

XXV КОНФЕРЕНЦИЯ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ

Москва, НИЯУ МИФИ, 27-28 января 2022 г.

Сборник научных трудов

**Москва
2022**

Министерство образования и науки РФ
Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»

**МАТЕРИАЛЫ
XXV КОНФЕРЕНЦИИ**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Москва, НИЯУ МИФИ, 27-28 января 2022 г.

Москва
2022

ББК 22.333
УДК 533.9 (06)
В 40

Материалы XXIV конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью». Москва, 27-28 января 2022г.
М.: НИЯУ МИФИ, 2022 г., 155 с.

Сборник содержит материалы докладов, представленных на ежегодно проводимую в НИЯУ МИФИ 25-ю конференцию по взаимодействию плазмы с поверхностью. Тематика конференции охватывает экспериментальные и теоретические исследования взаимодействия плазмы с поверхностью в установках управляемого термоядерного синтеза. Материалы докладов, входящих в сборник, опубликованы в авторской редакции при минимальной редакционной правке.

Редакционная коллегия:

*Ю.М. Гаспарян,
Д.Н. Синельников
В.В. Кулагин*

ISBN 978-5-7262-2843-3

Программа 25-ой конференции
«ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ»

Заседание №1

Четверг, 27 января

начало в 9.45

Председатель – Ю.М. Гаспарян

9.45 – 10.00	Открытие первого дня конференции
10.00 – 10.30	<u>С.В. Мирнов¹</u>, А.В. Вертков², М.Ю. Жарков², А.В. Курячий², И.Е. Люблинский², А.С. Джурик¹, М.М. Мурачев¹, В.Б. Лазарев¹, Н.Т. Джигайло¹, Н.В. Лешов¹, Р.В. Чекушин¹, С.И. Кравчук¹, В.А. Морозов¹, П.А. Антонов¹, А.В. Зорин¹, Я.А. Васина¹, Н.П. Петрова¹ ¹<i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</i> ²<i>НИЦ «Курчатовский институт»</i> Создание и плазменные испытания на токамаке Т-11М действующей модели полужамкнутого контура циркуляции лития для квазистационарного токамака
10.30 – 11.00	<u>И.В. Мазуль</u>, Р.Н. Гиниятулин, А.А. Кавин, Н.В. Литуневский, А.Н. Маханьков, П.Ю. Пискарев, В.Н. Танчук <i>Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова, Санкт-Петербург</i> <i>Проектный центр ИТЭР, Москва</i> Обращенные к плазме компоненты токамака ТРТ
11.00 – 11.20	<u>М.Ю. Жарков¹</u>, А.В. Вертков¹, И.Е. Люблинский¹, С.В. Мирнов², В.Б. Лазарев² ¹<i>АО «Красная звезда», Москва</i> ²<i>АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Москва</i> Литиевый лимитер квазистационарного типа токамака Т-11М как прототип лимитера токамака Т-15МД
11.20 – 11.40	<u>А.А. Писарев¹</u>, Л.Е. Захаров², А.В. Вертков³, В.В. Душик⁴, М.Ю. Жарков³, М.С. Колесник⁵, И.Е. Люблинский³, И.В. Мазуль⁵, П.Ю. Пискарев⁵, Р.В. Рулев⁵, Г.М. Тарасюк¹, А.А. Шапоренков⁴ ¹<i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</i> ²<i>LiWFusion, USA</i> ³<i>АО «Красная Звезда»</i> ⁴<i>Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина</i> ⁵<i>ОАО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова»</i> Макет приемной пластины дивертора токамака, основанного на концепции текущего слоя жидкого лития
11.40 – 12.00	Кофе-брейк

Председатель – Ю. М. Гаспарян

12.00 – 12.20	В.П. Будаев^{1,2}, А.М. Житлухин³, Ю.В. Мартыненко¹, В.Л. Подковыров³, И.М. Позняк^{3,4}, Д.В. Коваленко³, В.Ю. Цыбенко³, <u>З.И. Новоселова</u>^{3,4}, Е.Д. Федулаев^{3,4}, Д.А. Бурмистров^{2,3}, С.Д. Лиджигорьев^{3,4}, О.Р. Исмагилов³ ¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва ²Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва ³АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Троицк, Москва ⁴Национальный исследовательский университет «МФТИ», Долгопрудный Испытания опытных образцов теплозащитной облицовки купола дивертора ИТЭР плазменными потоками на КСПУ-Т: результаты и экстраполяция на условия ИТЭР
12.20 – 12.40	<u>I. Borodkina</u>^{1,2}, D.V. Borodin³, D. Douai⁴, D. Tshhakaya¹, H. Kumpulainen⁵, E. de la Cal⁶, J. Romazanov³, A. Huber³ and JET contributors* ¹Institute of Plasma Physics of the CAS, Prague, Czech Republic ²National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia ³Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Energie- und Klimaforschung – Plasmaphysik, Partner of the Trilateral Euregio Cluster (TEC), Jülich, Germany ⁴CEA, IRFM, F-13108 Saint Paul Lez Durance, France ⁵Aalto University, Espoo, Finland ⁶CIEMAT, Madrid, Spain *See the author list of E. Joffrin et al. 2019 Nucl. Fusion 59 112021 Overview of plasma-facing component erosion and impurity migration studies at JET-ILW
12.40 – 12.55	<u>В.А. Попов</u>^{1,2}, А.С. Аракчеев^{1,3}, И.В. Кандауров¹, А.А. Касатов^{1,2}, В.В. Куркучев¹, Ю.А. Трунев¹, А.А. Васильев¹, Л.Н. Вячеславов¹ ¹Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск ²Новосибирский государственный университет ³Новосибирский государственный технический университет Термоток в вольфраме и приповерхностном испарённом слое при импульсном нагреве
12.55 – 13.10	Н. В. Давыдов^{1,2}, А. С. Аракчеев², А.А. Васильев², Л.Н. Вячеславов², И.В. Кандауров², А.А. Касатов^{1,2}, Д.Е. Черепанов² ¹Новосибирский государственный университет, Новосибирск ²Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск Исследование термической деформации пластин при импульсном нагреве

13.10 – 13.25	<u>А.А. Васильев</u>^{1,3}, А.С. Аракчеев^{1,3}, А.В. Бурдаков^{1,3}, Л.Н. Вячеславов^{1,2,3}, И.В. Кандауров¹, А.А. Касатов^{1,2,3}, В.В. Куркучев^{1,2}, А.Г. Максимова^{1,2,4}, В.А. Попов^{1,2}, А.А. Руктуев^{1,3}, Д.Е. Черепанов^{1,2,3}, А.А. Шошин^{1,2} ¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск ²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», Новосибирск ³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», Новосибирск ⁴Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск Динамика формы поверхности вольфрама после образования сети трещин во время теплового удара
13.25 – 14.25	Обед

Председатель – А. А. Писарев

14.25 – 14.40	Р.А. Селиванов¹, И.А. Сорокин^{1,2}, <u>С.А. Край</u>¹, Н.С. Сергеев^{1,3}, Д.В. Колодко^{1,2}, Ф.С. Подолько¹, Е.А. Фефелова¹, О.В. Волкова⁴, В.В. Захаров⁴ ¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва ²Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино ³Национальный исследовательский институт «Курчатовский институт», Москва ⁴Институт высокотемпературной электрохимии Уро РАН, Екатеринбург Исследование бор-литиевого композита под действием мощных тепловых и ионно-плазменных нагрузок
14.40 – 14.55	<u>К.А. Рогозин</u>¹, В.П. Будаев^{1,2}, С.Д. Федорович¹, А.В. Карпов^{1,2}, М.В. Лукашевский¹, А.П. Слива¹, А.Ю. Марченков¹, В. Чан Куанг¹, В.С. Квасков^{1,2}, А.А. Коньков¹ ¹Национальный исследовательский университет «МЭИ» ²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» Исследование результатов воздействия лазерной, электронно-пучковой и дуговой нагрузок на нано-структурированные поверхности материалов токамака-реактора
14.55 – 15.10	<u>Н.Н. Касимова</u>, Л.Б. Беграмбеков, С.С. Довганюк, А.М. Захаров Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» Модификация алюминий-вольфрамовых слоев на вольфраме при термическом воздействии

15.10 – 15.25	В.П. Будаев^{1,2}, С.Д. Федорович¹, Ю.В. Мартыненко^{2,1}, <u>А.В. Карпов^{1,2}</u>, А.Ю. Марченков¹, М.В. Лукашевский¹, А.В. Лазукин¹, М.К. Губкин¹, Д.И. Кавыршин¹, Д.С. Лукьянцев¹, М.В. Будаева⁴, В. Чан Куанг¹, Г.Б. Васильев¹, К.А. Рогозин¹, А.А. Коньков¹ ¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва ²НИЦ «Курчатовский институт», Москва ³ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, Москва ⁴Национальный исследовательский университет «МФТИ», Долгопрудный Рост наноструктур на титане и железе при плазменном облучении стационарными плазменными нагрузками в установке ПЛМ
15.25 – 15.40	<u>Н.С. Сергеев^{1,2}</u>, И.А. Сорокин^{1,3}, Ф.С. Подолько¹, О.В. Огородникова¹, В.С. Ефимов¹, Ю.М. Гаспарян¹ ¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва ²Национальный исследовательский институт «Курчатовский институт», Москва ³Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино Модификация поверхности вольфрама под воздействием гелиевой плазмы с примесью инертных газов
15.40 – 15.55	Н.Н. Андрианова¹, А.М. Борисов^{1,2}, Е.С. Машкова³, <u>М.А. Овчинников³</u> ¹Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва ²Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва ³Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва Модифицирование углерод-углеродных композиционных материалов при высокодозном воздействии ионов плазмы термоядерных установок
15.55 – 16.10	М.М. Цвентух Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), Москва Определение критической температуры вещества из параметров плазмы катодного пятна вакуумной дуги
16.10 – 16.30	Кофе-брейк

Председатель – Л. Б. Беграмбеков

16.30 – 16.45	А.А. Коньков, К.А. Рогозин, В. Чан Куанг, В.С. Квасков, С.В. Белоусов, А.В. Карпов, А.В. Захаренков, С.Д. Федорович, В.П. Будаев Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва Испытание охлаждаемых жидкометаллических литиевых капиллярно-пористых систем стационарной плазменной и импульсной лазерной нагрузкой
------------------	--

16.45 – 17.00	<u>А.С. Умеренкова</u>¹, Ю. Ван¹, З.Р. Арутюнян¹, Ю.М. Гаспарян¹, В.С. Ефимов¹, А.М. Литновский², О.В. Огородникова¹, К. Гарсия-Розалес³ ¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» ²Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Energie- und Klimaforschung, Jülich, Germany ³Ceit-IK4 Technology Center, San Sebastian, Spain Захват ионов дейтерия в SMART сплавах W-Cr-Y
17.00 – 17.15	<u>Н.П. Бобырь</u>¹, В.С. Ефимов², Б.И. Хрипунов¹, Д.И. Черкез¹, Д.А. Козлов¹, Д.С. Дугин¹, С.С. Ананьев¹ ¹НИЦ "Курчатовский институт", Москва ²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва Влияние примеси тантала на захват дейтерия при низкотемпературном плазменном облучении в сплаве W-Ta
17.15 – 17.30	<u>Д.С. Дугин</u>¹, Н.П. Бобырь^{1,2}, Д.А. Козлов¹ ¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва ²АО ВНИИИМ им. А.А. Бочвара, Москва Исследование влияния ионно-индуцированных дефектов в бронзе Cu1Cr0,1Zr на накопления дейтерия
17.30 – 17.45	<u>З.Р. Арутюнян</u>, Ю.М. Гаспарян, В.С. Ефимов, С.А. Крат, А.А. Писарев Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» Замещение изотопов гелия в вольфраме при ионном облучении
17.45 – 18.00	<u>Е.А. Фефелова</u>, С.А. Крат, Ю.М. Гаспарян, В.С. Ефимов, М.М. Зарипова, М.Г. Исаенкова, А.А. Писарев Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» Влияние примеси гелия на свойства соосажденных вольфрам- дейтериевых слоёв и удержание дейтерия в них
18.00 – 18.15	<u>Н.В. Лешов</u>, А.Н. Щербак, В.Г. Петров , А.Ю. Афонин АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Москва Первые результаты предсказания плотности плазмы с помощью искусственных нейронных сетей для токамака T-11M
18.15 – 18.30	<u>Г.Б. Васильев</u>¹, С.Д. Федорович¹, А.В. Карпов^{1,2}, В.П. Будаев^{1,2}, Д.И. Кавыршин^{1,3}, В. Чан Куанг¹, М.В. Лукашевский¹, М.К. Губкин¹, К.А. Рогозин¹, А.А. Коньков¹ ¹Национальный исследовательский университет «МЭИ» ²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» ³ОИВТ РАН, Москва, Россия Испытания вольфрамовых модулей комбинированной плазменной и лазерной нагрузкой
	Конец первого дня конференции

Пятница, 28 января**начало в 9.55****Председатель – Ю. М. Гаспарян**

9.55 – 10.00	Открытие второго дня конференции
10.00 – 10.30	<u>А.Г. Раздобарин</u> ¹ , А.М. Дмитриев ^{1,2} , Д.И. Елец ^{1,2} , Е.Е. Мухин ¹ , Д.Л. Богачев ¹ , Ю.М. Гаспарян ² , И.В. Алексеев ³ ¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург ² НИИЯУ «МИФИ», Москва ³ БФУ им. Канта, Калининград Разработка комплекса лазерных диагностик первой стенки на токамаке Глобус-М2
10.30 – 11.00	А.П. Менушенков Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» Синхротронное излучение – уникальный инструмент исследования вещества
11.00 – 11.20	<u>А.А. Айрапетов</u> , Я.А. Садовский, Л.Б. Беграббеков Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» Зондовое устройство для комплексного исследования плазмы с дивертором термоядерных установках
11.20 – 11.40	<u>А.В. Грунин</u> , Л.Б. Беграббеков Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» Зондовое устройство для комплексного исследования взаимодействий «плазма/стенка» в термоядерных установках
11.40 – 12.00	<u>С.В. Рогожкин</u> ^{1,2} , А. А. Никитин ^{2,1} , А.А. Хомич ^{2,1} , А.А. Богачев ^{2,1} , А.В. Клауз ^{1,2} , Н.А. Искандаров ^{2,1} , А.А. Лукьянчук ^{2,1} , О.А. Разницын ^{2,1} , А.С. Шутов ^{2,1} , А.Г. Залужный ^{1,2} , Ю.Е. Горшкова ³ , Г.Д. Богучава ³ ¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва ² НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ, Москва ³ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна Комплементарный анализ радиационных эффектов в материалах
12.00 – 12.20	Кофе-брейк

Председатель – С. А. Крат

12.20 – 12.35	<u>Д.М. Бачурина</u> ¹ , А.Н. Сучков ¹ , И.В. Козлов ^{1,2} , Н.П. Бобырь ³ , Ю.А. Гурова ¹ , В.С. Ефимов ¹ , Е.С. Куликова ³ , А.В. Спицин ^{1,3} , Ю.М. Гаспарян ¹ ¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» ² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» ³ НИЦ «Курчатовский институт» Влияние дейтерия на фазовый состав малоактивируемого припоя TiZr4Be
------------------	---

12.35 – 12.50	<u>Н.Ю. Свечников</u> , В.Г. Станкевич <i>НИЦ “Курчатовский институт”, Москва</i> О возможности спектроскопических исследований продуктов эрозии вольфрама с углеродными примесями
12.50 – 13.05	<u>Н.П. Бобырь</u> ^{1,2} , <u>Т.А. Анфимова</u> ^{1,3} , Б.В. Иванов ¹ , А.С. Аникин ² , И.Г. Лесина ² , А.А. Семенов ² , Н.Е. Забирова ² , А.С. Крюкова ² , А.Н. Букин ^{2,3} , А.В. Лизунов ² ¹ <i>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва</i> ² <i>АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара», Москва</i> ³ <i>Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва</i> Применение метода радиолюминографии для анализа накопления трития в электронно-индуцированных дефектах в перспективных материалах термоядерных реакторов
13.05 – 13.20	<u>Н.Е. Ефимов</u> , Д.Н. Синельников, Д.Г. Булгадарян <i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</i> Калибровка анализатора потоков нейтральных атомов для токамака МИФИСТ
13.20 – 14.20	Обед

Председатель – А. Г. Раздобарин

14.20 – 14.40	<u>Ю.М. Гаспарян</u> , Д.Г. Булгадарян, А.И. Алиева, Н.Н. Дегтяренко, Н.Е. Ефимов, В.С. Ефимов, А.В. Казиев, С.А. Крат, В.В. Кулагин, Е.Д. Маренков, Ф.С. Подольяко, Н.С. Сергеев, Д.Н. Синельников, И.А. Сорокин, А.А. Степаненко, А.М. Столбов, М.А. Попова, М.М. Харьков <i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</i> Методы дистанционного контроля накопления и удаления изотопов водорода из стенок термоядерных установок
14.40 – 14.55	<u>М.А. Попова</u> , М.В. Гришаев, Д.Г. Булгадарян, Ю.М. Гаспарян <i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</i> Оценка погрешности измерения содержания дейтерия в вольфраме методом лазерно-индуцированной десорбции
14.55 – 15.10	<u>В.В. Кулагин</u> , А.Ю. Хомяков, Ю.М. Гаспарян, Н.Н. Дегтяренко <i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</i> Оценка соотношения потоков десорбции атомарного и молекулярного водорода с поверхности вольфрама
15.10 – 15.25	<u>Л.А. Варшавчик</u> , Н.А. Бабинов, З.Г. Люллин, Е.А. Старовойтов, С.И. Когаков, Е.Е. Мухин <i>ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург</i> Моделирование напыления на внутривакуумную оптику диагностики диверторного томсоновского рассеяния ИТЭР

15.25 – 15.40	<u>А.М. Дмитриев</u>^{1,2,4*}, А.Г. Раздобарин¹, Л.А. Снигирев¹, Д.И.Елец^{1,4}, И.М. Букреев¹, А.П. Чернаков^{1,2}, Е.Е. Мухин¹, С.Ю. Толстяков¹, И.Б. Куприянов³, В.Л. Буховец⁵, А.Е. Городецкий⁵, А.В. Маркин⁵, Р.Х. Залавутдинов⁵ ¹ФГБУН ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург ²АО «Спектрал-Тех», Санкт-Петербург ³АО «ВНИИНМ им. А.А. Бочвара», Москва ⁴Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва ⁵ФГБУН ИФХЭ им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва Магнетронное осаждение бериллия и циклическая очистка диагностических окон в плазме ВЧ разряда
15.40 – 15.55	<u>Э.Г. Люллин</u>^{1,2}, Н.А. Бабинов^{1,2}, Л.А. Варшавчик^{1,2}, Е. Е. Мухин¹ ¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург ²ЗАО Спектрал-Тех, Санкт-Петербург Ab initio потенциалы и сечения упругого взаимодействия для моделирования транспорта частиц в газе
15.55 – 16.15	Кофе-брейк

Председатель – А. А. Писарев

16.15 – 16.35	<u>P. Bittner</u>¹, H.R. Koslowski¹, A. Litnovsky^{1,2}, Ch. Linsmeier¹ ¹Forschungszentrum Jülich GmbH - IEK-4, Jülich, Germany ²National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia Modeling of surface segregation of Cr in the WCrY SMART alloy
16.35 – 16.55	В.П.Будаев^{1,2}, А.М. Житлухин³, Ю.В. Мартыненко¹, В.Л. Подковыров³, И.М. Позняк^{3,4}, Д.В. Коваленко³, В.Ю. Цыбенко³, <u>Э.И. Новоселова</u>^{3,4}, Е.Д. Федулаев^{3,4}, Д.А. Бурмистров^{2,3}, С.Д. Лиджигорьев^{3,4}, О.Р. Исмагилов³ ¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва ²Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва ³АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Троицк, Москва ⁴Национальный исследовательский университет «МФТИ», Долгопрудный Испытания опытных образцов теплозащитной облицовки купола дивертора ИТЭР плазменными потоками на КСПУ-Т: результаты и экстраполяция на условия ИТЭР
16.55 – 17.10	<u>П.В. Минашин</u>¹, А.Б. Кукушкин^{1,2} ¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва ²НИЯУ МИФИ, Москва Спектральная интенсивность электронного циклотронного излучения плазмы, выходящего на первую стенку в ИТЭР
17.10 – 17.25	<u>Д.И. Кавыршин</u>^{1,3}, В.П. Будаев^{1,2}, С.Д. Федорович¹, А.В. Карпов^{1,2}, В.Ф. Чиннов³, М.В. Лукашевский¹, В. Чан Куанг¹, М.К. Губкин¹, Е.В. Муравьева¹, А.С. Мязин¹, Г.Б. Васильев¹, К.А. Рогозин¹, А.А. Коньков¹ ¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва ²НИЦ «Курчатовский институт», Москва ³ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, Москва Оптическая эмиссионная спектроскопия для исследования области взаимодействия плазменного потока с вольфрамовым образцом

17.25 – 17.40	<u>С.Д. Федорович</u>¹, В.П. Будаев^{1,2}, А.В. Карпов^{1,2}, А.П. Слива¹, А.Ю. Марченков¹, М.В. Лукашевский¹, М.К. Губкин¹, Д.И. Кавыршин¹, А.В. Захаренков¹, В. Чан Куанг¹, К.А. Рогозин¹, А.А. Коньков¹ ¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва ²НИЦ «Курчатовский институт», Москва Диагностика приповерхностной турбулентной плазмы и тепловых потоков на обращенные к плазме материалы в экспериментах с дуговыми процессами
17.40 – 17.55	Д.И. Черкез, <u>Н.О. Степанов</u>, С.С. Ананьев, А.В. Спицын НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия Установка для изучения взаимодействия плазмы с материалами на основе ВЧ-источника геликонного типа: первые результаты
17.55 – 18.10	<u>В. Чан Куанг</u>¹, В.П. Будаев^{1,2}, А.В. Дедов¹, С.Д. Федорович¹, Д.И. Кавыршин^{1,3}, А.В. Карпов^{1,2}, Ю.В. Мартыненко², А.Т. Комов¹, А.В. Лубенченко¹, М.В. Лукашевский¹, А.В. Захаренков¹, М.К. Губкин¹, Г.Б. Васильев¹, К.А. Рогозин¹, А.А. Коньков¹, В.С. Квасков¹ ¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия ²НИЦ «Курчатовский институт», Москва ³Объединенный институт высоких температур РАН, Москва Система ВЧ -нагрева для достижения параметров плазмы в установке ПЛМ-М
18.10 – 18.25	<u>Ю.А. Гурова</u>¹, А.Н. Сучков¹, Д.М. Бачурина¹, Н.С. Попов¹, О.Н. Севрюков¹, А.М. Литновский^{1,2}, Ш. Тан^{2,3} ¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия ²Forschungszentrum Jülich, Германия ³Hefei University of Technology, Китай Исследование применимости сплава-припоя TiZr4Be для пайки самопассивирующихся вольфрамовых сплавов со сталью для термоядерного реактора DEMO
18.25 – 18.40	А.П. Слива¹, В.К. Драгунов¹, <u>А.Ю. Марченков</u>¹, В.П. Будаев^{1,2}, Д.А. Жгут¹, И.Е. Жмурко¹, С.Д. Федорович¹, А.В. Карпов¹ ¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва ²НИЦ «Курчатовский институт», Москва О методе электронно-лучевой наплавки с присадочной проволокой для изготовления охлаждаемых вольфрамовых модулей теплозащитной облицовки дивертора токамака-реактора
18.40 – 18.50	Заккрытие конференции

С.В. МИРНОВ^{1*}, А.В. ВЕРТКОВ², М.Ю. ЖАРКОВ², А.В. КУРЯЧИЙ², И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ², А.С. ДЖУРИК¹, М.М. МУРАЧЕВ¹, В.Б. ЛАЗАРЕВ¹, Н.Т. ДЖИГАЙЛО¹, Н.В. ЛЕШОВ¹, Р.В. ЧЕКУШИН¹, С.И. КРАВЧУК¹, В.А. МОРОЗОВ¹, П.А. АНТОНОВ¹, А.В. ЗОРИН¹, Я.А. ВАСИНА¹, Н.П. ПЕТРОВА¹

¹АО "ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований",
Троицк, Россия

²А.О. «Красная Звезда», Москва, Россия

*mirnov@triniti.ru

СОЗДАНИЕ И ПЛАЗМЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА ТОКАМАКЕ Т-11М ДЕЙСТВУЮЩЕЙ МОДЕЛИ ПОЛУЗАМКНУТОГО КОНТУРА ЦИРКУЛЯЦИИ ЛИТИЯ ДЛЯ КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО ТОКАМАКА

Использование лития для защиты внутрикамерных элементов токамака капиллярно-пористыми системами (КПС) с жидким литием впервые примененное нами на российском токамаке Т-11М (1999г), продемонстрировало важные эффекты: существенное снижение уровня тяжелых примесей в горячей водородной плазме и, соответственно, уменьшение ее эффективного заряда $Z_{эф}$ до значений близких к 1, что, как известно, принципиально необходимо для нормального функционирования токамака - реактора. Эта литиевая технология, развитая в результате совместной деятельности АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» и АО «Красная Звезда» на токамаке Т-11М в период 1999-2010 гг, получила продолжение - она была успешно использована: на токамаках Т-10, FTU (Италия), испанском стеллараторе TJ-II и предполагает в дальнейшем использование на токамаках Т-15МД и КТМ (Казахстан). Однако по мере этого движения и нарастающего расхода лития одно из главных технологических преимуществ принятой нами схемы – автономное литиевое питание КПС-элементов, ограничивающих контакт плазма- стенка, потребовало нового решения. А именно, замену их питающих бачков, изготавливаемых с ними заодно, и заполняемых литием до постановки в камеру, на некое устройство, позволяющее в ходе эксперимента их дозакровку извне разрядной камеры без нарушения вакуума. Тем самым снялось бы ограничение на длительность литиевого эксперимента. Соединение такого устройства с системой сбора «лишнего лития», позволяющее его периодическое удаление без нарушения в камере вакуумных условий, могла бы обеспечить квазистационарный режим работы токамака-

реактора с относительно короткими перерывами для дозаправки его литием и разгрузки. Действующая модель такого устройства была создана на базе токамака Т-11М и успешно прошла плазменные испытания. В работе обсуждаются детали и результаты проведенных испытаний.



