» в графите за счет ионно-индуцированных механических напряжений. Для облучения гелием характерно образование блистеров и пор.

Анализ поверхности образцов ВОПГ методом КРС показывает схожий уровень структурной дефектности поверхности при облучении углеродом и гелием для каждого температурного интервала. Наиболее упорядоченная структура графита формируется при температуре облучения 600°C .

В целом, высокодозная имплантация ионов гелия приводит как к эффектам радиационных нарушений решетки графита, так и к эффектам внедрения гелия при имитации взаимодействия продуктов термоядерного синтеза с графитовыми материалами.

Работа А.М. Борисова поддержана РФФИ (проект №21-79-30058). При выполнении работы использовано оборудование «Ускорительного комплекса МГУ».

Литература

- [1] Behrisch R. Plasma facing materials for fusion devices // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2010. № 7. С. 5–18.
- [2] Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Вып.2. Распыление сплавов и соединений, распыление под действием электронов и нейтронов, рельеф поверхности / Под ред. Р. Бериша. - М.: Мир, 1986. - 488 с.
- [3] Вас Гэри С. Основы радиационного материаловедения. Металлы и сплавы. Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2014. – 992 с.
- [4] Virgil'ev Yu.S., Kalyagina I.P.// Inorg. Mater. 2004. V.40. P. S33–S49.
- [5] Andrianova N.N., Borisov A.M., Mashkova E.S., Sevostyanova V.S., Virgiliev Yu.S. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. 2013. V. 315. P. 117-120.
- [6] Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Воробьева Е.А. и др. // Ядерная физика и инжиниринг. 2025. Т. 16, № 1. С. 19–29.
- [7] Liu D., Cherns D., Johns S., et.al // Carbon. 2021. V. 173 P. 215–231.

Д.С. НИКИТИН*, А. НАСЫРБАЕВ, И.И. ШАНЕНКОВ, А.А. СИВКОВ
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск
*nikitindmsr@yandex.ru

ФОРМИРОВАНИЕ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ, АРМИРОВАННЫХ ЧАСТИЦАМИ СВЕРХТВЕРДЫХ КАРБИДОВ, В ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЕ

Алюминий и медь, а также их сплавы сегодня являются одними из наиболее важных материалов для различных конструкционных и функциональных применений в сферах аэрокосмической и автомобильной промышленности, электроэнергетики и электротехники. Одним из путей улучшения свойств металлов является их армирование частицами и структурами высокотвердых и высокопрочных материалов [1]. Образующиеся в результате металломатричные композиты (metal matrix composites – MMCs) способны сочетать в себе превосходные формуемость, пластичность, электро- и теплопроводность металлической матрицы с удовлетворительными износостойкостью, трибологическими характеристиками, прочностью и твердостью, обусловленными повышенными физико-механическими свойствами керамического компонента [2]. Среди подходящих армирующих компонентов для MMCs выделяются карбиды. Несмотря на значительные успехи в указанных системах композитов, существует ряд универсальных фундаментальных проблем с качеством получаемых объемных изделий, которые связаны, прежде всего, с несовершенством способов их получения [3].

Настоящая работа посвящена разработке композитов с металлической (Cu или Al) матрицей с улучшенными свойствами. Применены два ключевых подхода. Во-первых, использован метод плазмодинамического синтеза *in situ*, в котором внедрение армирующих частиц в матрицу происходит во время плазмодинамического синтеза. На этом этапе происходит предварительная активация исходных материалов за счет их обработки высокоэнергетическим плазменным потоком, генерируемым уникальным устройством – коаксиальным магнитоплазменным ускорителем, с последующим распылением и кристаллизацией в виде нано- и субмикронных частиц. Металл нарабатывается в процессе взаимодействия генерируемой плазмы с внутренней поверхностью электрода-ствола. Во-вторых, для создания объемных образцов предлагается использовать метод искрового плазменного спекания, который считается на сегодня наиболее эффективным методом получения плотной бескислородной керамики.

За счет подхода *in situ* обеспечивается равномерное распределение армирующего компонента, хорошее межфазное связывание и включение керамических частиц в матрицу, что улучшает физико-механические (твердость, модуль Юнга, трещиностойкость, трибологические характеристики) и теплофизические (теплопроводность, температуропроводность) свойства конечного продукта в сравнении с композитами, изготовленными по традиционным технологиям *ex situ*. В итоге значительно повышается надежность и долговечность конструктивных элементов автомобильных и авиакосмических приложений.