И.В. МАЗУЛЬ*, Р.Н. ГИНИЯТУЛИН, А.А. КАВИН, Н.В. ЛИТУНОВСКИЙ,
А.Н. МАХАНЬКОВ, П.Ю. ПИСКАРЕВ, В.Н. ТАНЧУК

*Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В.
Ефремова (НИИЭФА), Санкт-Петербург, Россия*

Частное учреждение "Проектный центр ИТЭР", Москва, Россия

**mazuliv@niiefa.spb.su*

ОБРАЩЕННЫЕ К ПЛАЗМЕ КОМПОНЕНТЫ ТОКАМАКА ТРТ

Представлена концепция обращенных к плазме компонентов (ОПК) токамака ТРТ, работающего в режиме длительных разрядов и высокой средней тепловой нагрузки на стенки. Описана структура и проблематика ОПК, взаимосвязь основных параметров и процессов, обеспечивающих комфортное сосуществование плазмы и окружающих ее стенок. Представлены конструктивные решения панелей первой стенки и дивертора, выполненные на основе технологий ИТЭР. Обсуждаются особенности применения жидких металлов в ОПК. Подробно рассматриваются возможности альтернативных решений для диверторной мишени.

М.Ю. ЖАРКОВ^{1*}, А.В. ВЕРТКОВ¹, И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ¹, С.В. МИРНОВ²,
В.Б. ЛАЗАРЕВ²

¹АО «Красная звезда», Москва, РФ

²АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Москва, РФ

*MG-dist@yandex.ru

ЛИТИЕВЫЙ ЛИМИТЕР КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО ТИПА ТОКАМАКА Т-11М КАК ПРОТОТИП ЛИМИТЕРА ТОКАМАКА Т- 15МД

Литиевые КПС в качестве обращённого к плазме материала внутрикамерных элементов (ВЭ) успешно испытаны в импульсном режиме на отечественных (Т-10, Т-11М) и зарубежных (ТJ-II, КТМ) термоядерных установках [1]. При переходе к более длительным режимам горения плазмы требования к ВЭ ужесточаются, в частности имеют место:

1) ограничение на температуру приёмной поверхности ($T < 600^{\circ}\text{C}$) для предотвращения чрезмерного поступления лития в плазму;

2) требование периодической очистки лития от изотопов водорода и накопившихся примесей для обеспечения безопасности и работоспособности устройства;

3) требование подпитки устройства литием без разгерметизации вакуумной камеры для бесперебойной работы.

В 2019–2021 годах на АО «Красная Звезда» был разработан и изготовлен литиевый лимитер квазистационарного типа для токамака Т-11М (рисунки 1 и 2). Основная цель устройства: отработка приёмов работы с потоком текущего лития и подпиткой лимитера для обеспечения требований №№ 2, 3. Устройство изначально создавалось без активной системы термостабилизации, так как в силу импульсного режима горения плазмы на токамаке Т-11М оценить её вклад в тепловое состояние приёмной поверхности не представляется возможным. Выполнение требования №2 о периодической очистке лития от изотопов водорода и накопившихся примесей обеспечивается наличием двух коллекторов лития для организации медленно текущего потока лития в объёме КПС (т.н. «проливка»). Оба коллектора связаны с внешней системой подпитки системой трубопроводов через сильфонные узлы. Система может быть гибко модифицирована под конкретные задачи: организация замкнутого контура циркуляции лития (рисунок 1б) с возможностью рекуперации во внешнем (сливном) баке захваченных изотопов водорода или подпитка через один из коллекторов для

восполнения потерь лития в КПС в ходе экспериментальных кампаний (рисунок 1в).

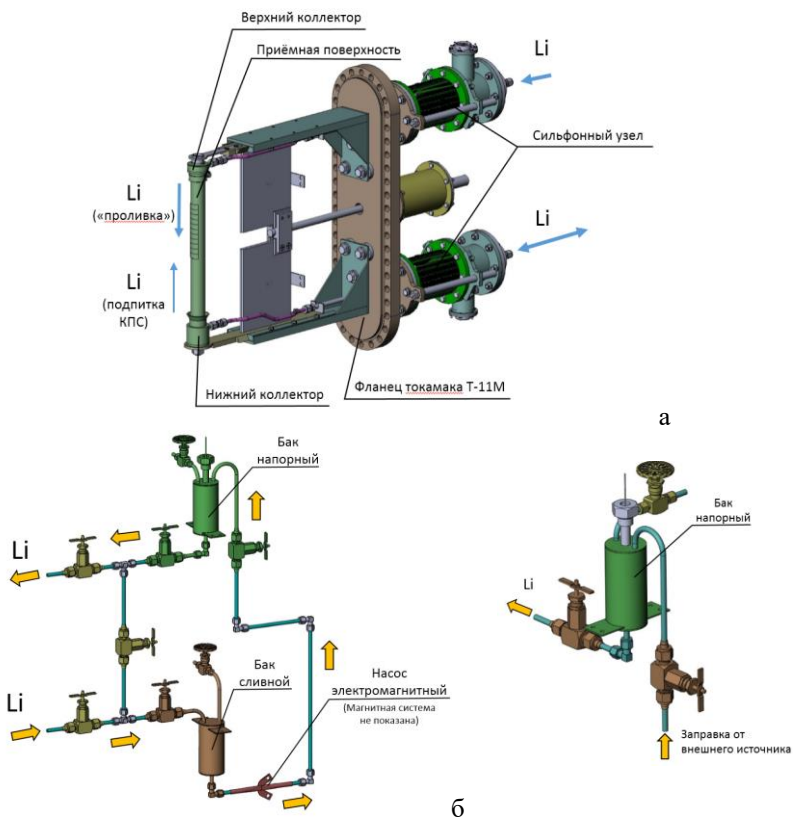


Рисунок 1 – 3D-модель лимитера литиевого квазистационарного типа токамака T-11M: а – лимитер; б – внешняя система подпитки для организации замкнутого контура циркуляции лития; в – внешняя система подпитки для подпитки одного из коллекторов

На первом этапе были проведены работы по отработке технологии подпитки устройства литием без разгерметизации вакуумной камеры для бесперебойной работы (выполнение требования №3). Внешняя система была собрана в варианте, показанном на рисунке 1в, и соединена через

быстроразъемный фиттинг и трубопровод с нижним коллектором (рисунок 2). После расходования лития в нижнем коллекторе была успешно реализована процедура подпитки путём перекачивания жидкого лития из питающего бака в нижний коллектор за счёт гидростатического давления столба жидкого лития или избыточного давления инертного газа.

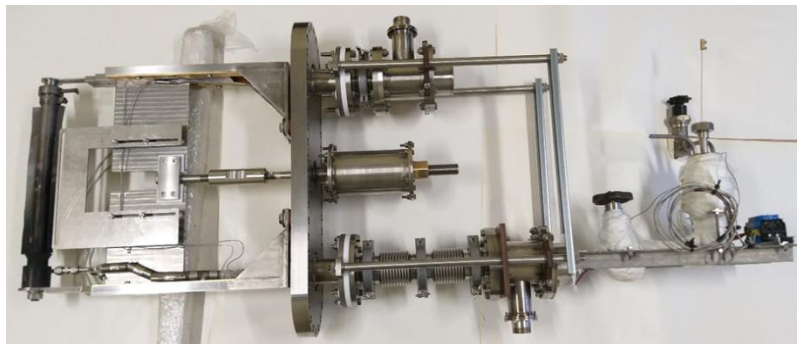


Рисунок 2 – Изготовленный лимитер литиевый квазистационарного типа токамака Т-11М с системой подпитки литием нижнего коллектора

Изготовленный лимитер токамака Т-11М может служить прототипом для литиевого лимитера токамака Т-15МД, однако для последнего понадобится активная система охлаждения для выполнения требования №1 об ограничении температуры в силу более длительного времени горения плазмы. В АО «Красная Звезда» был разработан вариант конструкции литиевого лимитера токамака Т-15МД квазистационарного действия (рисунок 3) для отработки технологии охлаждения приёмной литиевой поверхности. Расположение лимитера выбрано с учётом исключения воздействия пучков ускоренных электронов на приёмную поверхность. Лимитер токамака Т-15МД, как и прототип, имеет трубчатую конструкцию (рисунок 3б), однако внутри опорной трубы организован охлаждающий канал. В роли хладагента предполагается использовать диспергированный газожидкостный поток [2], [3], который будет образовываться в пневмогидравлической форсунке, находящейся на верхнем конце приёмной поверхности. На нижнем конце располагается коллектор лития, имеющий связь с внешней системой подпитки через трубопровод.

Проведённый комплекс работ позволяет перейти к созданию литиевого лимитера для токамака Т-15МД, учитывая все нюансы стационарного режима работы.

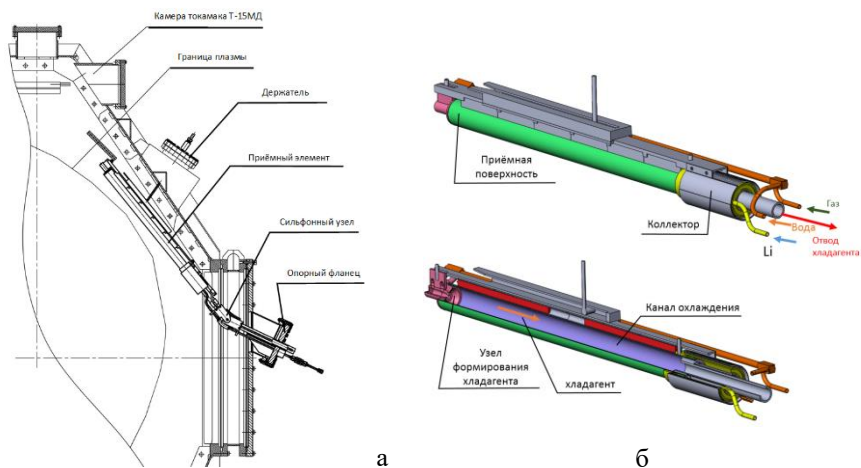


Рисунок 3 – Разработанный литиевый лимитер токамака Т-15МД: а – размещение в вакуумной камере токамака, б – приёмный элемент

Список использованных источников

- [1] Vertkov A.V., Lyublinski I.E., Zharkov M.Yu. In-vessel devices based on capillary-porous systems with liquid metal for a stationary tokamak. Plasma Physics Reports, 2018, Vol. 44, No. 7, pp. 664 – 670.
- [2] Вертков А.В., Комов А.Т., Люблинский И.Е. и др. Применение диспергированного газожидкостного потока для охлаждения жидкометаллического лимитера токамака Т-10 - ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 1, с. 57-64, doi: 10.21517/0202-3822-2017-41-1-57-64.
- [3] Захаренков А.В., Локтионов В.Д., Дедов А.В. и др. Применение диспергированного газожидкостного потока для охлаждения энергонапряженных элементов конструкций. - ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2021, т. 44, вып. 3 с. 1-10.

А.А. ПИСАРЕВ^{1*}, Л.Е. ЗАХАРОВ², А.В. ВЕРТКОВ³, В.В. ДУШИК⁴,
М.Ю. ЖАРКОВ³, М.С. КОЛЕСНИК⁵, И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ³, И.В.
МАЗУЛЬ⁵, П.Ю. ПИСАРЕВ⁵, Р.В. РУЛЕВ⁵, Г.М. ТАРАСЮК¹, А.А.
ШАПОРЕНКОВ⁴

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

²LiWFusion, USA

³АО «Красная Звезда», Москва

⁴Институт физической химии и электрохимии им А.Н.Фрумкина, Москва

⁵ОАО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», Санкт-Петербург

*aapisarev@mephi.ru

МАКЕТ ПРИЕМНОЙ ПЛАСТИНЫ ДИВЕРТОРА ТОКАМАКА, ОСНОВАННОГО НА КОНЦЕПЦИИ ТЕКУЩЕГО СЛОЯ ЖИДКОГО ЛИТИЯ

Использование жидкого лития в термоядерных установках показало его перспективность как материала, обращенного к плазме. Одна из концепций создания жидкометаллических поверхностей основана на организации тонкого слоя жидкого лития, текущего по пластине. Теоретические расчеты показывают, что такая система может кардинально изменить свойства плазмы и привести к тому, что энергетический выход термоядерной реакции будет в несколько раз выше затраченной энергии. Для сравнения лучший показатель на настоящее время равен 0.6.

Критическим элементом такой системы является пластина, поддерживающая текущий слой лития. Она должна обладать высокой теплопроводностью, не подвергаться коррозии в литии, хорошо смачиваться литием, обеспечивать равномерность тонкого текущего слоя, сохранять свои свойства при термоциклировании. Предыдущие работы за рубежом по созданию таких пластин были основаны на пайке тонкого листа нержавеющей стали на толстую медную теплоотводящую пластину на использовании взрывной сварки нержавеющей пластины и меди. В первом случае не удавалось получить хорошее однородное соединение по всей поверхности, что приводило к локальным перегревам и отслоению по границе раздела, а во втором толщина стали была слишком высокой, что сильно ухудшало теплопроводность.

По заданию РОСАТОМа проведена работа по разработке альтернативных технологий создания пластины, созданию макетов такой пластины и проведению их испытаний. Были созданы макеты по трем технологиям. Первая технология (мозаичная пайка в вакууме - МВП пластина) заключалась

в том, что на тонкий стальной лист напаялись под нагрузкой в вакууме небольшие (2×2 см) плитки меди толщиной 1 см. В этом случае по всей поверхности не возникали плохо пропаянные области, которые могли бы привести к локальным перегревам. Вторая технология (горячее изостатическое прессование -ГИП пластина) заключалась в том, что толстая медная пластина вакуумно плотно оборачивалась тонким стальным листом, пространство между ними откачивалось, откачное отверстие заваривалось, и сборка погружалась в газовую камеру под высоким давлением и нагревалась до высокой температуры. В результате диффузионной сварки стальной лист и медная пластина плотно соединялись по всей поверхности. Третья технология (химическое осаждение вольфрама из паровой фазы на медь CVD пластина) заключалась в том, что на поверхность медной пластины методом CVD осаждалось тонкое вольфрамовое покрытие. Толщина покрытия много меньше толщины стальных фольг, которые использовались в двух других методах, а теплопроводность вольфрама существенно выше теплопроводности нержавеющей стали. Это обеспечивает лучший теплоотвод от лития в систему охлаждения.

Были проведены испытания трех макетов на коррозию в литии, смачиваемость поверхности литием, равномерность течения лития по поверхности, отсутствие локальных перегревов при высоких тепловых нагрузках на поверхность и устойчивость свойств к термоциклированию.

Смачиваемость пластин оказалась ожидаемо хорошей при 600°C .



Рисунок 1 Устройство для исследования смачиваемости и вид капли лития после выдержки при температуре 340°C и 600°C



Рисунок 2 - Вид внешней и внутрикамерной частей для испытаний на течение лития

Течение лития по пластине исследовалось в вакууме. Степень покрытия поверхности и характер течения зависят от количества подаваемого на пластину лития. При малом количестве лития (0.2 г/с) пластина неполностью покрывается литием, несмотря на хорошую смачиваемость, а течение носит струйный характер. При увеличении количества подаваемого лития до 0.8 г/с степень покрытия возрастает до 85 %, и течение идет по всей пластине. Однако, тем не менее, слой лития оказывается неравномерным по толщине.



Рисунок 3 - Течение лития при расходе 0.2 г/с и 0.8 г/с

Тепловые испытания проводились на предмет однородности теплоотвода по всей поверхности пластины без образования пятен перегрева и на предмет стойкости пластины к термоциклированию в диапазоне 200-500°C. Локальные отклонения температуры от среднего значения не превышали 20K при средней температуре порядка 800K, то есть 2.5%. Неоднородность на ГИП пластинах связана с близостью каналов охлаждения, на МПВ пластинах неоднородностью теплоотвода в щелях, на CVD пластинах - наличием капель вольфрама при его осаждении на поверхность.



Рисунок 4 - Биметаллические ГИП, CVD и МПВ пластины на охлаждаемых медных подложках для тепловых испытаний

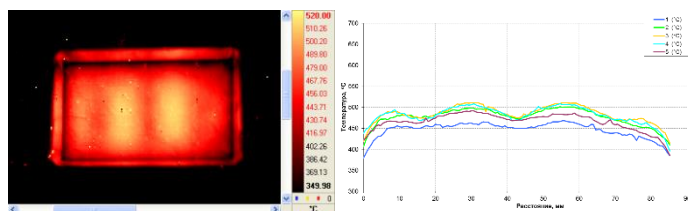


Рисунок 5 – Температурное распределение на поверхности ГИП пластины после 1000 циклов при плотности поглощенной мощности $8,04 \text{ МВт/м}^2$

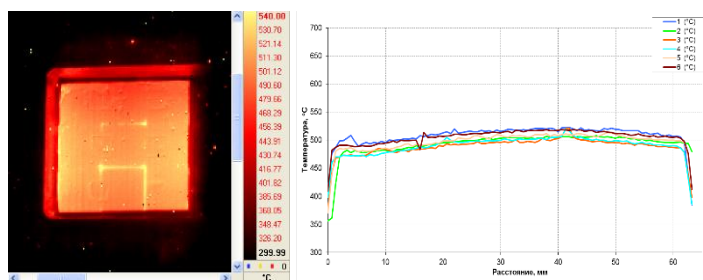


Рисунок 6 - Температурное распределение на поверхности MBP пластины при плотности поглощенной мощности $4,90 \text{ МВт/м}^2$ (720-й цикл)

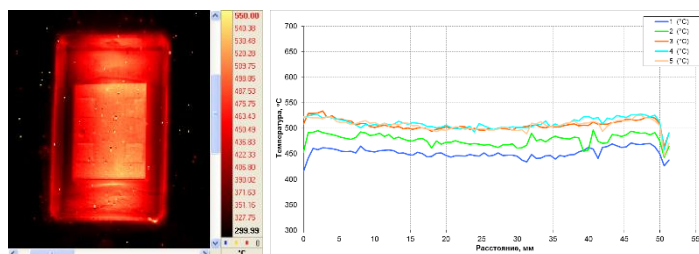


Рисунок 7 - Температурное распределение по поверхности CVD пластины при плотности поглощенной мощности $4,86 \text{ МВт/м}^2$ (170-й цикл)

Все три макета успешно прошли термоциклические испытания, что позволяет рассчитывать, на то, что эти технологии могут быть использованы при создании дивертора токамака, основанного на концепции текущего слоя жидкого лития. Работа выполнялась по контракту 774/152-Д с Частным учреждением по обеспечению научного развития атомной отрасли «Наука и инновации».

В.П. БУДАЕВ^{1,2*}, А.М. ЖИТЛУХИН³, Ю.В. МАРТЫНЕНКО¹, В.Л. ПОДКОВЫРОВ³, И.М. ПОЗНЯК^{3,4}, Д.В. КОВАЛЕНКО³, В.Ю. ЦЫБЕНКО³, З.И. НОВОСЕЛОВА^{3,4}, Е.Д. ФЕДУЛАЕВ^{3,4}, Д.А. БУРМИСТРОВ^{2,3}, С.Д. ЛИДЖИГОРЯЕВ^{3,4}, О.Р. ИСМАГИЛОВ³

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва

²Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

³ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Троицк, Москва

⁴Национальный исследовательский университет «МФТИ», Долгопрудный
budaev@mail.ru

ИСПЫТАНИЯ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ОБЛИЦОВКИ КУПОЛА ДИВЕРТОРА ИТЭР ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ НА КСПУ-Т: РЕЗУЛЬТАТЫ И ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ НА УСЛОВИЯ ИТЭР

При плазменных нагрузках в переходных процессах (ЭЛМах, срывах) в ИТЭР [1] ожидается сильная эрозия теплозащитной облицовки вольфрамового дивертора [2]. Наиболее опасными механизмами разрушения защитных покрытий являются макроскопические механизмы эрозии: течение и разбрызгивание расплава, а также – образование трещин [3,4].

В работе исследована эрозия вольфрамовых мишеней под действием мощных плазменных потоков и перемещения расплава. Рассматриваются два механизма образования неровностей на поверхности: неустойчивость Кельвина-Гельмгольца и формирование периодических возвышений – «пульсирующих бугров» [5-7]. Эти процессы обусловлены градиентом давления в узком плазменном слое, формируемым плазменным потоком, растекающимся вдоль поверхности мишени.

Эксперименты по облучению вольфрамовых мишеней интенсивными потоками водородной плазмы проводились на квазистационарном плазменном ускорителе КСПУ-Т (ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Троицк, Москва). Условия плазменного облучения соответствовали нагрузкам на диверторные пластины, ожидаемыми при ЭЛМах в ИТЭР. Для создания магнитного поля в области взаимодействия плазмы с образцом в мишенной камере КСПУ-Т установлены кольца Гельмгольца. Создаваемое ими магнитное поле достигало по величине 0,6 Тл.

Для экспериментов были изготовлены 4 мишени. Две из них имели форму квадрата со стороной 92 мм (Рис. 1а), две другие – прямоугольники со сторонами 92х122 мм. Каждая мишень состоит из плиток вольфрама марки В-

99.95-МП с размерами 30x30 мм и толщиной 3 мм, закрепленными на подложках из нержавеющей стали. Зазоры между соседними вольфрамовыми плитками - 0,5 мм.

Общая схема облучения мишеней плазмой представлена на Рис. 1б. Тепловая нагрузка Q на оси плазменного потока была 1,5 МДж/м², длительность воздействия составляла $t_{pl} = 0,75$ мс (эти условия, близкие к нагрузкам при ЭЛМах, ожидаемых в ИТЭР). В экспериментах варьировался угол падения плазмы на поверхность: $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 45^\circ$, а также величина магнитного поля в мишенной камере: $B = 0$ либо $B = 0,6$ Тл.

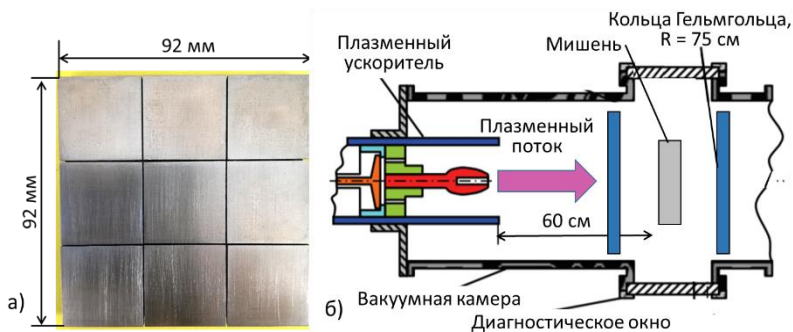


Рисунок 1 – (а) вольфрамовая мишень до облучения плазмой, (б) схема облучения мишеней плазмой на установке КСПУ-Т

Общий вид мишеней после воздействия плазменного потока, подающего по нормали к поверхности, представлен на Рис. 2. На поверхности можно выделить несколько областей, показанных пунктирными зелеными линиями. Непосредственно на оси потока, а также вблизи нее наблюдается блестящая гладкая поверхность застывшего расплава. Размеры этой области составляют $D \approx 3$ см. За ее пределами находится зона оплавления с шероховатой поверхностью. В ней наблюдаются пузырьки и капли из застывшего металла. На периферии плазменного потока можно видеть неоплавленную поверхность со следами осажденных продуктов эрозии.

При нормальном падении плазменного потока магнитное поле подавляет движение расплава, формирование капель и струй (Рис. 2б). При наклонном падении включение магнитного поля ведет к существенному усилению плавления вольфрамовых элементов (особенно их кромок), интенсификации течения расплава и образованию высоких наплывов на границах.

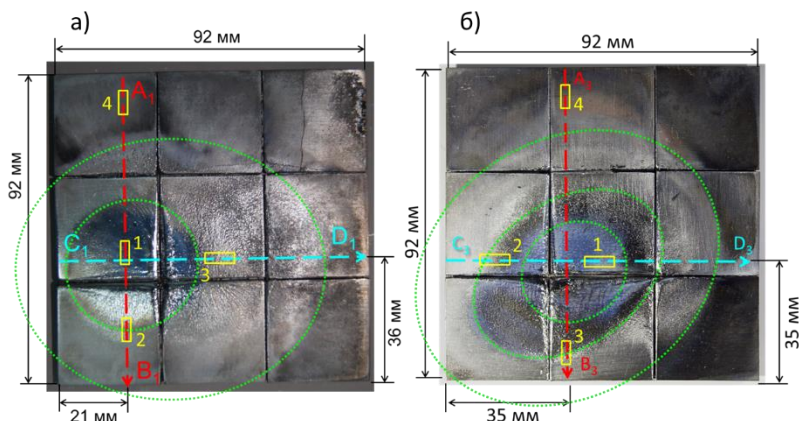


Рисунок 2 – Общий вид вольфрамовых мишеней после облучения плазмой, $\alpha = 0^\circ$: (а) $B = 0$ Тл, (б) $B = 0,6$ Тл

До и после воздействия плазмы был измерен рельеф на поверхности мишеней (вдоль пунктирных линий на Рис. 2). Измерения осуществлялись с помощью лазерного триангуляционного датчика RIFTEK-РФ603, перемещаемого шаговым двигателем по прецизионной линейной направляющей HIWIN. Такой датчик позволяет измерять расстояния до исследуемого объекта в диапазоне от 15 до 20 мм с точностью ≈ 1 мкм. Пространственное разрешение при этом определяется диаметром пятна лазера на исследуемом объекте и составляет 200 мкм.

Для подробного анализа были выбраны участки, протяженностью 6,5 мм, отмеченные на Рис. 2 желтым цветом. Участки соответствуют: 1 – центр зоны плавления, 2 и 3 – область расплава с неровностями и застывшими каплями, 4 – поверхность за пределами зоны плавления. На каждом участке вычислялась шероховатость R_a .

При нормальном падении плазменного потока включение магнитного поля ведет к уменьшению шероховатости примерно в 2 раза в области между центральной зоной плавления и не оплавленной поверхностью. В центральной и «невозмущенной» областях R_a остается практически без изменений и составляет ≈ 5 мкм.

При наклонном падении плазменного потока включение поля ведет к сглаживанию неровностей на поверхности расплава вблизи оси потока, в

направлении поперек его движения. Вдоль потока наблюдается незначительный рост шероховатости. В промежуточной области поперек потока происходит заметный рост неровностей с 4,7 до 8,0 мкм, при этом вдоль потока наблюдается обратный эффект – снижение Ra с 6,9 до 5,0 мкм. В невозмущенной области шероховатость остается практически без изменений.

Работа выполнена при поддержке ГК «Росатом» в рамках выполнения государственных контрактов № Н.4а.241.19.18.1027, № Н.4а.241.19.19.1009, № Н.4а.241.19.20.1042, ЕОТП-УТП-223, а также при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 18-29-21007.

Список использованных источников

- [1] Roth J. et al. – Journal of Nuclear Materials, 2009, V.390-391, P.1-9.
- [2] Будаев В.П. – ВАНТ, сер. Термоядерный синтез. – 2015. – Т.38, №4. – С. 5
- [3] Н.С. Климов, В.Л. Подковыров, А.М. Житлухин и др. Разбрызгивание вольфрама при воздействии интенсивного потока плазмы. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2009, т., вып.2. с.52-61.
- [4] Позняк И.М. и др. – ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез, 2012, Т.35, №4, С.23-33.
- [5] Ю.В. Мартыненко, Движение расплавленного слоя металла и капельная эрозия при воздействии плазменных потоков характерных для переходных режимов ИТЭР, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2014, т. 37, вып.2, с.53-59.
- [6] Ю.В. Мартыненко, Капельная эрозия металлов и экранирующий слой плазмы при воздействии плазменных потоков, характерных для быстрых процессов в токамаках, ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, 2017, том 43, No 3, с. 260–266.
- [7] Ю.В. Мартыненко, Повреждение пластин дивертора ИТЭР при срывах, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2021, т. 44, вып.3, с.111-116.

I. BORODKINA^{1,2}, D.V. BORODIN³, D. DOUAI⁴, D. TSKHAKAYA¹,
H. KUMPULAINEN⁵, E.DE LA CAL⁶, J. ROMAZANOV³, A. HUBER³ and JET
CONTRIBUTORS*

¹*Institute of Plasma Physics of the CAS, Za Slovankou 3, Prague, Czech Republic*

²*National Research Nuclear University MEPhI, 31, Kashirskoe sh., Moscow, Russia*

³*Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Energie- und Klimaforschung –
Plasmaphysik, Partner of the Trilateral Euregio Cluster (TEC), 52425 Jülich, Germany*

⁴*CEA, IRFM, F-13108 Saint Paul Lez Durance, France*

⁵*Aalto University, Espoo, Finland*

⁶*CIEMAT, Avda. Complutense, 40, Madrid 28040, Spain*

* See the author list of E. Joffrin et al. 2019 Nucl. Fusion 59 112021

OVERVIEW OF PLASMA-FACING COMPONENT EROSION AND IMPURITY MIGRATION STUDIES AT JET-ILW

The Joint European Torus (JET) is the largest tokamak in use and currently the only one capable of handling tritium (T). JET is equipped with the ITER-like wall (ILW) utilizing the same as ITER material combination: tungsten (W) divertor and beryllium (Be) main chamber providing the most relevant environment for ITER plasma-wall interaction studies [1].

One of the JET analysis and modelling tasks relevant to plasma-surface interaction (PSI) studies is the “Isotope wall content control and long-term erosion/migration interpretation”. Among other activities of this task in the previous years the strategy for reducing D wall inventory before T campaign (and T before D) to stay within neutron activation limits was elaborated [2], also various methods to monitor isotope ratio in the plasma were cross-validated. Code applications to JET-ILW experiments have helped to improve general erosion/migration/retention prediction capabilities including validation as well as various physics extensions for instance a treatment of dust particles transport.

This paper presents the main results of the recent task activities dedicated to analysis and modelling of Be and W erosion and migration at JET-ILW based on the previous and current H/D/T experiments at JET.

High impact energy threshold for W sputtering mostly prevents the erosion of divertor by fuel, except to intra-ELM. Therefore, erosion by impurities including Be is the main contributor in the inter-ELM or in the L-mode and ohmic phases of the pulse. Therefore, Be erosion and migration into the W divertor largely determines the W erosion which is critical for the plasma operation [3]. Moreover, chemically assisted physical sputtering (CAPS) of Be is the important contributor to Be erosion. The Be erosion yield for the mentioned processes were interpreted in

H/D plasmas based on the analysis of the recent dedicated experiment [4]. In the frame of this experiment the surface temperatures T_{surf} scans and impact ion energy scan (fuelling was varied) with various levels of CAPS suppression were obtained in D and H plasma. It was shown that Be CAPS magnitude and the $T_{\text{surf}} \sim 550^\circ\text{C}$ of full CAPS suppression do not dependent on H/D isotope. This finding supports the hypothesis that D or H outgassing is the determining factor. A larger fraction of BeH to atomic release in H plasma than BeD in the D plasma is observed. The analysis of the ohmic limiter plasmas has been done using spectroscopy data to obtain the D and eroded Be fluxes and, thus, study the isotope effect on Be effective sputtering yields ($Y_{\text{eff Be}}$) (Fig.1). Applying the simplified S/XB [5] method to BeII 527 light emission (characterizing a total erosion of Be including CAPS) a 2 times larger Be effective sputtering yields ($Y_{\text{eff Be}}$) was obtained in D plasma compared with H plasma. A good agreement with published data was obtained as well. One can see that the increase of the erosion in T is larger than could be expected just from the SDTrimSP calculated [6] physical sputtering yields just crudely proportional to the 1:2:3 isotope masses.

Impurity transport and plasma-surface interaction codes are widely used to simulate material erosion and migration. A powerful tool ERO2.0 [7] for erosion and migration modelling is applied for simulation of Be erosion and transport considering 3D wall geometry and machine-sized simulation volumes. ERO2.0 code was recently updated by adding important new physics into the code. The homogeneous mixing model was successfully implemented into ERO2.0 code and benchmarked against ERO1.0 in the quasi steady-state wall conditions of the long-term exposure experiment in divertor configuration, by simulating the Be/W erosion and deposition on tile 5 at JET [8]. The Guiding Center Approximation was implemented into ERO2.0 code allowing to speed-up the code performance by factor of 9 [9]. The work on the implementation and validation of radial and parallel electric fields and thermoforces in ERO2.0 is ongoing based on the JET related data (heat fluxes and electric fields) provided by the plasma edge modelling code EDGE2D-EIRENE.

EDGE2D-EIRENE background plasmas for several H-mode JET plasmas in D and T have been executed to simultaneously reproduce multiple diagnostics, including the upstream (HRTS) and outer divertor target (Langmuir probes) electron temperatures and densities. Edge-localized mode (ELM) simulation is conducted by adjusting ELM parameters to reproduce the time evolution of n_e , T_e , plasma stored energy, divertor heat flux, Be II emission and D-alpha emission during the ELM cycle. The plasma backgrounds obtained by EDGE2D-EIRENE code were implemented into ERO2.0 code and 2D distribution of W density was calculated (Fig.2). It was shown that W primary erodes at strike points, however the

W screening is expected to be very efficient. The simulations imply that the charge exchange atoms significantly contribute to W erosion at the outer divertor entrance, which determine the core W content.

In view of the D-T experiments at JET it is important to simulate the plasmas with different isotope ratios and predict the SOL plasma parameters. The full kinetic modelling of JET SOL with different D/T mixture was conducted by the particle-in-cell (PIC) full kinetic massively parallel code for SOL modelling BIT1 [10]. The plasmas with three isotope D/T ratios as 25/75, 50/50 and 75/25 were simulated with the Ne as main seeded impurity. It was shown that the relative concentration of the main ions in the JET D+T SOL is uniform except the divertor plasma, where the deviation from the upstream value can reach up to 50%. The main sheath parameters were studied. Main ion flow to the divertor is approaching the sonic (Mach number (M) $\sim 0.6 - 1.0$), however the impurity flow is supersonic ($M > 2$). Divertor sheath parameters are shown to be independent of relative D/T concentration. The next step is the model validation by the JET experimental data. The second direction of the kinetic modelling work was the simulation of ELMs at JET. ELMs of different size and pedestal temperature were considered with and without Ne seeding. Fig 3 demonstrates the intra-ELM power loads at the outer divertor during ELM duration ($\sim 80 \mu s$) for the selected ELM size with and without Ne seeding. One can see a non-buffering of power target loads by Ne impurity during ELMs. It should be noted that only Ne and Ne^+ were included in the simulation, however simulation with the updated Ne model is ongoing. The kinetic simulation of the sheath parameters during ELM showed that divertor T_e reaches $\sim 0.7-0.9 T_{ped}$ for short time interval $\sim 20 \mu s$. One can conclude that there is no significant ELM electron-to-ion energy transfer in the SOL. The estimation of intra-ELM W sputtering source demonstrated the W sputtering increases and the inner/outer sputtering asymmetry decreases with increasing ELM size which is in a good agreement with experimentally observed scaling [1]. The average energy of D ions absorbed at the outer divertor scales as $E_i \sim (2-3)T_{ped}$ (Fig.4) which is in agreement with experimental work [11] and the analytical approach [12] for estimation of an intra-ELM W sputtered influx using Langmuir probe measurements considered the time-resolved pedestal temperature and density drop during the pedestal crash during ELM. The effect of plasma filaments appearing during ELMs on the JET Be limiter erosion was assessed for the first time [12].

The analysis and modelling studies in the frame of this task highly support the current experimental H/D/T campaigns at JET and the task activities aimed to extrapolate Be erosion and migration with impact on W erosion to ITER are ongoing.

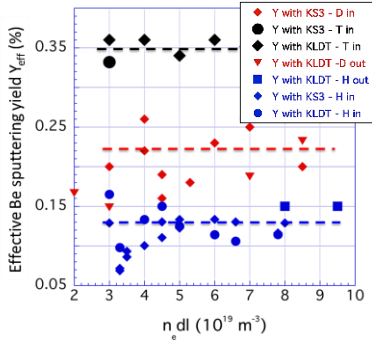


Figure 1. The measured Be sputtering yields in H, D and T plasmas at inner and outer wall (KS3 – horizontal sightline of spectrometers; KLDT – wide-angle view visible cameras with BeII filter).

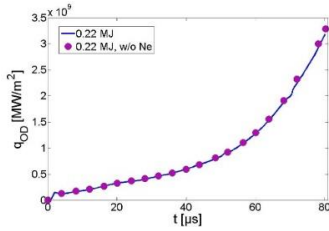


Figure 3. Intra-ELM power loads at the outer divertor during ELM duration ($\sim 80 \mu\text{s}$) with and without Ne seeding

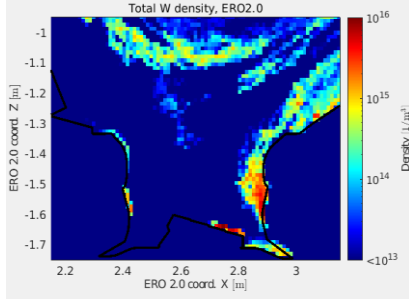


Figure 2. 2D W density distribution in divertor simulated by ERO2.0 for JET H-mode plasma

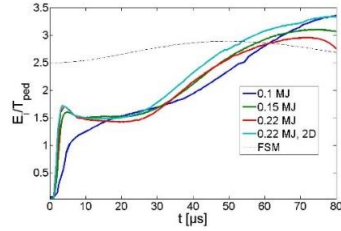


Figure 4. Intra-ELM average impact ion energy at the outer divertor scales as $E_i \sim (2-3) T_{ped}$

List of references

- [1] G. Matthews et al. Phys. Scr. T145 014001 2011
- [2] I.Borodkina, D.Douai et al, EPS contribution, 2019
- [3] S. Brezinsek et al, Nucl. Fusion 55 063021 2015
- [4] D.Borodin, EPS contribution, 2021
- [5] A Pospieszczyk et al, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 43 144017 2010
- [6] W.Eckstein, Top. Appl. Phys. 110 33–187 2007
- [7] J.Romazanov et al., Phys. Scr. 2017 014018 2017
- [8] M. Navarro et al, PSI conference, 2021
- [9] S. Rode et al, submitted to CPP, 2021
- [10] D. Tskhakaya Plasma Physics and Controlled Fusion 59(11) 2017
- [11] A Huber et al, Phys. Scr. 96 124046 2021
- [12] I. Borodkina et al, Phys. Scr. 014027 2020

В.А. ПОПОВ^{1,2*}, А.С. АРАКЧЕЕВ^{1,3}, И.В. КАНДАУРОВ¹, А.А. КАСАТОВ^{1,2},
В.В. КУРКУЧЕКОВ¹, Ю.А. ТРУНЕВ¹, А.А. ВАСИЛЬЕВ¹,
Л.Н. ВЯЧЕСЛАВОВ¹

¹*Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск*

²*Новосибирский государственный университет*

³*Новосибирский государственный технический университет*

**v.a.popov94@gmail.com*

ТЕРМОТОК В ВОЛЬФРАМЕ И ПРИПОВЕРХНОСТНОМ ИСПАРЁННОМ СЛОЕ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРЕВЕ

Предложена модель возникновения замкнутого тока при импульсном неоднородном нагреве до температур существенно выше порога плавления вольфрама. При нагреве существенно выше порога плавления испаряющийся газ становится плазмой и начинает проводить токи. Тогда за счёт различий между термодинамикой плазмы и твёрдого материала возникает не потенциальная сила, которая приводит к возникновению замкнутого тока, протекающего вокруг границы сред. При этом величина тока пропорциональна градиенту температуры на границе. Предложенная модель применяется к установке ВЕТА для описания наблюдавшегося ранее вращения расплава. Теория не требует наличия внешнего источника заряда и может быть применена к нагреву иными способами, например излучением.

Н. В. ДАВЫДОВ^{1,2*}, А. С. АРАКЧЕЕВ², А.А. ВАСИЛЬЕВ², Л.Н.
ВЯЧЕСЛАВОВ², И.В. КАНДАУРОВ², А.А. КАСАТОВ^{1,2}, Д.Е.
ЧЕРЕПАНОВ²

¹Новосибирский государственный университет

²Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН

*davnl2000@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПЛАСТИН ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРЕВЕ

Вольфрамовый дивертор ИТЕР будет подвержен значительной тепловой нагрузке. Из-за бомбардировки покидающими термоядерную плазму частицами температура поверхности его пластин будет повышаться, что приведет к тепловому расширению материала. В связи с этим в пластинах будет появляться механические напряжения.

Для изучения процесса повреждения металла была разработана диагностическая система (на установке ВЕТА), которая позволяет бесконтактным и неразрушающим методом in-situ наблюдать напряжения в вольфрамовых пластинах, подвергающихся термическому удару.

Принцип работы системы состоит в регистрации изменения размера лазерного пучка, отражаемого от полированной до зеркального блеска поверхности образца, обратной к нагреваемой. Исходя из малости изгиба, можно считать, что пластина изгибается в сектор сферы.

Подобный изгиб вряд ли будет замечен для реального детектора, но может быть использован для измерения напряжения в материале в упомянутой выше диагностической системе. Теоретическое исследование данного процесса необходимо для лучшего понимания поведения материала, предсказания долгосрочных последствий тепловой нагрузки и долговечности дивертора.

В рамках приведенной работы рассматривалось поведение круглой пластины под тепловой нагрузкой, описываемое уравнением Кирхгофа-Лява:

$$\Delta^2 W + \frac{\rho h}{D} \frac{\partial^2}{\partial t^2} W = - \frac{1}{(1 - \sigma) D} \Delta M_T(t, r)$$

где W – прогиб пластины, ρ – плотность материала пластины, h – толщина пластины, σ – коэффициент Пуассона, $D = \frac{Eh^3}{12(1 - \sigma^2)}$ (E – модуль Юнга),

M_T – момент внутренних упругих сил, вызванный тепловым расширением. Решение ищется методом Фурье для различных краевых условий.

В результате получена динамика поведения абсолютно упругой пластины под тепловой нагрузкой. Для функций теплового момента, характерное время изменения которых близко к периоду основной гармонике пластины, развиваются колебания с данным периодом, что также отмечено в эксперименте. Результат моделирования будет сравниваться с экспериментальными данными с установки ВЕТА для определения роли возбуждаемых нагревом упругих колебаний в деформации пластины.

Кроме динамического моделирования проводились расчёты статических напряжённо-деформированных состояний пластины во время и после мощного импульсного нагрева. Этот случай соответствует быстро затухающим колебаниям. Основа модели пластичности была взята из работы и дополнена экспоненциальной релаксацией пластической деформации с задаваемым характерным временем. Экспериментальные результаты оказались между результатами численных расчётов для бесконечно быстрой и бесконечно медленной пластической деформации. Видимо, для корректного описания деформаций и напряжений при мощном импульсном нагреве длительностью от 100мкс до 1мс требуется учёт конечной скорости пластической деформации.

А.А. ВАСИЛЬЕВ^{1,3*}, А.С. АРАКЧЕЕВ^{1,3}, А.В. БУРДАКОВ^{1,3},
Л.Н. ВЯЧЕСЛАВОВ^{1,2,3}, И.В. КАНДАУРОВ¹, А.А. КАСАТОВ^{1,2,3},
В.В. КУРКУЧЕКОВ^{1,2}, А.Г. МАКСИМОВА^{1,2,4}, В.А. ПОПОВ^{1,2},
А.А. РУКТУЕВ^{1,3}, Д.Е. ЧЕРЕПАНОВ^{1,2,3}, А.А. ШОШИН^{1,2}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

⁴Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук

*Alex.Alex.Vasilyev@gmail.com

ДИНАМИКА ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМА ПОСЛЕ ОБРАЗОВАНИЯ СЕТИ ТРЕЩИН ВО ВРЕМЯ ТЕПЛОВОГО УДАРА

Разрушение плазмоприемников в токамаке ИТЭР в течении всего срока эксплуатации является одной из его основных проблем. Для уменьшения возникающих тепловых потоков линии индукции магнитного поля падают на пластины дивертора под скользящими углами около 4-5° [1]. Кроме того, во время эксплуатации ИТЭР нельзя полностью исключить быстрые переходные процессы, такие как ЭЛМы типа I. Они вызывают быстрые тепловые нагрузки и могут привести к появлению сети трещин на вольфрамовых пластинах. Предыдущие эксперименты показали, что поверхность вблизи краев трещин поднимается, отклоняясь на угол около 0,5° [2], что может изменять угол падения теплового потока и его поверхностную плотность мощности. Данная работа посвящена динамике формы поверхности вольфрамовых пластин после растрескивания при последующих термических нагрузках.