Для системы с алюминием указанная высокоэнергетическая (ток до 140 кА) импульсная (до 450 мкс) обработка сырья позволила достигнуть равномерного распределения армирующего компонента WC, SiC или B₄C (при его массовой концентрации от 5,85 до 16,38 %) в алюминиевой матрице, в том числе на уровне наноструктуры. Получены дисперсные композиты с полимодальным распределением частиц по размерам (от 10 нм до 100 мкм). Уникальная структура порошковых материалов стала ключевым фактором в достижении высокой степени уплотнения (до 99%) и улучшенных физико-механических свойств (103-215 HV) объемных изделий в сравнении со стандартными объемными изделиями (47-62 HV). Предложенный метод совмещения металлической матрицы и армирующего компонента (сверхтвердого карбида) *in situ* позволяет избежать высокой пористости, рекристаллизации, неоднородности распределения и агломерации частиц и улучшить конечные свойства композитов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-73-01203, <https://rscf.ru/project/23-73-01203/>.

Литература

- [1] Kottedda T.K., Kumar M., Kumar P., Chekuri R.B.R. Metal matrix nanocomposites: future scope in the fabrication and machining techniques // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2022. – P. 1–19.
- [2] Sharma D.K., Mahant D., Upadhyay G. Manufacturing of metal matrix composites: A state of review // Materials Today: Proceedings. – Vol. 26, Part 2. – 2020. – P. 506–519.
- [3] Singh L., Singh B., Saxena K.K. Manufacturing techniques for metal matrix composites (MMC): an overview // Advances in Materials and Processing Technologies. – Vol. 6, I. 2. – 2020. – P. 224–240.

Р.А. СЕЛИВАНОВ^{1,2}, С.А. КРАТ¹, И.А. СОРОКИН^{1,2}, Д.Ю. ШУВАЛОВ¹,
В.В. ЗАХАРОВ³, А.В. РУДЕНКО³

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.И.

Котельникова РАН

³Институт высокотемпературной электрохимии Уральского отделения РАН

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИТИЙ-БОРНОГО КОМПОЗИТА

Разработка новых типов материалов на основе лития и совместимых с ним плазменных покрытий является важной задачей, необходимой для достижения управляемого термоядерного синтеза. Было показано, что композитный бор-литиевый материал (КБЛМ), состоящий из матрицы из бориды лития, заполненной металлическим литием, является интересным потенциальным материалом для обращённых к плазме элементов, демонстрирующим поведение капиллярно-пористой системы (КПС) при тепловой нагрузке плазмы [1]. Чтобы проложить путь к его внедрению в термоядерные устройства, сначала необходимо исследовать его физические свойства, такие как тепло- и электропроводность, коэффициент теплового расширения.

В данной работе исследованы некоторые физические свойства КБЛМ в зависимости от температуры. Электропроводность измерена в диапазоне температур от 30°C до ~ 400 °C. На основе экспериментальных измерений рассчитана электропроводность материала из бориды лития. Наблюдаются и обсуждаются аномалии при температуре ~ 180 °C. Также измеряется тепловое расширение в том же температурном диапазоне и температуропроводность в широком диапазоне. Измеренные параметры сравниваются с параметрами металлического лития.

Литература

- [1] Krat S. et al. First study of lithium boron composite as plasma facing material // Nucl. Mater. Energy. 2023. Vol. 35. P. 101423.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЗОР РАБОТ ПО ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ В НИЯУ МИФИ.....	11
ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ И СИСТЕМ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА В СОВРЕМЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВКАХ	13
ИСПЫТАНИЕ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ КАРБИДА БОРА НА ВОЛЬФРАМЕ В СТАЦИОНАРНОЙ ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЕ УСТАНОВКИ ПЛМ-М.....	17
ОБРАЗОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНОГО ВЕЩЕСТВА В ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ С ПРЕДЕЛЬНЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ НА МАТЕРИАЛЫ.....	21
ИЗУЧЕНИЕ МОРФОЛОГИИ, СОСТАВА И ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК ИЗ ТОКАМАКА T-15МД.....	24
МЕТОДИКА АНАЛИЗА ЭРОЗИИ СТЕНКИ В ТОКАМАКЕ КТМ	26
РЕЦИКЛИНГ ЭНЕРГИИ В ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ С УЧЕТОМ РЕЛАКСАЦИИ ПЛАЗМЕННЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ.....	27
ПЛАЗМЕННО-ХИМИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРКАЛ В ТОКАМАКЕ EAST.....	29
СИСТЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТРИТИЕВОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА ТОКАМАКА – СТАЦИОНАРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ	31
ВЕРИФИКАЦИЯ И ВАЛИДАЦИЯ КИНЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОВЕРХНОСТИ В КОДЕ FESTIM	33
КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ БЫСТРОЙ РЕДЕПОЗИЦИИ	35