Экспериментальное моделирование быстрых тепловых ударов на вольфрамовые пластины проводилось на стенде с электронным пучком ВЕТА (Beam of Electrons for material Test Applications) в ИЯФ СО РАН. Образцы полировались до зеркального состояния, чтобы использовать диагностику с лазерной подсветкой [3]. Принцип работы этой диагностики основан на том, что при растрескивании области поверхности по разные стороны от трещины поднимаются и отклоняются на угол около 1° в противоположные направления. Если построить изображение облучаемой поверхности и

разместить экран за плоскостью изображения, то расходящиеся лучи образуют темные полосы, соответствующие рельефу растрескавшейся поверхности. Это позволяет отслеживать не только момент появления трещин, но и изменение формы поверхности, которое связано с дальнейшей деформацией образца. Во время эксперимента также измерялись распределение температуры на поверхности и её ход в нескольких областях образца.

Вольфрамовые пластины облучались тепловым ударом с параметром потока тепла около $20 \text{ МДж/м}^2\text{с}^{0.5}$ и длительностью до 1000 мкс, что меньше порога плавления вольфрама. После нескольких импульсов на поверхности образовывалась сеть трещин и края трещин поднимались. На образце появлялась протяженная структура поднятий материала, которую можно было наблюдать *in situ* по увеличению интенсивности рассеянного лазерного света и изменению картины изображения [4]. После этого образцы подвергались дополнительным тепловым ударам. При последующем нагреве материал с трещинами достигает того же состояния пластических деформаций при максимальной температуре, что и до растрескивания. Это приводит к тому, что структура поднятий разравнивается во время теплового удара, в результате чего происходит уменьшение интенсивности рассеянного света и исчезновение сети неоднородностей на изображении поверхности. После окончания нагрева материал остывает и происходит обратная деформация, но механической связи между краями трещины нет, поэтому поверхность вблизи краев трещины деформируется сильнее и угол её отклонения от исходной плоскости увеличивается. Описанное увеличение структуры поднятий вызывает дополнительный рост интенсивности рассеянного света и уширение неоднородностей на картине изображения.

После нескольких импульсов происходит стабилизация динамики рельефа поверхности. Изменяя время запуска камеры можно получить серию снимков поверхности в разное время теплового удара (рис. 1). Длительность теплового удара составляла 700 мкс. На рисунке 2 видно, что темные полосы, соответствующие поднятиям поверхности, пропадают к концу облучения, и потом снова появляются с охлаждением поверхности. Из полученных данных следует, что при импульсном нагреве после растрескивания вольфрама происходит распрямление поднятий и смыкание краев трещин к концу облучения. После окончания теплового удара края трещины снова расходятся, а на поверхности появляется структура поднятий. Образцы были исследованы *post mortem* с помощью СЭМ и оптического профилометра для определения параметров модификации поверхности: ширины трещин, профилей

возвышений, шероховатости и т.д.

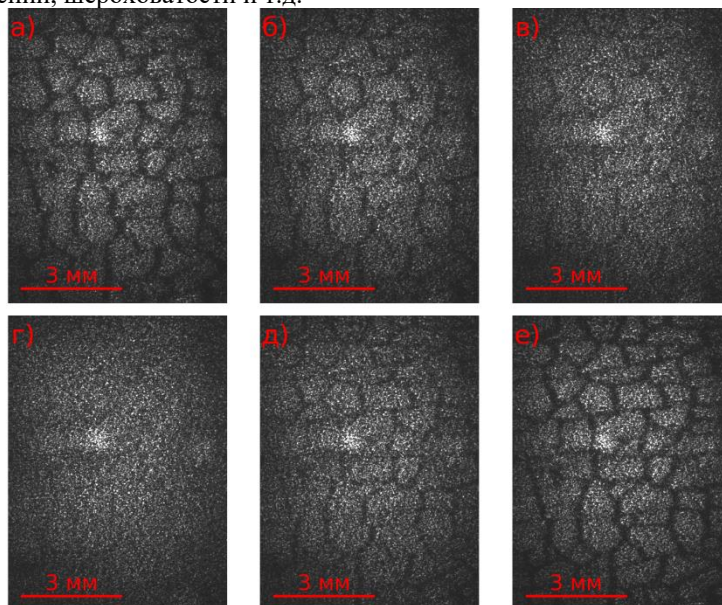


Рис. 1 – Снимки поверхности образца при облучении после растрескивания, полученные в разные моменты времени теплового удара. а) 85–105 мкс, б) 285–305 мкс, в) 385–405 мкс, г) 680–700, д) 880–900 мкс, е) 1580–1600 мкс.

Список использованных источников

- [1] R.A. Pitts, et al., Nucl. Mat. and Energy 20 (2019) 100696
- [2] A.S. Arakcheev, et al., Nucl. Mat. and Energy 20 (2019) 100677
- [3] A.A. Vasilyev, et al., Fus. Eng. and Design 146 (2019) 2366-2370
- [4] L.N. Vyacheslavov et al., Phys. Scr. 93 (2018) 035602

Р.А. СЕЛИВАНОВ¹, И.А. СОРОКИН^{1,2}, С.А. КРАТ^{1*}, Н.С. СЕРГЕЕВ^{1,3}, Д.В. КОЛОДКО^{1,2}, Ф.С. ПОДОЛЯКО¹, Е.А. ФЕФЕЛОВА¹, О.В. ВОЛКОВА⁴, В.В. ЗАХАРОВ⁴

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Россия, Фрязино Московской обл.

³Национальный исследовательский институт «Курчатовский институт», Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

⁴Институт высокотемпературной электрохимии Уро РАН, Россия, Екатеринбург
*stepan.krat@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ БОР-ЛИТИЕВОГО КОМПОЗИТА ПОД ДЕЙСТВИЕМ МОЩНЫХ ТЕПЛОВЫХ И ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ НАГРУЗОК

Выбор материала обращённых к плазме элементов (ОПЭ) термоядерной установки – ключевой вопрос, определяющий её работоспособность. Одним из перспективных материалов является литий, использование которого предполагается в рамках концепции жидкометаллической стенки термоядерной установки. Преимущества лития по сравнению с другими материалами состоят в его минимально возможном атомном номере ($Z=3$), хорошей совместимости с водородной плазмой, низкой энергией ионизации, широким диапазоном температур, в котором он может применяться (от температуры плавления $\sim 180^\circ\text{C}$ до $\sim 1000^\circ\text{C}$). Эксперименты на токамаках с жидколитиевыми ОПЭ показали положительные эффекты применения лития на термоядерную плазму (уменьшение водородного рециклинга, уменьшение эффективного заряда плазмы, подавление неустойчивостей). Из всех существующих технологических решений, связанных с применением лития, наиболее развитым является использование капиллярно-пористых систем (КПС), наполненных литием, в качестве ОПЭ. При соблюдении условия хорошей смачиваемости, правильном выборе материала и конструкции матрицы, КПС с жидким литием способны выдерживать тепловые нагрузки $\sim 10\text{ МВт/м}^2$. К недостаткам существующих КПС следует отнести сложность в их обслуживании, невозможность ремонта в случае локального разрушения матрицы, например в случае локального истощения лития, большой атомный номер тугоплавких металлов, используемых в качестве материала матрицы.

С точки зрения КПС как ОПЭ, оптимальным является материал матрицы с малым атомным номером, хорошо совместимый с термоядерной плазмой, хорошо смачиваемый литием, и лёгкий в обработке.

Бор-литиевый композит (БЛК) представляет собой матрицу борида лития Li_7B_6 , заполненную металлическим литием. Массовый состав БЛК: $\sim 80 \pm 4$ мас.% Li, $\sim 20 \pm 4$ мас.% В. БЛК применяется в качестве материала анодов химических источников тока, работающих при высоких температурах ~ 500 - 600 °С, т.к. обладает высоким коэффициентом адгезии лития в матрице борида, что обеспечивает высокой пластичностью и легкую механическую обработку материала, при этом физико-химические свойства лития не претерпевают изменения. БЛК сохраняет свои механические свойства до температуры ~ 800 °С. Всё это делает БЛК материалом, потенциально перспективным для использования в ОПЭ менее нагруженных элементов первой стенки токамаков с литиевыми элементами.

Были проведены первые испытания образцов БЛК как материала ОПЭ под тепловой нагрузкой электронным пучком и плазменной нагрузкой гелиевой плазмы. Испытания проводились на установке ПР-2 с пучково-плазменным разрядом. В качестве образцов использовались БЛК $\sim 25 \times 25 \times 5$ мм без активного охлаждения. Во время испытаний проводилась ИК-термометрия поверхности образца, измерение температуры обращённой к плазме/электронному пучку поверхности и задней поверхности образца, а также измерение параметров плазмы при помощи зонда Ленгмюра, масс-спектропии ионных потоков и обзорной оптической спектроскопии. Поверхность БЛК изучалась до и после испытаний при помощи сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионной спектроскопии. Для более подробного изучения структуры БЛК были проведены дополнительные исследования, в которых литий был выпарен из БЛК путём его нагрева до ~ 500 °С в вакууме радиационным нагревателем и длительной выдержки.

Было установлено, что БЛК после выпаривания из него лития в вакууме представляет собой разупорядочено переплетённые волокна борида лития. Толщина волокон составляет ~ 1 мкм, длина более 50 мкм, характерное расстояние между волокнами ~ 5 мкм. Стоит отметить, что после выпаривания лития объём БЛК увеличился в ~ 3 раза, поэтому можно ожидать, что изначально расстояние между волокнами меньше наблюдаемого.

Испытания БЛК под действием электронного пучка проводились с пучком диаметром 30 мм при остаточном давлении 5×10^{-6} мбар и максимальной мощностью теплового потока 1 МВт/м² (при фиксированной энергии электронного пучка - 4 кэВ). Во время испытаний мощность теплового потока варьировалась с помощью тока эмиссии электронной пушки ступенчато с фиксированным шагом. После каждого увеличения мощности достигалось

стационарное состояние температуры обращенной к пучку поверхности образца с помощью одной из установленных на держателе термопар.

В ходе испытаний БЛК под нагрузкой гелиевой плазмы рабочее давление гелия в камере установки составляло 0.01 – 0.02 мбар, мощность разряда варьировалась с помощью настроек электронной пушки (ток эмиссии и ускоряющий потенциал) для монотонного нагрева образца, контролируемого с помощью встроенных термопар. Мощность разряда также как и в тепловых испытаниях БЛК увеличивалась ступенчато с достижением стационарного значения температуры обращенной к плазме поверхности образца. Ионный поток из плазмы, плотность которой лежала в пределах $(1-5) \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$, электронная температура – (2-5) эВ, достигал величины $\sim 10^{21} \text{ м}^{-2}$. Энергия ионов из плазмы достигала величины порядка потенциала плазмы (~ 10 эВ).

Как под действием электронного пучка, так и под действием гелиевой плазмы сохраняется целостность образцов, не наблюдается ярко выраженной капельной фазы. При этом по истощению лития в объеме БЛК наблюдается существенное уменьшение линейных размеров образца БЛК, стягивание матрицы к области воздействия на образец. После облучения наблюдается значительное изменение морфологии поверхности образцов как на макро-, так и на микроскопическом уровне.

Под действием электронного пучка испарения бора из образцов не происходило, что подтверждают масс-анализ ионного потока и оптическая спектроскопия (в спектре преобладают линии атомарного лития 670нм). При воздействии гелиевой плазмы происходит активное распыление бора из БЛК. Об этом свидетельствует то, что в массовом составе ионного потока из плазмы присутствует ярко-выраженная компоненте бора; при этом компоненты лития и его производных вносят заметный вклад в состав ионного потока только при мощностях разряда более 500 Вт.

Таким образом по результатам первых испытаний можно говорить о том, что БЛК может быть перспективен как материал ОПЭ, следует продолжать исследования. Можно ожидать, что при активной подпитке БЛК литием, а также при активном охлаждении поверхности БЛК, например при реализации циркуляции жидкого лития с постоянной температурой в контакте с задней поверхностью БЛК, БЛК способен будет выдерживать высокие стационарные плазменные нагрузки в течение длительного времени без разрушения.

К.А. РОГОЗИН^{1,2*}, В.П. БУДАЕВ^{1,2}, С.Д. ФЕДОРОВИЧ¹, А.В. КАРПОВ^{1,2},
М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ¹, А.П. СЛИВА¹, А.Ю. МАРЧЕНКОВ¹, В.Ч. КУАНГ¹,
В.С. КВАСКОВ^{1,2}, А.А. КОНЬКОВ¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ»

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

*RogozinKA@mpei.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОЙ И ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ НАГРУЗОК НА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ ТОКАМАКА-РЕАКТОРА

Тепловые и плазменные потоки во время работы токамака-реактора будут оказывать значительное влияние на поверхность первой стенки. Из-за высокой плотности мощности элементы первой стенки из вольфрама будут испытывать неравновесный кратковременный нагрев с высоким градиентом температур по сечению. Это будет приводить к плавлению, растрескиванию, эрозии, а также к их модификации и росту наноструктур в т.ч. типа «пух» [1].

Для исследования свойств подобных структур необходимо проводить эксперименты с комплексным воздействием мощной стационарной плазменной и импульсной дуговой, лазерной и электронно-пучковой нагрузкой на поверхность первой стенки токамака-реактора. При этом, результат воздействия комплексными тепловыми нагрузками сильно отличается от отдельного воздействия стационарными плазменными потоками, лазерного или электронно-пучкового облучения.

На установке ПЛМ-М в НИУ МЭИ созданы условия для проведения экспериментов с воздействием плазменной и лазерной нагрузки [2]. ПЛМ-М позволяет получать плазму в стационарном режиме со свойствами пристеночной плазмы токамака: магнитное поле 0.25 Тл, плотность электронов $10^{19} - 10^{20} \text{ м}^{-3}$, электронная температура 2-3 эВ, тепловая нагрузка на мишень до 10 МВт/м^2 , ионный поток (гелий, аргон) на мишень $10^{23} - 10^{25} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$. ПЛМ-М оборудована стендом на основе импульсного лазера Nd:YAG модели LQ529A с длиной волны излучения $\lambda = 1064 \text{ нм}$ и энергией импульса до $E = 500 \text{ мДж}$, длительность импульса 10 нс.

Проведено исследование влияния комбинированных плазменных и лазерных нагрузок на гладкую и пористую наноструктурированную поверхность вольфрама. Проведено исследование влияния комбинированных плазменных и электронно-пучковых нагрузок на пористую

наноструктурированную поверхность вольфрама.

Для исследования влияния комбинированной плазменной и лазерной нагрузки на поверхности вольфрамового модуля была сформирована высокопористая поверхность в плазме установки ПЛМ-М. Плотность теплового потока плазмы на поверхность было 2 МВт/м^2 . На поверхности модуля из вольфрамовой пластины температура достигала 1850°C . Для локального увеличения плотности плазмы использовалось испарение вольфрама с поверхности под действием лазерного излучения. Площадь пятна лазера при фокусировке на поверхности - $0,725 \text{ мм}^2$ (форма – эллипс). Плотность мощности в импульсе на поверхности образца могла достигать величины $21 \times 10^{12} \text{ Дж м}^{-2} \text{ с}^{-1/2}$, что превышает порог испарения вольфрама.

Данные, полученные с помощью оптической диагностики приповерхностной плазмы, подтвердили испарение вольфрама с поверхности, облучаемого лазером. Микроскопические исследования показали, что вся поверхность образца покрылась высокопористыми структурами. В области лазерного облучения наблюдается переплавление поверхности пористого слоя с сохранением пор под ним. Образуется многослойная структура поликристаллический вольфрам – пористая структура – поликристаллический вольфрам. Часть пор оказывается под слоем оплавленного металла. Растрескивание материала практически отсутствует.

Был проведен контрольный эксперимент для шлифованного вольфрама. Образец подвергался облучению плазмой в аналогичных условиях и при той же температуре образца. Облучение лазером было проведено до начала роста пуха. Выявлено значительное оплавление и растрескивание материала в зоне облучения.

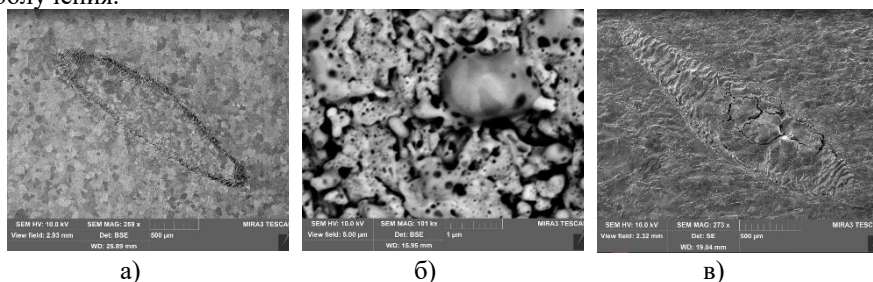


Рис.1. фото поверхности вольфрама после комбинированного облучения плазменной нагрузкой и лазерным импульсом, б) фото пористой структуры с оплавленным слоем, в) фото поверхности шлифованного вольфрама после воздействия лазерного импульса

Кардинальные различия последствий лазерного облучения на гладкую и наноструктурированную поверхность можно объяснить эффектом поглощения лазерного излучения в верхнем слое пористой пленки, при этом тепловой контакт нагретых волокон с поверхностью уменьшен в сравнении со сплошной средой, градиенты температуры на поверхности подложки сплошного металла ниже, что и приводит к купированию механизмов крупномасштабного растрескивания.

Влияние электронно-пучковых нагрузок на наноструктурированную поверхность в корне отличается от воздействия лазера. Для проведения исследований в установке ПЛМ-М на образце вольфрама была получена развитая наноструктурированная поверхность. Затем данный образец был перемещен в установку АЭЛТК-344-12 с энергоблоком ЭЛА-40И. Для проведения испытаний был выбран режим импульсной нагрузки. Температура боковой поверхности поликристаллического вольфрама достигала 850°C . Плотность мощности на поверхности превышала 50 МВт/м^2 . В результате анализа поверхности растровым электронным микроскопом выявлено что на участках чистого пуха наблюдается незначительное увеличение плотности на наиболее выступающих участках пуха, по сравнению с исходным состоянием. Следов эрозии поверхности, таких как плавление, растрескивание обнаружено не было. При попадании примесных частиц на пух наблюдается увеличению эрозии, растрескиванию поверхности и разрушение слоя пуха вокруг частицы.

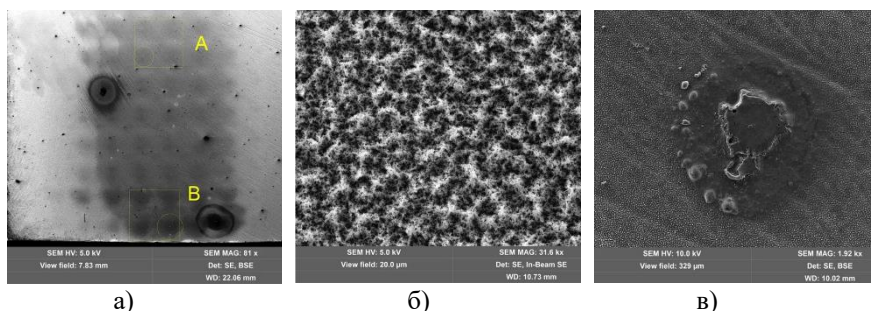


Рис. а) фото поверхности вольфрама после комплексного воздействия плазмы и электронного пучка, б) фото наноструктуры типа пух в области воздействия пучка, в) область попадания примеси на поверхность

Результат стойкости пуха может быть объяснен высокой рассеивающей

способностью слоев, которая обеспечивается огромной удельной площадью поверхности и физическими параметрами строения слоя пуха. Необходимо учесть, что максимум энерговыделения находится на некоторой глубине. Однако, глубина проникновения электронного пучка в пористый материал не изучена.

Таким образом, в условиях работы токамака-реактора, комплексное влияние роста наноструктур и воздействия дуговых процессов и ЭЛМов на материал первой стенки может приводить к формированию пористого слоя, запертого оплавленным металлом. Вследствие чего, такая структура может накапливать в себе тритий, что негативно сказывается на работе установки. При этом, такие структуры оказались устойчивы к воздействию электронным пучком с энергией, вызывающей разрушение поверхности шлифованного вольфрама.

Работы по созданию лазерного комплекса установки ПЛМ-М проводились благодаря проекту Госкорпорации "Росатом" № 223 ЕОТП-УТП 774/158-Д. Работы по исследованию взаимодействия лазерного излучения с наноструктурированным вольфрамом поддержаны грантом РНФ № 17-19-01469-П по теме № 3051170 за 2021 г. Работы по исследованию взаимодействия электронного пучка с наноструктурированным вольфрамом поддержаны грантом РФФИ №19-29-02020.

Список использованных источников

- [1] В.П. Будаев, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2017, т. 40, вып. 3, с. 23-36.
- [2] Будаев В.П., Федорович С.Д., Дедов и др. «Плазменная установка ПЛМ-М для испытаний теплозащитной облицовки внутрикамерных компонент и диагностики пристеночной плазмы термоядерного реактора-токамака». Всероссийская конференция «ДИАГНОСТИКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ». 2021г. 27.09-1.10.2021, г. Сочи, устный доклад

Н.Н. КАСИМОВА*, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, С.С. ДОВГАНЮК, А.М.
ЗАХАРОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва
*kasimova.nataliia@gmail.com

МОДИФИКАЦИЯ АЛЮМИНИЙ-ВОЛЬФРАМОВЫХ СЛОЕВ НА ВОЛЬФРАМЕ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В качестве контактирующих с плазмой материалов для Международного Термоядерного Экспериментального Реактора (ИТЭР) выбраны бериллий и вольфрам. В процессе работы реактора, распыленные плазмой атомы бериллиевой первой стенки, будут осаждаться, в частности, на вольфрамовом диверторе, формируя на его поверхности, содержащие бериллий покрытия, в которых могут накапливаться плазмообразующие газы, в том числе радиоактивный тритий, количество которого в установке ИТЭР лимитировано (700 гр.). Поэтому исследование свойств образующихся покрытий является крайне важным.

Оксид бериллия является высокотоксичным материалом, что накладывает ограничение на работу с Ве в лабораторных установках. Вместе с тем, физико-химические свойства бериллия и алюминия во многом сходны. В частности, было обнаружено сходство закономерностей удержания водорода в слоях, образующихся при осаждении атомов алюминия и бериллия на вольфрам.

В представляемой работе проведено исследование особенностей формирования W-Al слоев при осаждении атомов алюминия на вольфрам, а также характера их трансформации при термическом воздействии. Всё сказанное выше, как нам представляется, позволяет считать, что полученные результаты будут не только полезными для понимания физико-химических свойств поверхностных интерметаллических слоёв, но и позволят вывести общие заключения о поведении слоёв Ве-W в различных условиях работы ИТЭР.