КОРРЕЛЯЦИЯ НАКОПЛЕНИЯ ДЕЙТЕРИЯ СО СТРУКТУРОЙ W и W-Cr-Y	37
О КОНКУРЕНЦИИ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В ВОЛЬФРАМЕ	40
ЗАХВАТ И ПРОНИКНОВЕНИЕ ДЕЙТЕРИЯ СКВОЗЬ МАЛОАКТИВИРУЕМУЮ АУСТЕНИТНУЮ ХРОМОМАНГАНЦЕВУЮ СТАЛЬ, ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ	42
ЛАВИНЫ ВЗРЫВОВ НАНОФРАГМЕНТОВ ВОЛЬФРАМОВЫХ НАНОВОЛОКОН В СЛОЯХ W FUZZ	44
КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В МАТЕРИАЛАХ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТОКАМАКА МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ПЕННИНГОВСКОГО РАЗРЯДА.....	48
ОЧИСТКА МОЛИБДЕНОВЫХ ЗЕРКАЛ В ПЛАЗМЕ РАЗРЯДА В ГЕЛИИ ОТ ПРОДУКТОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ВОДЯНЫМ ПАРОМ	52
ДЛИТЕЛЬНОЕ РАСПЫЛЕНИЕ САПФИРА И КВАРЦА ИОНАМИ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА И ГЕЛИЯ	54
ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАХВАТА ГАЗА В ТВЕРДОЕ ТЕЛО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ДЕСОРБЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ	57
АНАЛИЗ НАКОПЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В ПЕРВОЙ СТЕНКЕ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2 МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ АБЛЯЦИИ И ЛАЗЕРНО-ИСКРОВОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ	59
ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ CF-LIBS В ДИАГНОСТИКИ НАКОПЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА	63
АНАЛИЗ АДСОРБЦИИ ПРОТИЯ И ДЕЙТЕРИЯ НА МАТЕРИАЛЫ ТЯУ С ПОМОЩЬЮ ИОННОГО РАССЕЯНИЯ И АТОМОВ ОТДАЧИ.....	65

ПОТОКИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ОТРИЦАТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОД В ПЛАЗМЕ.....	69
КОМПОЗИТ ВОЛЬФРАМ-СТАЛЬ (WSS) КАК ОСНОВА ДЛЯ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ СТРУКТУР: СТРУКТУРА И ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ	73
ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА СОДЕРЖАНИЯ ЛЕГКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОВЕРХНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	75
ОСОБЕННОСТИ ЗАХВАТА И УДЕРЖАНИЯ ВОДОРОДА В СОЕДИНЕНИЯХ, ОБРАЗОВАННЫХ ПРИ ОСАЖДЕНИИ НА ПОВЕРХНОСТЬ МЕТАЛЛОВ АТОМОВ АЛЮМИНИЯ И БОРА, РАСПЫЛЕННЫХ ИОНАМИ АРГОНОВОЙ ПЛАЗМЫ С СООТВЕТСТВУЮЩИХ МИШЕНЕЙ	76
МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО ВОЛЬФРАМА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ ГЕЛИЯ.....	78
ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ, ОПИСЫВАЮЩАЯ ОБТЕКАНИЕ МИШЕНИ ПОТОКОМ ПЛАЗМЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ПЛАЗМЕННЫХ УСКОРИТЕЛЯХ.....	82
ЭРОЗИЯ ПОКРЫТИЯ ИЗ КАРБИДА БОРА В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ	84
ИМИТАЦИЯ ВЫСОКОДОЗНОГО РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ ВЫСОКООРИЕНТИРОВАННОГО ПИРОЛИТИЧЕСКОГО ГРАФИТА ИМПЛАНТАЦИЕЙ ИОНОВ ГЕЛИЯ И УГЛЕРОДА	86
ФОРМИРОВАНИЕ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ, АРМИРОВАННЫХ ЧАСТИЦАМИ СВЕРХТВЕРДЫХ КАРБИДОВ, В ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЕ.....	90
ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИТИЙ-БОРНОГО КОМПОЗИТА	92

**МАТЕРИАЛЫ
XXVIII МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Москва, НИЯУ МИФИ, 30-31 января 2025 г.

Подписано в печать 03.02.2025. Формат 60x84 1/16.
Уч.-изд. л. 6,25. Печ. л. 6,25. Изд. № 004-2.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».
115409, Москва, Каширское ш., 31.