Экспериментальная часть. Образцы представляли собой пластинки поликристаллического вольфрама марки PW99,95 (АО "Полема") размерами $7 \times 7 \times 1,0$ мм³. W-Al покрытия формировались на образцах при температуре 450–500 К атомами алюминия, распыляемыми с алюминиевой мишени ионами аргоновой плазмы. Скорость осаждения составляла 1×10^{15} ат/см²с. Количество осажденных атомов, согласно весовым измерениям, равнялось 9×10^{18} ат/см², что соответствовало слоям алюминия толщиной 1500 нм.

Для изучения закономерностей формирования W-Al структур на поверхности W после осаждения атомов алюминия на вольфрам образцы

были разломаны и образовавшиеся при разломе торцы образцов исследовались с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) TESCAN Vega 3, снабженного модулем энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) INCA-xAct (Oxford Instruments).

Для исследования трансформации образовавшегося при напылении поверхностного слоя при термическом воздействии образцы после осаждения алюминия последовательно были нагреты (скорость — 5 К/с) в вакууме до 900 К, 1150 К и 1600 К при давлении 1×10^{-5} Па. До и после каждого прогрева измерялась масса образцов на микровесах «AND BM-20».

Результаты экспериментов и их обсуждение. Исследование показало, что осаждение атомов алюминия на поверхность вольфрама в условиях эксперимента сопровождалось их диффузией в объем вольфрама. На разных участках поверхности степень проникновения алюминиевых атомов в глубину вольфрама и структуры образовавшихся слоёв различались. Глобулярный поверхностный слой занимал большую часть поверхности слома образца. Такой слой включал хорошо различимые глобулы размерами примерно 200 нм. В виду малых размеров глобул мы можем говорить только об общей концентрации алюминия в этом слое. Толщина слоя (≈ 1000 нм) и концентрация в нем алюминия (≈ 93 ат. %) заметно не различались по всей толщине слоя.

К глобулярному слою примыкали кристаллические зёрна, различные по структуре и по содержанию алюминия. В их числе можно выделить, судя по РЭМ-изображениям, разрушенные (фрагментированные) кристаллические области и кристаллы с «градиентным» содержанием алюминия.

Протяженность разрушенных кристаллических областей вдоль поверхности слома могла достигать от 10 до 20 мкм, а толщина — от 3 до 10 мкм. Концентрация алюминия в разных кристаллических «фрагментах» разрушенных кристаллических областей была различна и составляла от 10 до 50 ат. %. Разломы вольфрамовых образцов до напыления алюминия не содержали подобных структур. Отметим, что похожий ансамбль слабосвязанных между собой кристаллов интерметаллидов фиксировался на поверхности образца после его прогрева до 1150 К.

К поверхностному глобулярному слою также примыкали кристаллы с градиентным содержанием алюминия. Концентрация алюминия в градиентных кристаллах убывала от 90 ат. % в наиболее близких к поверхности участках до нескольких процентов в участках, наиболее отдалённых от поверхности. Такие кристаллы занимали около 30% приповерхностной области слома, и их размеры достигали 20 мкм.

В целом, такое количество различных вольфрам-алюминиевых формирований на различных участках области распространения атомов алюминия в вольфраме можно объяснить различной ориентацией и степенью совершенства структур кристаллических зерен в области, примыкающей к поверхностным слоям. За этими вольфрам-алюминиевыми образованиями с концентрацией от нескольких десятков процентов до минимально измеряемой в наших условиях (0,01 ат. %), регистрируемые количества алюминия обнаруживались по границам зёрен и в микроскопических порах с размерами до 4 мкм внутри.

Анализ поверхности образцов и их сломов, прогреваемых после осаждения атомов, позволил выявить несколько этапов значительных изменений в областях, содержащих алюминий.

После осаждения атомов алюминия на вольфрам на поверхности образца наблюдались легко различимые зерна размерами порядка 1 мкм. При нагреве до 900 К структура поверхности образца не изменялась. Вместе с тем, весовые измерения свидетельствовали об уменьшении массы образца на 1–2 %. Это указывало на испарение соответствующего количества алюминия, при температуре ≤ 900 К, что намного меньше температуры испарения металлического алюминия (2740 К). В то же время, энерго-дисперсионный анализ поверхности образца свидетельствовал об увеличении концентрации алюминия до 99 ат. % в поверхностном слое, толщиной, примерно равном 1100 нанометрам, доступным для этого метода при анализе интерметаллида с концентрацией алюминия большей 90%.

Прогрев до 1150 К привел к образованию кристаллов различных форм и размеров на поверхности образца, покрытого малоразмерными выступами, отмечаемыми при более низких температурах. Взвешивание образцов свидетельствовало о продолжении испарения алюминия в интервале температур 900–1150 К. Теперь в образцах оставалось 93 % алюминия, осаждённого на образец. В то же время концентрация алюминия была практически одинакова и во вновь образованных кристаллах, и в участках поверхности, просматриваемых между ними и составляла 78 %. Можно предположить, что указанные изменения состава и структуры поверхностного слоя произошли в ходе упомянутого выше процесса кристаллизации при температуре 1020 К, который представлял собой рекристаллизацию структуры Al_{12}W поверхностного интерметаллического слоя в структуру Al_5W .

Анализ результатов измерений после прогрева до 1600 К позволил заключить, что в диапазоне температур 1300–1500 К вольфрам-алюминиевые

интерметаллиды в приповерхностной области образца распадались. Концентрация алюминия в этой области упала, в среднем, до 2 ат. %. Исчезли кристаллы, обнаруженные на поверхности при рекристаллизации. За приповерхностной областью алюминий регистрировался крайне редко в субмикроскопических образованиях, в которых концентрация алюминия составляла не больше 2 ат. %. Испарялось 47 % атомов алюминия. Не более 10 % сохранившегося в вольфраме алюминия находилось в приповерхностной области, а оставшиеся 43 % — в объёме образца. В таком случае средняя концентрация алюминия в вольфраме не должна превышать 0,4 ат. %.

Закключение. Показано, что при осаждении атомов алюминия в количестве до 9×10^{18} ат/см² при температуре 450–500 К диффузия алюминия в вольфрам приводила к образованию интерметаллического поверхностного слоя. Обнаружены кристаллы вольфрама с градиентным содержанием алюминия от десятков до единиц процентов, а также кристаллы с единичными заполненными алюминием микроскопическим полостями. Атомы алюминия также проникали в вольфрам по границам зерен на глубины не меньшие, чем 260 мкм.

При нагреве до 900 К поверхность образцов слабо изменялась. Кристаллизация интерметаллида с образованием структуры, по-видимому, состава Al_5W происходила при температуре 1020 К и сопровождалась интенсивной кратковременной десорбцией аргона, захваченного во время напыления алюминия.

В диапазоне температур 1300–1500 К происходил распад интерметаллида с выделением захваченного водорода и оставшегося аргона. Концентрация алюминия в приповерхностной области, упала в среднем до 2 ат. %. Около 47 % атомов алюминия испарялось с поверхности. Не более 10 % сохранившегося в вольфраме алюминия находилось в приповерхностной области, а оставшиеся 43 % — в объёме образца. В таком случае, средняя концентрация алюминия в вольфраме не должна превышать 0,4 ат. %.

В.П. БУДАЕВ^{1,2*}, С.Д. ФЕДОРОВИЧ¹, Ю.В. МАРТЫНЕНКО^{2,1}, А.В. КАРПОВ^{1,2*}, А.Ю. МАРЧЕНКОВ¹, М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ¹, А.В. ЛАЗУКИН¹, М.К. ГУБКИН¹, Д.И. КАВЫРШИН¹, Д.С. ЛУКЬЯНЦЕВ¹, М.В. БУДАЕВА⁴, В. ЧАН КУАНГ¹, Г.Б. ВАСИЛЬЕВ¹, К.А. РОГОЗИН¹, А.А. КОНЬКОВ¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва

³ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

⁴Национальный исследовательский университет «МФТИ», Долгопрудный

*budaev@mail.ru

РОСТ НАНОСТРУКТУР НА ТИТАНЕ И ЖЕЛЕЗЕ ПРИ ПЛАЗМЕННОМ ОБЛУЧЕНИИ СТАЦИОНАРНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ НАГРУЗКАМИ В УСТАНОВКЕ ПЛМ

В последние годы при облучении гелиевой плазмой металлов (вольфрама, молибдена и других) в экспериментах на линейных установках - симуляторах дивертора с магнитным удержанием плазмы были получены новые материалы с уникальной наноструктурированной поверхностью типа «пух» (см. обзор [1]). В теоретической модели [2], наиболее адекватно описывающей такой процесс, рассматривается, что структура пуха на металлах, включая вольфрам, молибден, титан, железо и др., образуется в результате роста из адатомов, появляющихся на поверхности в результате бомбардировки ионами гелия при плазменной обработке. Образование адатома на поверхности происходит в результате выбивания атома из поверхностного слоя, для чего требуется энергия равная около одной третьей от энергии сублимации, определяющей порог распыления. Этот энергетический порог для ионов гелия определяет условия образования наструктурных слоев типа пух на поверхности. Когда структура пуха уже образовалась и экранирует исходную подложку, то ионы гелия создают адатомы непосредственно на волокнах (волосках) пуха. На основе теоретической модели [2] в настоящей работе определена скорость образования адатомов при облучении ионами гелия для титана и железа. В начальной стадии процесса роста адатомы могут присоединяться к ступенькам, выступам, вскрывшимся полостям пузырьков гелия под поверхностью и др. на поверхности и, объединяясь, образовывать кластеры, являющиеся зародышами нановолокон. Рост нановолокон происходит в соответствии с механизмом, описанным в [2] : адатомы диффундируют по волоску и встраиваются в его структуру на вершине

нановолокна, поскольку на его вершине больше кривизна и больше ловушек для адатомов. Определен температурный интервал поверхности, в котором может формироваться структура типа пух: от одной четверти от температуры плавления до одной второй от температуры плавления (выше которой невозможно образование кластеров из адатомов вследствие их термического распада).

Расчеты на основе модели [2] показали, что для титана при температуре образца 800K и плотности тока на поверхность 500 mA/ cm² длина нановолокон (волосков) пуха со временем облучения будет расти как $h \approx 2 \cdot 10^{-8} \cdot t^{1/2}$ м. Для железа при температуре образца 700 K и плотности тока на поверхность 500 mA/cm² длина нановолокон (волосков) пуха со временем облучения будет расти как $h \approx 10^{-7} \cdot t^{1/2}$ м.

Проведены расчеты параметров плазменной нагрузки на титановые и железные образцы в стационарном гелиевом разряде усовершенствованной установки ПЛМ-М [3] для роста наноструктурированной поверхности с различной степенью пористости и плотности с размером наноструктур в диапазоне от 20 нанометров до 500 нанометров. Рассчитанные значения температуры образцов титана и железа для условий эксперимента на плазменной усовершенствованной установке ПЛМ-М при лежат в диапазоне от 150 градусов Цельсия до 1100 градусов Цельсия. Для титана температура образца при плазменном облучении должна быть вблизи 527 градусов Цельсия. Для железа температуру образца при плазменном облучении необходимо поддерживать от 300 градусов Цельсия до 500 градусов Цельсия. Плотность потока гелия на образец следует поддерживать на уровне более $j = 500 \text{ mA/cm}^2$. Проведенные эксперименты на ПЛМ-М подтвердили правильность расчетов: в условиях, предсказанных в расчетах, на образцах титана и железа были получены наноструктурированной поверхности с различной степенью пористости и плотности с размером наноструктур в диапазоне от 20 нанометров до 500 нанометров.

Плазменному облучению подвергались титановые образцы в виде дисков диаметром 8мм и толщиной 3мм, изготовленные из титана марки ВТ-1, и железные образцы, изготовленные из стали 1Х18Н10Т в виде грибка сантиметрового размера. В серии экспериментов образцы устанавливались в разрядной камере установки ПЛМ-М перпендикулярно потоку гелиевой плазмы. Температура поверхности образцов, обращенной к плазме, контролировалась термопарами и оптической пирометрией. Энергия ионов гелия, достигающих поверхности, была около ≈ 50 эВ, которая поддерживалась отрицательным смещением потенциала образцов

относительно плазмы основного разряда. Режимы плазменного облучения и характеристик плазмы: ток плазменного разряда 1,5 А, потенциал катода 183,5 В, давление гелия $1,2 \cdot 10^{-2}$ Торр. Облучение титановых образцов проводилось при температуре поверхности 600°C в течение 60 минут. Облучение железных образцов проводилось при температуре поверхности от 300°C до 450°C в течение 67 минут.

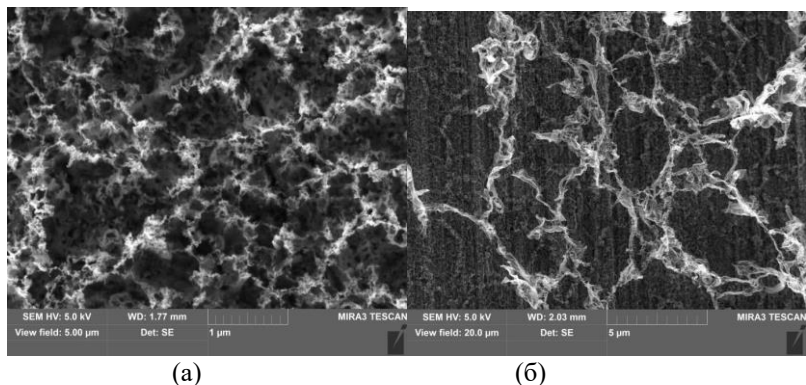


Рисунок 1— СЭМ микрофотографии поверхности титанового образца, облученного в стационарном гелиевом разряде установки ПЛМ-М

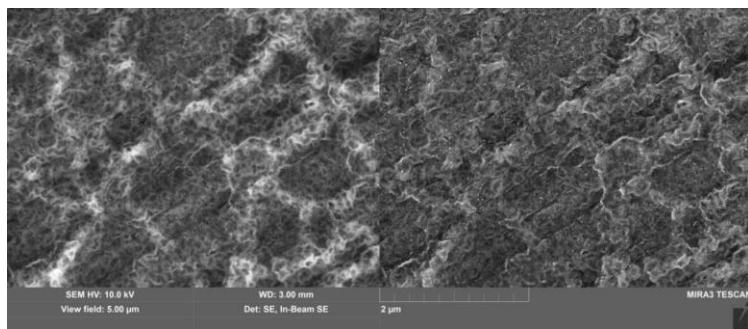


Рисунок 1 - СЭМ микрофотографии слоя со стохастической кластеризацией с иерархической гранулярностью, титановый образец

На рис. 1 показана структура поверхности титанового образца с пористыми слоями с размером наноструктур в диапазоне от 20 нанометров до 500 нанометров, образованными при плазменном облучении в усовершенствованной установке ПЛМ-М. Наблюдаются слои с различной степенью пористости, рис. 1а и 1б. На некоторых образцах формируется стохастическая кластеризация с иерархической гранулярностью, рис.2, подобно ранее описанным структурам на вольфраме и углероде, см. [4]. На рис. 3 показана структура железного образца с пористыми слоями с размером наноструктур в диапазоне от 20 нанометров до 500 нанометров, образованными при плазменном облучении в усовершенствованной установке ПЛМ-М.

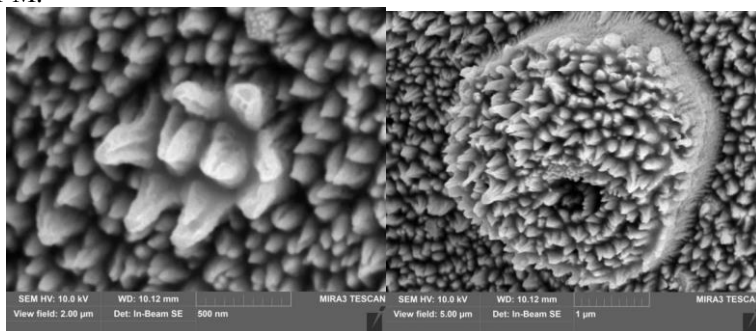


Рисунок 3 — СЭМ микрофотографии поверхности железного образца, облученного в стационарном гелиевом разряде установки ПЛМ-М

Плазменные испытания проводились при поддержке проекта Госкорпорации "Росатом" № 223 ЕОТП-УТП 774/158-Д, анализ структуры поверхности-при поддержке гранта РНФ 17-19-01469, рентгеновский анализ – при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FSWF-2020-0023).

Список использованных источников

- [1] S. Kajita et al., Sci. Rep. 8, 56 (2018).
- [2] Ю.В. Мартыненко, М.Ю. Нагель, Физика плазмы, 38, 1082 (2012).
- [3] В.П. Будаев и др. Всероссийская конференция ДИАГНОСТИКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ, 27.09-1.10.2021 г. г. Сочи.
- [4] V.P. Budaev, Physics Letters A, 381, 3706–3713 (2017).

Н.С. СЕРГЕЕВ^{1,2*}, И.А. СОРОКИН^{1,3}, Ф.С. ПОДОЛЯКО¹, О.В. ОГОРОДНИКОВА¹, В.С. ЕФИМОВ¹, Ю.М. ГАСПАРЯН¹, М.Д. САВЕЛЬЕВ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

²Национальный исследовательский институт «Курчатовский институт», Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

³Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141190, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

*nickbebeskis@gmail.com

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЫ С ПРИМЕСЬЮ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ

Одним из приоритетных направлений в области термоядерных исследований является контроль уровня плазменно-тепловой нагрузки на внутрикамерные элементы установок магнитного удержания горячей плазмы. Постепенное развитие технологии напуска примеси инертного газа (He, Ne, Ar) в процессе плазменного разряда в установках типа токамак и стелларатор [1, 2] как средства радиационного охлаждения периферии плазмы, предъявляют новые требования по контролю состояния поверхности обращённых к плазме элементов.

В результате воздействия He плазмы создаются условия для формирования особых наноразмерных структур на поверхности вольфрамовых элементов облицовки вакуумной камеры установки. Как известно, повышенная температура поверхности, получающаяся в результате действия плазменной нагрузки $T_{\text{surf}} \sim 1000$ °C в сочетании с большим значением потока ионов из плазмы на поверхность $\Gamma_i \sim 1 \times 10^{21} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, способствует развитию особой структуры – вольфрамового «пуха» [3]. Появление и развитие подобных мелкомасштабных структур на поверхности вольфрамовых элементов, имеющих непосредственный контакт с плазмой, способно привести к увеличению эрозии материала облицовки, что в свою очередь способно оказать негативное влияние на параметры плазмы: проникновение примеси с высоким значением Z в центр плазменного шнура с последующим увеличением радиационных потерь из плазмы. Дополнительно возникает вопрос о механизмах захвата газа вольфрамом с развитой таким образом поверхностью.

В данной работе представляется исследование влияния примеси инертного газа (Ar, Ne) на процесс модификации поверхности вольфрама, находящейся

под облучением He плазмы.

Каждый образец $10 \times 10 \text{ мм}^2$ был изготовлен из поликристаллической вольфрамовой (99.9%) фольги толщиной 50 мкм (Plansee, Австрия). Для снятия остаточных напряжений, а также для уменьшения количества структурных дефектов поверхности, перед началом облучения образцы подвергались процедуре отжига при температуре $T = 2000 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 30 мин.

Облучение образцов происходило в линейной установке, плазменно-химическом реакторе, использующем пучково-плазменный разряд [4]. Данная установка способна создавать стационарный плазменный разряд с однородным распределением параметров плазмы в поперечном сечении пучка, обеспечивающее равномерное воздействие плазмы на поверхность исследуемого образца. С целью *in-situ* контроля ионного состава плазмы применялся масс-спектрометр на базе фильтра Вина, для *in-situ* оценки величины ионного потока на поверхность, а также контроля параметров плазмы в процессе облучения использовался подвижный одиночный зонд Ленгмюра.

В ходе экспериментов процентное содержание примеси Ar, Ne в гелиевой плазме варьировалось посредством регулировки значения парциального давления примеси инертного газа p_{impurity} . При этом значение абсолютного давления в камере взаимодействия поддерживалось на постоянном уровне $p_{\text{total}} = 2.5 \times 10^{-2}$ мбар. Таким образом, в каждой серии экспериментов по облучению вольфрамового образца отличалось отношение парциального давления примеси инертного газа к величине абсолютного давления в камере взаимодействия $p_{\text{impurity}}/p_{\text{total}}$. Для каждого значения $p_{\text{impurity}}/p_{\text{total}}$ были проведены две серии облучений с различными потенциалами смещения образца $U_{\text{bias}} = 75, 150 \text{ В}$. Значение температура поверхности образцов в ходе эксперимента ($T_{\text{surf}} = 1223 \text{ К}$) контролировалась при помощи термопары ВР-5/20. Согласно зондовым измерениям, величина потока ионов на поверхность в ходе всех экспериментов составляла $\Gamma_i \approx 1 \times 10^{21} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$. Итоговое значение дозы облучения для всех образцов составляло $\Phi_{\text{He}} \approx 6 \times 10^{24} \text{ м}^{-2}$ исходя из данных масс-спектроскопии о количестве ионов He^+ в смеси. СЭМ-изображение вольфрамового образца после облучения чистой He плазмой, а также параметры облучения представлены на рис. 1.

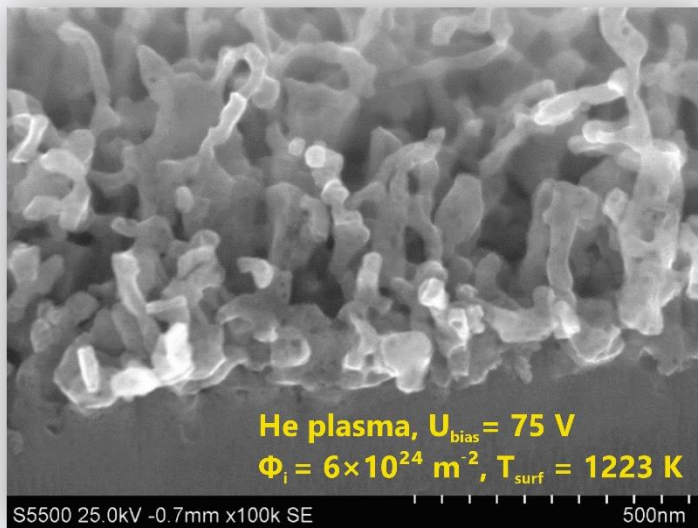


Рис 1. СЭМ-изображение поверхности вольфрамового образца после облучения He плазмой.

По результатам *in-situ* масс-спектропии была выявлена нелинейная связь между долей добавки примеси и её содержанием в суммарном ионном потоке, приходящем на поверхность образца. Исследование процесса захвата гелия модифицированной поверхностью вольфрама, получившейся в результате воздействия гелиевой плазмы с примесью Ag, Ne, происходило при помощи термодесорбционной спектроскопии (ТДС) [5]. Визуальный контроль поверхности образцов после облучения выполнялся при помощи СЭМ.

В случае облучения образцов чистой гелиевой плазмой при указанных выше параметрах в ТДС спектрах присутствуют три выраженных пика десорбции газа. Основной пик десорбции гелия при температуре $T \approx 1150 \text{ K}$, высокотемпературный пик при температуре $T \approx 1600 \text{ K}$, и низкотемпературный пик при температуре $T \approx 470 \text{ K}$. Добавление примеси Ag и Ne способствует появлению сложной динамики в процесс захвата гелия, в пределах долей процента значений $p_{\text{impurity}}/p_{\text{total}}$ наблюдается сильное изменение в ТДС спектрах.

Список использованных источников

- [1] A. Kallenbach *et al* 2021 *Nucl. Fusion* **61** 016002
- [2] T. Barbui *et al* 2019 *Nucl. Fusion* **59** 076008
- [3] S. Takamura, N. Ohno, D. Nishijima, S. Kajita, Formation of Nanostructured Tungsten with Arborescent Shape due to Helium Plasma Irradiation, *Plasma and Fusion Research*, 2006, Volume 1, Pages 051
- [4] Sergeev, N. S., & Sorokin, I. A. (2021). Modification of the tungsten surface under the beam plasma discharge plasmas. Paper presented at the 47th EPS Conference on Plasma Physics, EPS 2021, 2021-June 197-200]
- [5] A.A. Rusinov, Y.M. Gasparyan, S.F. Perelygin, A.A. Pisarev, S.O. Stepanov, N.N. Trifonov, A setup for thermodesorption measurements, *Instruments Exp. Tech.* 52 (2009) 871–876.

Н.Н. АНДРИАНОВА¹, А.М. БОРИСОВ^{1,2}, Е.С. МАШКОВА³, М.А.
ОВЧИННИКОВ^{3*}

¹Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

²Московский государственный технологический университет “СТАНКИН”, Москва, Россия

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

*ov.mikhail@gmail.com

МОДИФИЦИРОВАНИЕ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКОДОЗНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ИОНОВ ПЛАЗМЫ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК

Графит и графитоподобные материалы остаются одними из возможных конструктивных компонентов первой стенки вакуумной камеры в термоядерных установках [1,2]. Важной проблемой как в случае применения графитоподобных материалов, так и аналогов является необходимость в детальной характеристике топографии поверхности и ее изменениях в сложных магнитных полях термоядерных установок с различными углами падения частиц на внутреннюю поверхность вакуумной камеры и широким элементным составом. Для решения этой проблемы необходимы как теоретические, так и экспериментальные исследования. Важным применением ионно-лучевых методов воздействия являются имитационные исследования радиационного воздействия [3]. В частности, такие эксперименты рассматриваются для графитов и графитоподобных конструктивных материалов [4,5]. Наряду с облучением собственными ионами, т.е. ионами углерода, используют облучение ионами инертных газов и химически активных элементов. При интенсивном радиационном воздействии основными факторами являются как процессы накопления дефектов, так и процессы распыления (перенапыления) и модифицирования облучаемой поверхности [1-5].

Углеродное волокно из полиакрилонитрила (ПАН) может служить модельным материалом различных графитов и композитов. Оболочка волокна характеризуется высокой степенью графитации и содержит поры, как и искусственные графиты. Присущая этим материалам пористость уменьшает их удельную плотность по сравнению с близким к монокристаллу высокоориентированным пирографитом. Структура оболочки волокна с доминирующим направлением оси c по радиусу волокна позволяет выявить

наиболее существенные эффекты, связанные с анизотропией графитовых материалов. Облучение углеродного волокна позволяет оценить воздействие ионов плазмы термоядерных установок (ТЯУ) на материал стенки во всем интервале углов падения ионов. Вершинная часть волокна облучается по нормали к поверхности, тогда как периферийная часть волокна облучается под скользящими углами падения. Необходимость таких данных неоднократно отмечалась в актуальных задачах исследований для токамаков, см., например, [6].

К настоящему времени подробно исследованы процессы образования на поверхности графитоподобных материалов ионно-индуцированных поверхностных структур при температурах до 600 °С, которые позволяют связать, в частности, явление ионно-индуцированного гофрирования углеродных волокон из ПАН с анизотропными радиационно-индуцированными пластическими процессами формоизменения углеродных материалов [7]. В данной работе проводится сравнение и обсуждение данных по облучению углеродного волокна из ПАН ионами гелия и углерода, полученных в работах [7-9]. В этих работах проводилось облучение углеродного волокна «Кулон» и композита КУП-ВМ, армированного волокнами ВМН-4, ионами He^+ и C^+ с энергией 30 кэВ при температуре $T > 200^\circ\text{C}$ на масс-монохроматоре НИИЯФ МГУ [7,9], и ионами He^+ с энергией 3 кэВ на плазменном ускорителе с анодным слоем [8]. Флуенс облучения во всех случаях составлял $\geq 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$.

Облучение композита КУП-ВМ и углеродных волокон из ПАН, армирующих композит выбранными ионами, показывает значительную разницу модифицирования поверхности углеродных волокон, см. Рис.1. Для сравнительного анализа дефектообразования на Рис. 1 приведены также профили числа смещений на атом (dpa) для каждого конкретного случая облучения. Для облучения ионами гелия с энергией 3 и 30 кэВ наблюдается образование продольного и поперечного гофрирования поверхности волокна и, как показало исследование в работе [7], связанное с расположением максимума образования дефектов по глубине. Облучение ионами углерода с энергией 30 кэВ не приводит к визуальному изменению поверхности углеродного волокна, сохраняя его гладким в результате имплантации и самораспыления поверхности углеродного волокна. Спектроскопия комбинационного рассеяния света показала, что облучение во всех случаях приводит к значительной дефектности модифицированных слоёв при сохранении их графитовой основы [7,9]. Из рисунка РЭМ при облучении ионами гелия с энергией 30 кэВ важно отметить также возможный факт

образования риппл-структур при скользящих углах падения ионов на периферии углеродного волокна [10].

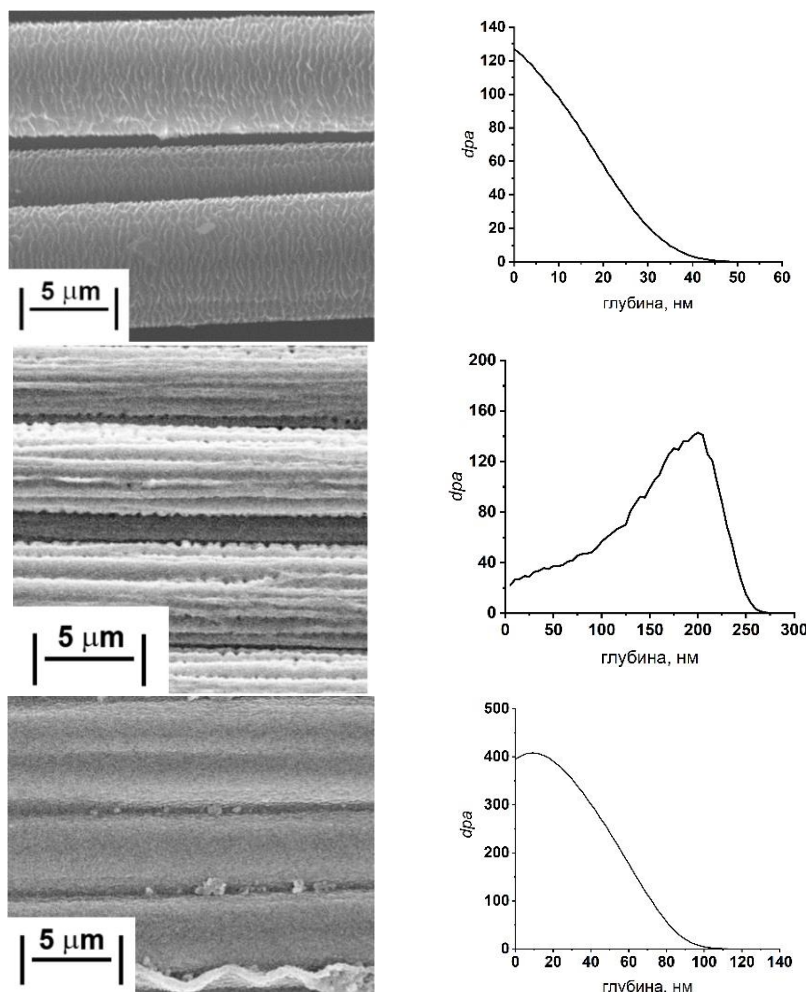


Рис.1. РЭМ изображения и соответствующие им профили dpa для случаев облучения ионами He^+ с энергией 3 кэВ (вверху), с энергией 30 кэВ (в середине) и ионами C^+ с энергией 30 кэВ (внизу)
Рассмотренные случаи показывают, что облучение углеродных волокон

позволяет экспериментально описать процессы в ТЯУ с углеродными стенками, для широкого набора углов облучения, ионов и параметров облучения. Отметим, что в ТЯУ с углеродными стенками имеются участки стенок с осаждёнными слоями распыленного углерода из других областей установки. Профили dpa для таких участков будут определяться процессом ионного облучения растущего слоя углерода. Моделирование такого случая показывает постоянный уровень dpa на всю толщину напыленного слоя. Поскольку градиента dpa в слое нет, то можно ожидать гладкую поверхность волокна, даже если будет происходить ионно-индуцированная графитация с текстурой оболочки волокна. Отсутствие эрозии поверхности углеродного волокна в случае облучения ионами углерода может являться важной особенностью при рассмотрении воздействия плазмы смешанного состава в термоядерных реакторах.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30058)

Список использованных источников

- [1] Khvostenko P.P. et al. Tokamak T-15MD, Fusion Engineering and Design, 2019. V.146A. P.1108-1112
- [2] Begrambekov L., Brosset C., Bucalossi J., et.al. J. of Nuclear Materials. V. 2007. V.363-365. P. 1148-1152
- [3] Was G.S. Fundamentals of Radiation Materials Science, 2nd ed. Springer-Verlag, New York, 2014. 1002 p.
- [4] Virgil'ev Yu.S., Kalyagina I.P. Inorganic Materials. 2004. V. 1. P. S33.
- [5] Galy N., Toulhoat N., Moncoffre N. et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2017. V. 409. P. 235.
- [6] Behrisch R. Atomic and plasma-material interaction data for fusion, IAEA, Vienna, 1991. V.1. P.7-16
- [7] Andrianova N.N., Borisov A.M., Mashkova E.S., et. al. Vacuum. 2021. V.188. P.110177
- [8] Andrianova, N. N., Anikin, V. A., Borisov, et. al. Journal of Physics: Conference Series. 2019. V.1313. P. 012001
- [9] Андрианова, Н. Н., Борисов, А. М., Макунин А.В., и др. ВИП-2021. Труды 25 межд. конф. Ярославль, Россия, 23-27 августа 2021 г, Том 2, с. 35–38.
- [10] Carter G. J.Phys.D: Appl. Phys. 2001. V.34. P. R1-R22.

М.М. ЦВЕНТУХ

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

Москва

elley@list.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВЕЩЕСТВА ИЗ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ КАТОДНОГО ПЯТНА ВАКУУМНОЙ ДУГИ

В вакуумном разряде (в том числе, в дуговом) плазма создается из материала электродов. Быстрые циклические всплески взрывной электронной эмиссии формируют ступки плотной плазмы и обеспечивают протекание тока. Нами была развита модель перехода через критическое состояние, характеризующееся температурой ~ 1 эВ и плотностью $\sim 10^{22}$ см⁻³, для оценки наблюдаемых параметров плазмы этих взрывоэмиссионных всплесков [1]. Были получены оценки для скорости расширения плазмы (ионов) E_{kin} и среднего заряда ионов Z_{av} для различных металлов. Было получено хорошее согласие с известными (табличными) измеряемыми величинами.

При этом зарядовое состояние ионов плазмы в вакуумной дуге и их скорость движения можно измерить в деталях, в отличие от критических температур, измеренных только для нескольких металлов [2]. Это связано с высокой плотностью энергии в таком экстремальном состоянии вещества. Таким образом, можно наоборот применять модель для оценки критической температуры вещества из измеряемых параметров плазмы

$$T_{cr} \approx (Z_{av} - 1) \text{ eV} \quad (1)$$

$$\frac{T_{cr}}{e} \approx E_{kin}/100 \quad (2)$$

Интерес представляет применение данного подхода для определения параметров новых сложных веществ – как поверхности с наноструктурой (W-fuzz) [3] или многокомпонентные сплавы [4].

В частности, в работе [4] было получено отклонение от известной эмпирической закономерности – cohesive energy rule [5], согласно которой напряжение горения дугового разряда зависит от энергии связи E_{coh} как

$$U_c \approx U_0 + A E_{coh} \quad (3)$$

При этом в [4] были проведены вычисления энергии связи E_{coh} методом функционала плотности и алгоритмом USPEX, показывающие примерно

линейную зависимость, не согласующуюся с измерениями катодного падения и cohesive energy rule.

Оценим параметры вещества – критическую температуру и напряжение горения из измеренных в работе [4] параметров плазмы в соответствии с нашей моделью взрывоэмиссионного импульса [1].

Отметим, что для металлов $E_{coh} \approx 5 T_{cr}$, см. рис. 1. При этом плазма образуется при переходе через критическое состояние, в котором E_{coh} обнуляется. Таким образом, более целесообразно говорить о T_{cr} а не E_{coh} .

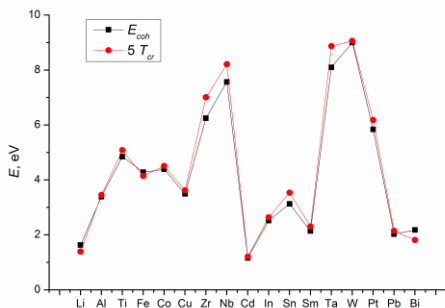


Рис. 1. Величины cohesive energy и критической температуры для различных металлов

Из среднего заряда ионов Nb и Al и их средней кинетической энергии можно получить оценки критической температуры по (1) и (2), см. рис. 2.

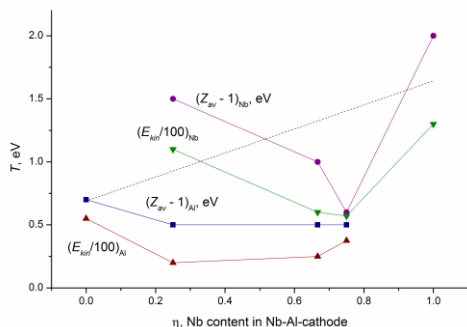


Рис. 2. Оценки критической температуры сплавов Nb-Al из среднего заряда ионов плазмы и их кинетической энергии
Учет усреднение в соответствии с соотношением компонент (η – доля

Nb), см. рис. 3. И оценим катодное падение по (3): $U_c \approx U_0 + 5 A T_{cr}$ для различных параметров U_0 и A , см. рис. 4.

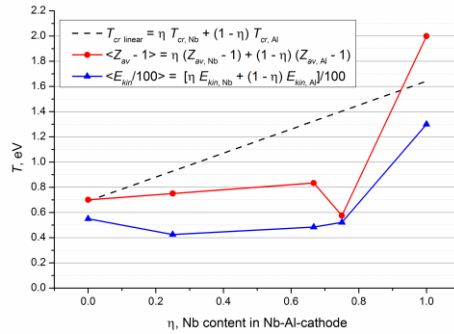


Рис. 3 Оценки критической температуры сплавов Nb-Al из среднего заряда ионизованной плазмы и их кинетической энергии с усреднением по доли компонент

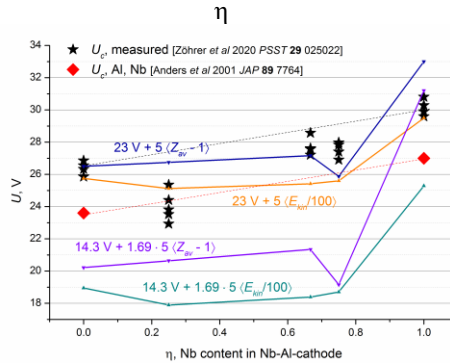


Рис. 4. Измеренные величины катодного падения U_c для сплавов Nb-Al из [4] и из [5], и оценки по среднему заряду и кинетической энергии ионизованной плазмы

Список использованных источников

- [1] Tsventoukh M.M. 2021 *Phys. Plasmas* **28** 024501
- [2] <https://rg.ru/2006/09/27/fortov.html>
- [3] S.A. Barengolts *et al* 2020 *Nucl. Fusion* **60** 044001
- [4] Siegfried Zöhrer *et al* 2020 *Plasma Sources Sci. Technol.* **29** 025022
- [5] Andre Anders *et al* 2001 *Journal Appl. Phys.* **89** 7764

А.А. КОНЬКОВ^{1*}, К.А. РОГОЗИН¹, В.ЧАН КУАНГ¹, В.С. КВАСКОВ¹, С.В. БЕЛОУСОВ¹, А.В. КАРПОВ¹, А.В. ЗАХАРЕНКОВ¹, С.Д. ФЕДОРОВИЧ¹,
В.П. БУДАЕВ¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

*alexkonkov2009@gmail.com

ИСПЫТАНИЕ ОХЛАЖДАЕМЫХ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИТИЕВЫХ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ СИСТЕМ СТАЦИОНАРНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ И ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ НАГРУЗКОЙ

При разработке внутрикамерных компонентов для будущих термоядерных установок остро стоит материаловедческая проблема, которая заключается в сложности разработки материалов, способных выдерживать высокие стационарные и импульсные тепловые нагрузки на поверхность, обращённую к плазме. В связи с этим развитие получают проекты по альтернативным методам защиты материалов первой стенки. Одним из способов защиты первой стенки является использование жидкометаллических капиллярно-пористых систем.

В ходе настоящей работы разработаны и испытаны на плазменной установке ПЛМ опытные макеты внутрикамерных компонентов на основе литиевой жидкометаллической капиллярно-пористой системы (КПС) стационарной плазменной и импульсной лазерной нагрузкой. На данных макетах отрабатывалась техника охлаждения КПС диспергированным потоком. Фотография опытного макета представлена на рисунке 1.



Рисунок 1. – Фотография опытного макета охлаждаемой жидкометаллической капиллярно-пористой системы

Параметры испытаний: ток разряда 1-6 А, потенциал катода -203 В, потенциал макета +14 В, ток из плазмы на образец 1-3 А, давление гелия в

вакуумной камере 0,012 Торр, время облучения составило 120 минут. Образец был нагрет до 460 К.

Фотография опытного макета после испытаний представлена на рисунке 2.



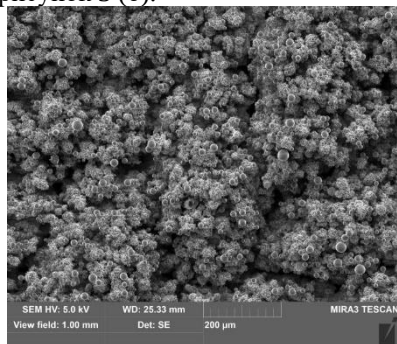
Рисунок 2. – Фотография обращенной к плазме поверхности макета литевой ЖМ КПС после испытаний в установке ПЛМ, 1 - область с литием, 2 - область лазерных нагрузок

Следов дуговых процессов, как и следов лазерного излучения, на поверхности лития обнаружить невозможно, поскольку литий во время эксперимента находится в жидком состоянии и возникающие дефекты на жидкой поверхности заплывают, в том числе, возникающие деформации поверхности от воздействия лазера и дуговых процессов быстро исчезают при движении расплава под действием поверхностного натяжения расплава. Основной объем оставшегося после эксперимента лития находится в глубине КПС. Зон поверхности с открытой молибденовой сеткой не обнаружено.

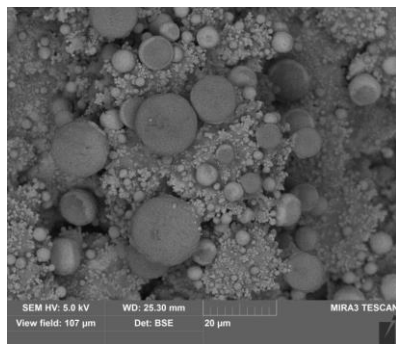
Были проведены исследования с помощью СЭМ поверхности литевой ЖМ КПС. Исследования проводились в области пятна, и в области высоких лазерных и дуговых нагрузок, где пленка имела минимальную толщину.

В зоне пятна (рисунок 3) наблюдалась высокопористая поверхность. Обнаружены капли лития сферической формы размером от 500 нм до 20 мкм. Аналогичные результаты были получены ранее при исследовании литевых материалов из токамака Т-10, после плазменных экспериментов с литевой ЖМ КПС. На СЭМ-изображении, полученном с помощью детектора обратнорассеянных электронов (BSD детектора), отсутствует контраст,

рисунок 3 (б).



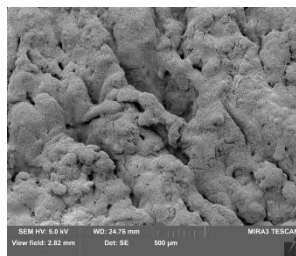
(а)



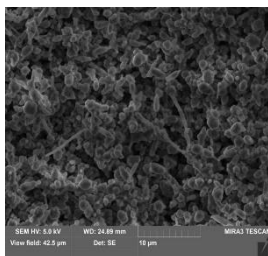
(б)

Рисунок 3. – СЭМ изображения плёнки в области пятна, (а) – увеличение 632, детектор SE, (б) – увеличение 5926, детектор BSE

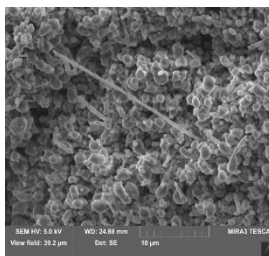
Исследования зон поверхности, которые подверглись мощным лазерным и дуговым нагрузкам, показали наличие следов плавления и быстрого отверждения поверхности (рисунок 4, а). Такая поверхность - высокопористая, состоит из частиц эллиптической формы с характерными размерами порядка 1-2 мкм (рисунок 82 б). На поверхности присутствуют длинные волокна диаметром 500 нм и длиной до 15 мкм (рисунок 4, в). Минимальная толщина литийсодержащих композитных соединений на поверхности обнаружена на границах КПС в непосредственной близости от молибденовой рамки.



(а)



(б)



(в)

Рисунок 82 – СЭМ- изображения поверхности в зоне воздействия мощных лазерных нагрузок. (а) – увеличение 223, (б) – увеличение 14854, (в) – увеличение 15319

В ходе работы были испытаны макеты охлаждаемой жидкометаллической

литиевой капиллярно-пористой системы в условиях стационарной плазменной и импульсной лазерной нагрузки. Были исследованы области неиспарённого лития и возникшие на поверхности модуля литиевые наноструктуры методом сканирующей электронной микроскопии. Была испытана система охлаждения макетов диспергированным потоком. В результате испытаний макет и молибденовая сетка не были повреждены.

Плазменные испытания проводились при поддержке проекта Госкорпорации "Росатом" № 223 ЕОТП-УТП 774/158-Д.

А.С. УМЕРЕНКОВА^{1*}, Ю. ВАН¹, З.Р. АРУТЮНЯН¹, Ю.М. ГАСПАРЯН¹,
В.С. ЕФИМОВ¹, А.М. ЛИТНОВСКИЙ², О.В. ОГОРОДНИКОВА¹, К.
ГАРСИЯ-РОЗАЛЕС³

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Energie- und Klimaforschung, 52425 Jülich,
Germany

³Ceit-IK4 Technology Center, Paseo de Manuel Lardizabal 15, San Sebastian, 20018,
Spain

*nastya.umerenkova99@mail.ru

ЗАХВАТ ИОНОВ ДЕЙТЕРИЯ В SMART СПЛАВАХ W-Cr-Y

Самопассивирующиеся сплавы, в том числе SMART сплавы на основе вольфрама, предлагаются вместо чистого W в качестве материала ОПЭ в будущих термоядерных установках. Исследование захвата водорода в W-Cr-Y сплавы представляет повышенный интерес с точки зрения безопасности.

Проведено исследование захвата низкоэнергетичных ионов дейтерия в вольфраме, хроме и сплавах W-Cr-Y для характеристики центров захвата водорода в этих материалах. Сплавы W-Cr-Y были получены методами искрового плазменного спекания (FAST) и горячим изостатическим прессованием (HIP).

Исследование проводилось на экспериментальной установке МЕДИОН, позволяющей проводить облучение образцов масс-сепарированными ионами дейтерия и термодесорбционную спектроскопию без выноса образца на атмосферу. Проведены облучения вольфрамовых сплавов, чистого вольфрама и чистого хрома с одинаковой дозой 10^{21} D/m² при комнатной температуре. Далее проведены 2 серии экспериментов по облучению W-Cr-Y сплавов, изготовленных разными технологиями, дозой 10^{21} D/m² при различных температурах (300-900K). После каждого облучения проводили ТДС до 1200 K со скоростью нагрева 2K/с. Этой температуры достаточно для полного выхода дейтерия из чистого образца W и практически полного выхода из сплава W-Cr-Y. Температуру измеряли термопарой W-5%Re/W-20%Re, приваренной точечной сваркой непосредственно к образцу. Количество D, выделившееся из образца при ТДС, регистрировали с помощью квадрупольного масс-спектрометра. Более высокие температуры не использовались, чтобы избежать трансформации материала и испарения Cr. Исследования испарения хрома проводились на высоковакуумной установке, с возможностью измерения испаряемой массы с помощью кварцевого микробаланса. Испарение хрома наблюдалось при температуре выше 1250 K.

С повышением температуры захват дейтерия в сплаве WCrY-NiP уменьшается, тогда как для сплава WCrY-FAST наблюдается увеличение накопления при температуре 700К. Спектры термодесорбции для двух сплавов вольфрама с близким элементным составом, но разной технологией производства, имеют сильные различия в спектрах. Для FAST технологии в образцах обнаружены центры захвата с высокой энергией связи, определяющие накопление при повышенных температурах. Предположительно, это поверхность внутренних пор.

Н.П. БОБЫРЬ^{1*}, В.С. ЕФИМОВ², Б.И. ХРИПУНОВ¹, Д.И. ЧЕРКЕЗ¹,
Д.А. КОЗЛОВ¹, Д.С. ДУГИН¹, С.С. АНАНЬЕВ¹

¹НИИЦ "Курчатовский институт", Москва

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

*Bobyр_NP@nrcki.ru

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСИ ТАНТАЛА НА ЗАХВАТ ДЕЙТЕРИЯ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ ПЛАЗМЕННОМ ОБЛУЧЕНИИ В СПЛАВЕ W-Ta

В настоящее время вольфрам рассматривается как один из материалов, обращенных к плазме, для будущих термоядерных реакторов. В качестве материала, обращенного к плазме, W будет подвергаться интенсивным потокам дейтерия, трития, частиц гелия, а также нейтронов с энергией 14 МэВ от реакции D – T-синтеза. Облучение нейтронами вызовет изменение микроструктуры W за счет смещения в объеме и образования Re и Os [1]. Так же в данный момент рассматривается возможность введения легирующих примесей в вольфрам для повышения пластичности. Наличие примесей может влиять на удержание изотопов водорода в вольфраме. В предыдущем исследовании было показано уменьшение количества дейтерия с ростом концентрации примеси Ta в монокристаллах W после газового воздействия [1].

В данном исследовании в качестве экспериментальных образцов использовались пластины из монокристаллических сплавов W, W-xTa (x = 1; 3; 5 концентрация в ат.%). Все образцы были отполированы до зеркальной поверхности и дегазированы в вакууме при 1100 К в течение 2 часов. Наборы образцов W, W-1Ta, W-3Ta, W-5Ta облучались дейтериевой плазмой при температурах 410 К и 610 К до дозы 2Е25 ион/см² на установках ЛЕНТА и ГПИ-2 [3]. Удержание D в сплавах W и W-Ta измеряли методом термодесорбционной спектроскопии (ТДС).

Показано существенное влияние величины плазменного потока на захват дейтерия. Наблюдается существенное снижение количества захваченного дейтерия с ростом температуры.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (No. 18-72-10162п).

Список использованных источников

- [1] H. Bolt et al., J. Nucl. Mater., 307–311 (2002) 43–52
- [2] Н.П. Бобырь и др., Ядерная физика и инжиниринг, (2021).
- [3] Д.И. Черкез и др., ВАНТ, 2020, т. 43, вып. 3, с. 101-110

Д.С. ДУГИН^{1*}, Н.П. БОБЫРЬ^{1,2}, Д.А. КОЗЛОВ¹

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

²АО ВНИИНМ им. А.А. Бочвара, Москва

*dmitrydugin@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ДЕФЕКТОВ В БРОНЗЕ Cu1Cr0,1Zr НА НАКОПЛЕНИЯ ДЕЙТЕРИЯ

Выполнено исследование накопления в хромциркониевой бронзе Cu1Cr0,1Zr, в том числе в присутствии ионно-индуцированных дефектов. Для проведения исследования выбраны 4 образца бронзы: 2 образца, подвергнутые имитационному облучению ионами Fe²⁺ и энергией 5,6 МэВ до повреждающей дозы 1 сна [1], и 2 исходных образца без дефектов. Для одного из образцов, содержащих ионно-индуцированные дефекты, проведена выдержка в вакууме при 700 °С с целью отжига индуцированных дефектов. Все образцы насыщались в газообразном дейтерии в течение 25 часов при температуре 400 °С. Анализ накопления дейтерия в образцах выполнен с помощью метода термодесорбционной спектроскопии на специализированном стенде [2]. В работе приведены результаты анализа полученных экспериментальных данных и оценка влияния дефектов структуры, а также состава сплава хромциркониевой бронзы на накопление дейтерия в образцах.

Работа выполнена при поддержке НИЦ "Курчатовский институт" (приказ от 18.11.2021 №2948).

Список использованных источников

[1] Use of MeV energy ion accelerators to simulate the neutron damage in fusion reactor materials / Alexander V. Spitsyn [et al.] // Fusion Engineering and Design. – 2019. – Vol. 146. – Part A. – P. 1313—1316.

[2] Дугин Д.С. Исследование процесса накопления дейтерия в сплаве CuCrZr методом термодесорбционной спектроскопии / Бобырь Н.П., Дугин. Д.С., Медников А.А. // Вестник МЭИ. – 2021. – № 6. С. 31—36.

З.Р. АРУТЮНЯН*, Ю.М. ГАСПАРЯН, В.С. ЕФИМОВ, С.А. КРАТ, А.А.
ПИСАРЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
*Harutyunyan@plasma.mephi.ru

ЗАМЕЩЕНИЕ ИЗОТОПОВ ГЕЛИЯ В ВОЛЬФРАМЕ ПРИ ИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

Гелий будет присутствовать в плазме термоядерных установок как продукт термоядерной реакции и взаимодействовать с обращенным к плазме материалом (ОПМ). Вольфрам будет использован в качестве материала наиболее нагруженных частей дивертора в ИТЕР и рассматривается в качестве одного из приоритетных материалов для ОПМ будущих термоядерных реакторов благодаря высокой температуре плавления и теплопроводности и малому коэффициенту физического распыления [1].

Гелий имеет большую энергию связи с дефектами в металлах, поэтому при ионном внедрении достаточно быстро происходит достижение больших концентраций гелия в поверхностном слое. При этом, наблюдается сильная модификация поверхностного слоя и снижается транспорт падающих на поверхность частиц в объем материала. В частности, при одновременном облучении поверхности ионами дейтерия и гелия, проникающий поток дейтерия через вольфрам и скорость интегрального накопления сильно снижаются.

Для более детального изучения процессов накопления гелия в поверхностном слое и его десорбции в данной работе проводились эксперименты с последовательным облучением изотопами гелия (^3He , ^4He) вольфрама при комнатной и повышенных температурах (700-1200К) образца. Эксперименты проводились на ионно-пучковой установке МЕДИОН. В качестве образцов использовались поликристаллические вольфрамовые фольги толщиной 50 мкм и чистотой 99,95% (производство Plansee, Германия), отожженные на установке ТДС-стенд в условиях высокого вакуума при температуре 2000 К с выдержкой 30 мин. Для насыщения гелием поверхностного слоя образцы вначале облучались масс-сепарированным пучком ионами $^4\text{He}^+$ с энергией 3 кэВ дозой $5 \times 10^{21} \text{ He/m}^2$ [2]. Далее образцы облучались ионами $^3\text{He}^+$ в диапазоне доз $1 \times 10^{21} - 5 \times 10^{21} \text{ He/m}^2$. Затем проводился термодесорбционный анализ (ТДС) образца со скоростью нагрева 2 К/с методом *in-situ* в установке МЕДИОН до температуры 1500 К. Также проводился ТДС анализ методом *ex-situ* до температуры выше 2500 К на

установке ТДС-стенд.

При увеличении температуры облучения эффективность замещения увеличивается. При комнатной и повышенных температурах замещение изотопов наблюдается также для высокоэнергетических ловушек, термодесорбционный пик которых появляется при температуре ~ 2500 К.

Список использованных источников

[1] V. Philipps, J. Nucl. Mater. 415 (2011) S2.

[2] Y. Gasparyan, S. Ryabtsev, V. Efimov, Z. Harutyunyan, A. Aksenova, A. Poskakalov, A. Kaziev, M. Kharkov, O. Ogorodnikova, A. Pisarev, S. Kanashenko, Y. Ivanov, Phys. Scr. 2020 (2020).

Е.А. ФЕФЕЛОВА*, С.А. КРАТ, Ю.М. ГАСПАРЯН, В.С. ЕФИМОВ, М.М.
ЗАРИПОВА, М.Г. ИСАЕНКОВА, А.А. ПИСАРЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**eafefelova@email.com*

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСИ ГЕЛИЯ НА СВОЙСТВА СООСАЖДЕННЫХ ВОЛЬФРАМ-ДЕЙТЕРИЕВЫХ СЛОЁВ И УДЕРЖАНИЕ ДЕЙТЕРИЯ В НИХ

Накопление изотопов водорода в материалах реактора является одной из основных проблем на пути к коммерческому термоядерному реактору. В ИТЭР в качестве топлива будет использоваться дейтерий-тритиевая смесь; накопление радиоактивного трития в материалах стенки реактора представляет проблему с точки зрения радиационной безопасности. Одним из основных механизмов накопления изотопов водорода в реакторе является соосаждение с материалами обращенных к плазме элементов [1,2]. В ИТЭР в качестве материала наиболее нагруженной области первой стенки – дивертора, выбран вольфрам. Понимание процесса соосаждения изотопов водорода с этим металлом необходимо для количественной оценки удержания трития в ОПЭ.

На содержание водорода в соосаждённых слоях влияет наличие и состав примесей в водородной плазме. В дейтерий-тритиевой смеси результатом термоядерной реакции является образование гелия. В результате внедрения гелия в материалы первой стенки образуются дополнительные дефекты, которые могут быть заполнены водородом [3]. Можно предположить, что наличие гелия приведет к изменению накопления трития в соосажденных слоях из-за изменения морфологии поверхности. В экспериментах по соосаждению в Ar-D_2 было обнаружено влияние морфологии на накопление водорода [4]. Необходимо изучить влияние гелия на соосаждение трития с материалами стенки камеры для дальнейшей оценки удержания трития в материалах ИТЭР.

В рамках данной работы проводились серии экспериментов по соосаждению дейтерия с вольфрамом на экспериментальной установке МР-2 [5]. Примесь гелия в газовой смеси составляла 0, 5 и 20% от рабочего давления дейтерия (2,8 Па), осаждение проводилось методом магнетронного распыления для трёх температур 400 К, 500 К и 800 К. Полученные образцы исследовались методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) с использованием микроскопа модели Vega 3 Tescan. Все изображения были

получены в отражённых электронах. Образцы имели аморфный рельеф поверхности с единичными дефектами в виде трещин и пылинок, не превышающих размеры 20 мкм. В [6] при соосаждении вольфрама в чисто гелиевой плазме были обнаружены пузырьки размером до 20 нм. Пузырей размером ~ 1 мкм и более не обнаружено.

Также был проведен рентгеновский анализ фазового состава полученных вольфрамовых плёнок. Запись дифракционных спектров для определения фазового состава образцов и оценки их структурного состояния проводилась на дифрактометре Bruker D8 Discover при использовании $\text{Cu K}\alpha$ излучения и позиционно-чувствительного детектора LynxEye. Покртия преимущественно имеют ОЦК-решетку, мелкодисперсны и имеют постоянную решетки от 3,1757 до 3,2051 Å для разных плёнок, в то время как для монокристаллического вольфрама постоянная решетки равна 3,160 Å. Бóльшая постоянная решетки может быть объяснена большим количеством атомов газа в соосажденной плёнке.

Ранее проведенные эксперименты по влиянию гелия на накопление дейтерия в соосажденных вольфрамовых слоях показали, что присутствие значительного количества гелия в целом подавляет накопление дейтерия в плёнке, а незначительна добавка в газовую смесь почти не влияет на накопление дейтерия в плёнке. Это может быть объяснено тем, что гелий и дейтерий конкурируют за одни и те же дефекты с определенными энергиями связи (типы ловушек).

Список использованных источников

- [1] Roth J. и др. Tritium inventory in ITER plasma-facing materials and tritium removal procedures // Plasma Phys. Control. Fusion. 2008. Т. 50, № 10. С. 103001.
- [2] Widdowson A. и др. Overview of fuel inventory in JET with the ITER-like wall // Nucl. Fusion. IOP Publishing, 2017. Т. 57, № 8.
- [3] Bernard E. и др. Tritium retention in W plasma-facing materials: Impact of the material structure and helium irradiation // Nucl. Mater. Energy. Elsevier, 2019. Т. 19, № August 2018. С. 403–410.
- [4] Alimov V.K. и др. Temperature dependence of surface morphology and deuterium retention in polycrystalline ITER-grade tungsten exposed to low-energy, high-flux D plasma // J. Nucl. Mater. Elsevier B.V., 2012. Т. 420, № 1–3. С. 519–524.
- [5] Krat S.A. и др. A setup for study of co-deposited films // J. Instrum. 2020. Т. 15, № 1.
- [6] Katayama K. и др. Deuterium and Helium Release and Microstructure of Tungsten Deposition Layers Formed by RF Plasma Sputtering DEUTERIUM AND HELIUM RELEASE AND MICROSTRUCTURE OF TUNGSTEN DEPOSITION LAYERS. 2017. Т. 1055.

Н.В. ЛЕШОВ*, А.Н. ЩЕРБАК, В.Г. ПЕТРОВ¹, А.Ю. АФОНИН

*Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации
Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Троицк, Москва
leshov@triniti.ru

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДСКАЗАНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ТОКАМАКА T-11M

Одним из важнейших параметров плазмы токамака является электронная плотность. На токамаке T-11M для определения средней плотности используется дифференциальный рефрактометр, где электронная плотность определяется по времени распространения микроволнового сигнала в плазме (набегу фазы между двумя сигналами с близкими частотами) [1]. Одним из недостатков его использования является потенциальная возможность разрушения детекторов микроволнового излучения в условиях развития жесткого рентгеновского излучения, иногда возникающего как результат спонтанного формирования интенсивного пучка ускоренных электронов в режимах технологической подготовки токамака T-11M. В связи с этим использование соответствующей микроволновой аппаратуры для определения электронной плотности в таких разрядах нежелательно.

В данной работе для решения этой проблемы исследуется возможность использования в таких режимах искусственной нейронной сети (ИНС), которая без включения соответствующей микроволновой аппаратуры смогла бы предсказывать плотность плазмы. Известны работы, в которых авторы успешно использовали ИНС для предсказания срывов в плазме [2] и моделирования различных параметров плазмы [3, 4], таким образом доказывая, что ИНС может описать зависимость между параметрами разряда (входными данными) и параметрами плазмы (выходными данными).

Одним из основных параметров, непосредственно влияющих на плотность плазмы, является количество и временной сценарий напуска газа в вакуумную камеру токамака во время плазменного разряда. На токамаке T-11M система газонапуска представлена тремя газовыми импульсными клапанами СНА-2. Соответственно, входные данные – это время открытия газового клапана,

¹ В настоящее время место работы – Координационный Центр "Управляемый термоядерный синтез - международные проекты" (УТС-центр), Москва

длительность его работы и давление газа перед клапанами, а выходные данные – это «сырой» сигнал электронной плотности, измеренный с помощью рефрактометра.

Для обучения ИНС, использовались данные экспериментальной кампании 2016 года, суммарно 851 разряд (при этом использовались данные Коттон-Мутон поляриметра [5]). Входные данные были нормализованы, а выходные данные усреднены. Количество эпох обучения составило 10000, при этом среднеквадратическое отклонение получилось в районе 0,012.

На рисунке 1 представлены результаты сравнения предсказанного и непосредственно измеренного с помощью интерферометра первичного сигнала электронной плотности – разности фаз между обыкновенной и необыкновенной волнами (в вольтах) – в зависимости от времени разряда (разряд №40230). А на рисунке 2 представлен результат сравнения средней электронной плотности для хорды -1 см во время разряда (разряд №40803), рассчитанный по предсказанному и измеренному первичным сигналам интерферометра.

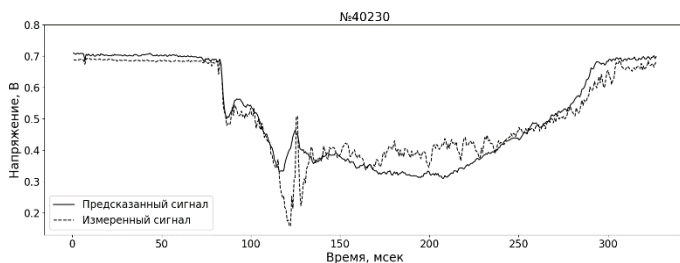


Рис. 1. Временная динамика предсказанного и измеренного первичных сигналов интерферометра в течение разряда (разряда №40230)

Как видно из полученных результатов, предсказанные и реальные сигналы электронной плотности находятся в хорошем согласии. В дальнейшем планируется применение более сложной модели, расширение данных, что позволит учесть и другие параметры разряда, влияющие на плотность плазмы (тип газа, напряжение на катушках тороидального поля и т.п.), а также обеспечить вариативность состояния вакуумной камеры токамака (состояние стенки вакуумной камеры, наличие внутрикамерных устройств – лимитеров, инжекторов и т.п.).

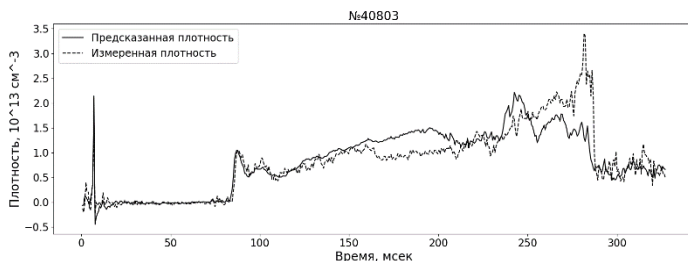


Рис. 2. Временная динамика предсказанной и измеренной средней электронной плотности для хорды -1 см в течение разряда (разряд №40803)

Список использованных источников

- [1] Петров А.А., Петров В.Г., Малышев А.Ю. и др. Физика плазмы, т. 32, №4, 2006. с.346.
- [2] Zheng W. et al. Hybrid neural network for density limit disruption prediction and avoidance on J-TEXT tokamak //Nuclear Fusion. – 2018. – Т. 58. – №. 5. – С. 056016.
- [3] Hui L. I. et al. Machine learning of turbulent transport in fusion plasmas with neural network //Plasma Science and Technology. – 2021. – Т. 23. – №. 11. – С. 115102.
- [4] Yang B. et al. Modeling of the HL-2A plasma vertical displacement control system based on deep learning and its controller design //Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2020. – Т. 62. – №. 7. – С. 075004.
- [5] Петров В.Г., Петров А.А., Малышев А.Ю. и др. Физика плазмы, т. 30, №2, 2004. С. 129.

Г.Б. ВАСИЛЬЕВ^{1*}, С.Д. ФЕДОРОВИЧ¹, А.В. КАРПОВ^{1,2}, В.П. БУДАЕВ^{1,2},
Д.И. КАВЫРШИН^{1,3}, В. ЧАН КУАНГ¹, М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ¹, М.К.
ГУБКИН¹, К.А. РОГОЗИН¹, А.А. КОНЬКОВ¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ»

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

³ОИВТ РАН, Москва, Россия

vasilyevgrv@gmail.com

ИСПЫТАНИЯ ВОЛЬФРАМОВЫХ МОДУЛЕЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ПЛАЗМЕННОЙ И ЛАЗЕРНОЙ НАГРУЗКОЙ

В токаке-реакторе ИТЭР ожидаются мощные нагрузки на вольфрамовые диверторные пластины при действии ЭЛМов [1]. Актуальной задачей является испытание вольфрама мощными импульсными тепловыми нагрузками в стационарном плазменном разряде, моделирование такого процесса можно проводить с использованием мощной импульсной лазерной нагрузки на вольфрам, испытываемый в плазменной установке со стационарным разрядом.

Проведены испытания образцов вольфрама импульсной лазерной нагрузкой во время стационарного плазменного облучения в усовершенствованной установке ПЛМ-М, созданной на базе установки ПЛМ [2]. Создан лазерный комплекс (рис.1) на основе импульсного лазера Nd:YAG модели LQ529A с длиной волны излучения $\lambda = 1064$ нм, энергией импульса $E = 500$ мДж, длительностью импульса 10 нс, плотность мощности лазерного излучения за время импульса на поверхности образца достигла 21 ТВт/м².



Рис. 1. Фото установки ПЛМ-М с лазерным комплексом
Образцы находятся под облучением стационарной гелиевой плазмы в

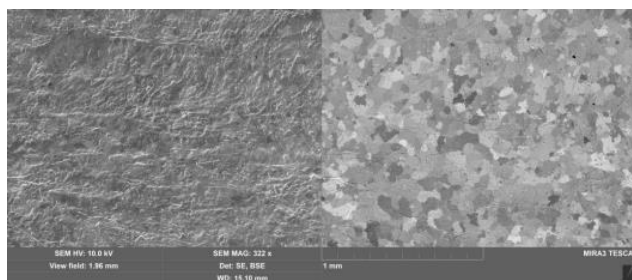
плазменной установке ПЛМ-М с параметрами разряда: ток разряда 20 А, потенциал образца 137 В, давление гелия в разрядной камере $1,2 \cdot 10^{-2}$ Торр, время плазменного облучения - 67 минут.

Четыре вольфрамовых образца (рис. 2) размером 8х8х2 мм установлены в камере ПЛМ-М под углом 45° к плазменному потоку. Лазерное излучение вводилось через боковой патрубок, угол между плоскостью образцов и осью лазерного излучения был 18° . Температура образца в ходе эксперимента достигала 1950°C .

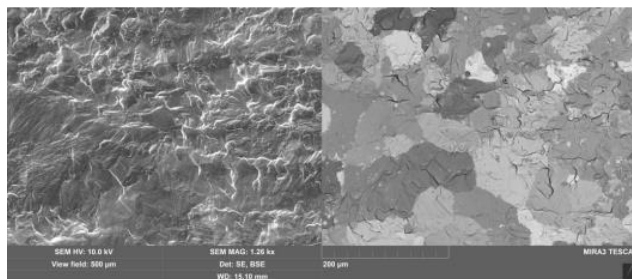


Рис. 2. Вольфрамовые образцы после испытаний лазерной и плазменной нагрузкой в ПЛМ-М

Измерения температуры поверхности во время эксперимента проводились пирометром. Анализ спектров оптического излучения плазмы показал, что в спектре присутствуют линии излучения вольфрама. Это свидетельствует об испарении вольфрама с поверхности образца. Исследование поверхности вольфрамовых образцов после испытаний сканирующим электронным микроскопом показало наличие макродефектов и отсутствие частиц металла и загрязнения поверхности. Наблюдение фазового контраста на изображении СЭМ с BSE-детектора свидетельствует о полной рекристаллизации поверхности (рис. 3). В области действия комбинированной плазменной и лазерной нагрузки происходит расплавление тонкого приповерхностного слоя с последующей быстрой кристаллизацией, что приводит к появлению зерен рекристаллизации размером 5-10 мкм.



а



б

Рис. 3. СЭМ микрофотографии поверхности образца вольфрама после облучения в плазме установки ПЛИМ-М полученные на SE-детекторе (слева) и BSE-детекторе (справа) при увеличении 321X (а) и 1260X (б)

Проведены аналогичные испытания вольфрамовых образцов с развитой высокопористой структурой. Испытания показали, что поглощение лазерного излучения происходит в верхнем слое пористом слое, тепловой контакт расплава с поверхностью намного ниже, градиенты температуры на поверхности сплошного металла ниже. Однако в этом случае расплавленный слой имеет более высокую температуру и медленнее остывает, что резко увеличивает эмиссию атомов вольфрама в плазму. Наблюдалось растрескивание поверхности в области действия лазерной нагрузки (рис. 4), наибольшее количество трещин наблюдалось в центре пятна в области максимального энерговыделения. Ширина трещин достигает 15 мкм, длина 1 мм, эволюция таких крупномасштабных трещин может приводить к разрушению образца.

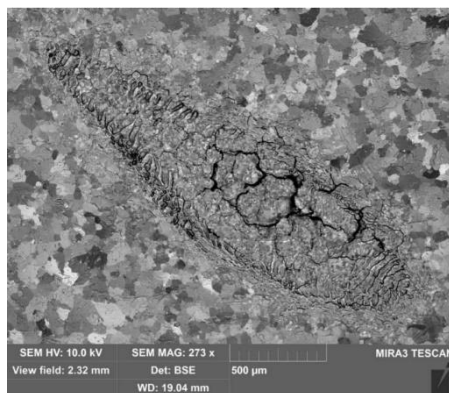


Рис. 4. СЭМ микрофотографии пятна взаимодействия лазера на поверхности вольфрамового образца

На поверхности пятна лазерной нагрузки обнаружены кратеры от дуговых (искровых) процессов, покрытые высокопористым слоем. Они находятся в центральной области лазерной обработки и сформировались после кристаллизации расплавленного слоя. Это подтверждает возможность инициализации процессов дуговых разрядов лазерным излучением.

Плазменные испытания выполнены при поддержке ГК «РОСАТОМ» проект 223 ЕОТП-УТП, анализ поверхности материалов проведен при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FSWF-2020-0023, оценки радиационных эффектов проведены при поддержке гранта РФФИ 19-29-02020, спектроскопическое исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ 21-79-10281.

Список использованных источников

- [1] Будаев В.П. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2015, т. 38, № 4, с. 5.
- [2] Будаев В.П. и др. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2017. т.40, №3. с.35.

А.П. МЕНУШЕНКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
armenushenkov@mephi.ru*

СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ – УНИКАЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕЩЕСТВА

Современное развитие физики конденсированного состояния и наук о материалах трудно себе представить без использования уникальных инструментов – синхротронного (СИ) и нейтронного излучений, позволяющих исследователям заглянуть глубоко внутрь вещества на атомарном уровне. В докладе представлены основные свойства СИ, перечислены ведущие мировые центры синхротронных исследований, показаны перспективы развития СИ и лазеров на свободных электронах в России и за рубежом. На примере работ, выполненных автором, изложены основные методы исследования различных материалов с использованием СИ, включая малоугловое рассеяние, аномальную рентгеновскую дифракцию, рентгеновскую спектроскопию поглощения (EXFS и XANES), фотоэлектронную спектроскопию (XPS), рентгеновский магнитный круговой дихроизм (XMCD), резонансное неупругое рентгеновское рассеяние (RIXS) и др.

А.А. АЙРАПЕТОВ, Я.А. САДОВСКИЙ, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ*
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
*lbb@plasma.mephi.ru

ЗОНДОВОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЫ С ДИВЕРТОРОМ В ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ

Дивертор термоядерной установки является элементом, подвергающимся наиболее интенсивным плазменным воздействиям. В настоящее время ведутся интенсивные исследования, посвящённые разработке материалов и режимов плазменного облучения диверторов следующего поколения токамаков, способных работать в квазистационарном режиме. Для решения этих задач чрезвычайно важно выявить специфику и параметры процессов взаимодействия плазмы с дивертором в условиях экстремально высоких температур и интенсивностей плазменного облучения, реализуемых на его поверхности.

В настоящее время методы, используемые для исследования взаимодействия плазмы с диверторами токамаков можно подразделить на методы, измеряющие в реальном времени параметры придиверторной плазмы, и методы, анализирующие усреднённый результат воздействия плазмы на образцы материалов, установленных на поверхности дивертора и облучавшихся плазмой в течение серии различных разрядов. В результате, возникают проблемы установления соотношения между параметрами воздействия плазмы на дивертор, характером процессов на поверхности дивертора и их воздействием на плазму. Эта проблема может быть устранена при использовании для изучения взаимодействия плазмы с дивертором предлагаемого зондового устройства «диверторного зонда».

Зонд вводится в тайл дивертора со стороны, обратной облучению плазмой и располагается в нём. Рассматриваются две конструкции зонда: с активной и с пассивной системами охлаждения. Элемент зонда, «смотрящий» в плазму, (образец) является сменным.

Предполагается в реальном времени измерять потоки и энергию ионов или электронов плазмы и тепловые потоки на образец, а также использовать его в функции зонда Ленгмюра для анализа параметров плазмы в области дивертора. С этой целью поверхность образца может располагаться вровень с поверхностью тайла, быть утопленной, либо выступать над ней.

Анализ экспонированных в плазме образцов, выполненных из материала

дивертора, позволит определить скорость распыления дивертора, характер модификации структуры и рельефа его поверхности, количество и состав твердотельной примеси, осевшей на поверхности дивертора, и газов, внедрившихся в его объём. Вывод образцов из токамака и замена образцов может проводиться между импульсами без развакуумирования токамака (в ручном или автоматическом режиме).

Система обеспечения работы зонда находится в вакуумном объеме с собственной системой откачки, в котором располагается эндоскоп ввода зонда в токамак, устройство его передвижения, емкости со свежими и с экспонированными образцами, роботизированный узел, выполняющие механические операции, обеспечивающие реализацию описанных выше функций зонда. Цикл работы зонда: установка образца на фронтальной части зонда, ввод зонда в дивертор, проведение измерений, вывод зонда из токамака, перемещение экспонированного в плазме образца в хранилище использованных образцов (или его извлечение из вакуумной камеры для проведения анализов) выполняется автоматически в соответствии с программой эксперимента.

Диверторный зонд обеспечит получение детальной картины процессов на поверхности дивертора при различных режимах его облучения плазмой и позволит ускорить отбор материалов для диверторов токамаков следующих поколений.

ЗОНДОВОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ «ПЛАЗМА/СТЕНКА» В ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ

Взаимодействие плазмы с материалами первой стенки, диафрагм, дивертора термоядерных установок порождает целую серию явлений, в той или иной степени отрицательно влияющих на параметры плазмы. Исследование взаимодействия «/стенка» и попытка на этой основе предотвратить развитие или, по крайней мере, ослабить указанные явления чрезвычайно актуальна, поскольку разворачиваются работы по разработке и исследованию кандидатных материалов для контактирующих с плазмой элементов будущего поколения термоядерных установок.

В действующих термоядерных установках для изучения взаимодействия плазмы с материалами плазменной камеры используется значительное количество узкоспециализированных методов и устройств, проводящих измерения в режиме реального времени или оперирующие с информацией, усреднённой по большому числу разных разрядов. В результате не удаётся в совокупности получить достаточно полный объёма измерений, необходимых для характеристики условий, определяющих наблюдаемые эффекты взаимодействия плазмы со стенкой.

Проблему одновременного выполнения комплекса измерений в периферийной плазме, необходимого для выработки достоверного суждения об исследуемом явлении, процессе и т.п., предлагается решить с помощью зондового устройства, выполненного в виде малоразмерного многофункционального зонда, вводимого в плазму, не оказывающего заметного влияния на её параметры и способного проводить комплекс исследований периферийной плазмы на различных этапах разряда.

Зонд включает материаловедческую и спектрометрическую секции, расположенные в защитном кожухе, а также внешние устройства: зонд Маха, зонды Ленгмюра, экспонируемые в плазме образцы. Секции зонда работают независимо друг от друга и вместе дают комплексную информацию о компонентах пристеночной плазмы.

Зонд может вводиться и выводиться из токамака без перерыва в работе токамака

Зонд предназначен для выполнения следующих измерений.

- In situ анализ атомов твердотельной примеси. Разрешение: 1-2 осаждённых атомных слоёв при 20-100 слоях на коллекторе, и 2-5 атомных слоев 100-1000 напыленных слоях.
- In situ масс-спектрометрический анализ потока ионов плазмы в диапазоне отношений массы иона к заряду ($m/Z=1\div 100$). Разрешение регистрации $(m/Z)/\Delta(m/Z)$ увеличивается с уменьшением параметра m/Z от трех при $50 < m/Z < 100$ до десяти при $1 < m/Z < 10$. Минимально регистрируемая концентрация примеси вольфрама составляет 0.01% по отношению к общему количеству ионов.
- In situ анализ энергии ионов водорода в диапазоне (1÷500 эВ). Разрешение $E/\Delta E \approx 10$.
- Зонд Маха, позволяет проводить измерения скорости потока периферийной плазмы, а также измерения характерные для одиночного зонда Ленгмюра.
- Аккумуляция на коллекторе и последующий анализ атомов твердотельной примеси плазмы, быстрых ионов плазмы, и захваченных в осаждённый слой атомов газа.

Зонд обеспечивается системами автоматического управления и обработки результатов измерений, интегрируемые в систему управления токамака.

Многофункциональный зонд позволит получать комплекс необходимых экспериментальных данных для того, чтобы составить суждение о процессах на облучаемой плазмой стенке плазменной камеры и о влиянии этих процессов на плазму.

С.В. РОГОЖКИН^{1,2*}, А. А. НИКИТИН^{2,1}, А.А. ХОМИЧ^{2,1}, А.А. БОГАЧЕВ^{2,1},
А.В. КЛАУЗ^{1,2}, Н.А. ИСКАНДАРОВ^{2,1}, А.А. ЛУКЬЯНЧУК^{2,1}, О.А.
РАЗНИЦЫН^{2,1}, А.С. ШУТОВ^{2,1}, А.Г. ЗАЛУЖНЫЙ^{1,2}, Ю.Е. ГОРШКОВА³,
Г.Д. БОГУЧАВА³

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

²НИИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ, Москва, Россия

³Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*SVRogozhkin@mephi.ru

КОМПЛЕМЕНТАРНЫЙ АНАЛИЗ РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В МАТЕРИАЛАХ

Прогнозирование радиационной стойкости конструкционных материалов в радиационных полях неразрывно связано с пониманием процессов эволюции микроструктуры (формирования радиационных дефектов, предвыделений и выделений фаз, перераспределения примесей и легирующих элементов). Хорошо известно, что существенные макроскопические проявления, такие как распухание, охрупчивание и т.д., непосредственно связаны с процессами, протекающими на атомно-либо нано-масштабном уровне. В тоже время экспериментальное изучение процессов на таких масштабах в сталях и других многокомпонентных материалах затруднительно. Изучение структурных перестроек таких материалов требует применения ряда экспериментальных методик.

Универсальным методом анализа микроструктуры материалов является просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ), позволяющая анализировать зёрненную структуру, фазовое состояние и различные включения (см., например [1, 2]). Современные ПЭМ установки также позволяют проводить рентгеновской спектроскопии или спектрометрию электронных энергетических потерь [3]. Мельчайшие включения и кластеры можно обнаружить с помощью малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) [4] или с помощью атомно-зондовой томографии (АЗТ) [2, 5]. МУРН позволяет определить с высокой точностью объемную плотность включений и нанокластеров, а также получить их распределение по размерам. Химический состав и пространственное распределение этих кластеров могут быть детально изучены с помощью атомно-зондовой томографии. АЗТ исследования показывают, что состав наноразмерных включений зачастую отличается от состава больших стехиометрических включений фаз. Эти методы являются взаимодополняющими, и исчерпывающую информацию дает только комплексный анализ радиационно-индуцированных эффектов [5, 6].

В настоящей работе представлены результаты анализа наноструктуры различных реакторных сталей. Значительное внимание уделено дисперсно-упрочненным оксидами сталям, содержащим высокую плотность оксидных включений и нанокластеров, обогащенных Y, O и другими легирующими элементами. Представлены результаты комплексного анализа с применением методов просвечивающей электронной микроскопии, атомно-зондовой томографии, малоуглового рентгеновского рассеяния.

Список использованных источников

- [1] S.V. Rogozhkin, A.A. Bogachev A.A. Nikitin, et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 486, 1–10 (2021),
- [2] S.V. Rogozhkin, A.A. Khomich, A.A. Bogachev, et al. Physics of Atomic Nuclei, 83(11), 1519–1528 (2020),
- [3] M. Klimenkov, R. Lindau, A. Möslang, J. Nucl. Mater. 386–388 553-556 (2009),
- [4] R. Coppola, M. Klimiankou, R. Lindau, R.P. May, M. Valli, Physica B 350, e545–e548 (2004)
- [4] S.V. Rogozhkin, A.A. Aleev, A.G. Zaluzhnyi, et al, J. Nucl. Mater. 409, 94–99 (2011),
- [5] E. Meslin, M. Lambrecht, et al, J. Nucl. Mater. 406, 73–83 (2010)
- [6] A. Kryukov, L. Debarberis, A. Ballesteros, et al, J. Nucl. Mater. 429, 190–200 (2012).

Д.М. БАЧУРИНА^{1*}, А.Н. СУЧКОВ¹, И.В. КОЗЛОВ^{1,2}, Н.П. БОБЫРЬ³, Ю.А. ГУРОВА¹, В.С. ЕФИМОВ¹, Е.С. КУЛИКОВА³, А.В. СПИЦИН^{1,3}, Ю.М. ГАСПАРЯН¹

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

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Россия

³НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

*dmbachurina@mephi.ru

ВЛИЯНИЕ ДЕЙТЕРИЯ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ МАЛОАКТИВИРУЕМОГО ПРИПОЯ TiZr4Be

Существующие концептуальные проекты первой стенки и дивертора реактора ДЕМО подразумевают наличие неразъемного соединения вольфрама с малоактивируемой ферритно-мартенситной сталью [1,2]. Из-за разницы коэффициентов теплового расширения (КТР) W и стали их прямое соединение затруднено [3]. Перспективным методом получения такого соединения является высокотемпературная пайка быстрозакаленными ленточными сплавами припоями. Для компенсации различий КТР предлагается использование различных промежуточных слоев (V, Ta и др.). К настоящему моменту предложено несколько компенсирующих проставок и припоев для соединения вольфрама со сталью. В подавляющем большинстве работ представлена пайка припоями на основе меди или никеля [4], которые, не удовлетворяют требованию малоактивируемости.

В данной работе было предложено использование тантала в качестве компенсирующего слоя и малоактивируемого припоя 48Ti-48Zr-4Be мас.%. Такая композиция характеризуется хорошими механическими свойствами и стойкостью к термической усталости [5]. Однако, элементы, входящие в состав припоя являются хорошими гидридообразователями. Поэтому в данной работе исследовали влияние дейтерия на фазовый состав припоя.

Насыщение припоя проводили в газе D₂ при 300, 400, 500 и 600°C и давлении 10⁴ Па. Чистота газа D₂ была выше 99,99%. Перед насыщением проводили обезгаживание припоя при 600°C в течение 2 часов. Время насыщения составляло 50 часов.

Для определения точного фазового состава припоя TiZr4Be был использован анализ синхротронной рентгеновской дифракции (SynXRD). Перед анализом фольгу отжигали при 600°C в течение 2 часов, что соответствует процедуре обезгаживания. Также проводили исследование фазового состава припоя после насыщения в D₂. SynXRD выполняли на

канале рентгеноструктурного анализа Курчатовского источника синхротронного излучения с монохроматическим излучением с длиной волны 0,74 Å. Образец припой располагали перпендикулярно лучу, точное описание схемы можно найти в [6]. Время экспозиции составляло 240 с. Индексацию записанной дифрактограммы выполняли с помощью ICDD PDF4+.

Установили, что припой до насыщения состоит из следующих фаз: Ti_7Zr_3 , $Be_{17}Zr_2$, твердого раствора $\beta(Ti,Zr)$ и Be_2Zr .

Фазовые составы припоев после насыщения при 300 и 400°C идентичны: Be_2Zr и Ti_7Zr_3 . Гидриды не образуются, что коррелирует с относительно низким удерживанием дейтерия в этих условиях. Кроме того, $Be_{17}Zr_2$ и $\beta(Ti,Zr)$ растворялись, вероятно, из-за длительного времени отжига при выдержке (50 часов).

Гидриды образовались в припоях, подвергнутых насыщению при 500 и 600°C. При 500°C установлено образование дейтерида титана ($TiH_{1.96}$, ICDD № 04-002-5203) и отсутствие фаз $Ti-Zr$. Это означает, что весь титан взаимодействовал с дейтерием и высвобождался, оставляя αZr в твердом растворе. В фольге, выдержанной при 600°C, преобладают интенсивные пики $TiZrD_2$ ($TiZrD_2$, ICDD № 01-082-7060) и $Be_2ZrD_{0.56}$ ($Be_2ZrH_{0.56}$, ICDD № 04-013-0305) при отсутствии четких пиков интерметаллидов. Возможно присутствие других фаз, но в меньших концентрациях.

Образование гидридов коррелирует с результатами измерения захвата дейтерия. Средняя концентрация дейтерия при 500 и 600°C выше на два порядка по сравнению с насыщением при 300 и 400°C. Таким образом, можно сделать вывод, что захват дейтерия при температуре менее 400°C происходит за счет растворения, в то время как при температуре выше 500°C за счет формирования гидридных фаз.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 17-72-20191. Исследование образцов с помощью синхротронного излучения выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 075-15-2021-1352).

Список использованных источников

- [1] Tassone A. et al. Recent Progress in the WCLL Breeding Blanket Design for the DEMO Fusion Reactor // IEEE Trans. Plasma Sci. 2018. Vol. 46, № 5. P. 1446–1457.
- [2] Aubert J. et al. DEMO Breeding Blanket Helium Cooled First Wall design investigation to cope high heat loads // Fusion Eng. Des. Elsevier, 2019. № September 2018. P. 0–1.

- [3] Basuki W.W., Aktaa J. Investigation on the diffusion bonding of tungsten and EUROFER97 // J. Nucl. Mater. Elsevier B.V., 2011. Vol. 417, № 1–3. P. 524–527.
- [4] Bachurina D. et al. Overview of the mechanical properties of tungsten/steel brazed joints for the demo fusion reactor // Metals (Basel). 2021. Vol. 11, № 2. P. 1–11.
- [5] Bachurina D. et al. Brazing tungsten/tantalum/RAFM steel joint for DEMO by fully reduced activation brazing alloy 48Ti-48Zr-4Be // Metals (Basel). 2021. Vol. 11, № 9.
- [6] Bachurina D. et al. Joining tungsten with steel for DEMO: Simultaneous brazing by Cu-Ti amorphous foils and heat treatment // Fusion Eng. Des. Elsevier B.V., 2020. Vol. 162, № October 2020. P. 112099.

О ВОЗМОЖНОСТИ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОДУКТОВ ЭРОЗИИ ВОЛЬФРАМА С УГЛЕРОДНЫМИ ПРИМЕСЯМИ

Показана возможность исследования спектроскопическими методами электронной структуры и регистрации продуктов эрозии первой стенки из вольфрам-содержащих материалов с примесью углеродных осадений, оставшихся от предыдущих кампаний, а также от углерода в виде атмосферных газов или из спектра остаточных газов вакуума – CO_2 , CO , C_xH_y . Известно, что углеродные материалы на данном этапе используются в некоторых токамаках диверторного типа (например, DIII-D, NSTX-U, KTM) или применялись ранее до перехода на металлическую первую стенку (например, JET, T-10 до 2016 г.). Актуальность исследований по теме «углеродные – металлические материалы первой стенки» обусловлена, в том числе, сооружаемым термоядерным реактором JT-60SA (Япония, в поддержку проекта ИТЕР и ДЕМО) с первой стенкой и дивертором из углеродных волокнистых композитов, с которыми будут работать в течение первых 10 лет после запуска, с последующим переходом на металлические стенки [1]. Рассмотрены наиболее используемые на практике спектроскопические методы, такие как рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС), ИК-спектроскопия и комбинационное рассеяние света. В качестве примеров, демонстрирующих подобные возможности, в работе показаны результаты следующих исследований: 1) смешанных пленок $\text{CH}_x\text{-Me}$ (примеси $\text{Me} = \text{W}$, Fe и др.) на подложке $\text{Si}(100)$ из сильноточного плазменного ускорителя КСПУ-Т (ТРИНИТИ) при облучении вольфрамовой мишени водородной плазмой, 2) углеродно-дейтериевых пленок CD_x ($x = \text{D/C} \approx 0,3 - 0,8$, т.е. хлопья, или флейки (flakes) толщиной ~ 30 мкм) из дейтериевых плазменных разрядов токамака T-10 [2], 3) литературные сведения по исследованию вольфрама указанными методами. В качестве примера измерений с помощью РФЭС, на рис.1, 2 показаны различия электронной структуры, полученные из спектров валентной зоны пленок $\text{CH}_x\text{-Me}$ и CD_x . В итоге, в работе представлены различия спектральных особенностей вольфрамовых и углеродных продуктов эрозии, что позволяет проводить подобные спектроскопические исследования.

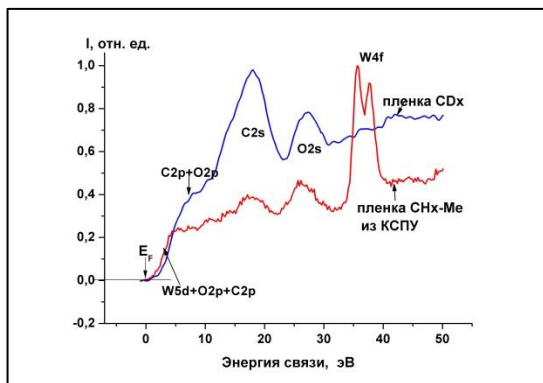


Рис. 1. Нормированные спектры валентной зоны (ВЗ) пленок CD_x ($x \approx 0.5$) и CH_x -Me (включая примесь W). Показаны характерные полосы для CH_x -Me (красный цвет): гибридные состояния $W5d+O2p+C2p$, $C2s$, $O2s$ и дублет $W4f$, а также состояния для CD_x (синий): $C2p+O2p$, $C2s$ и $O2s$.

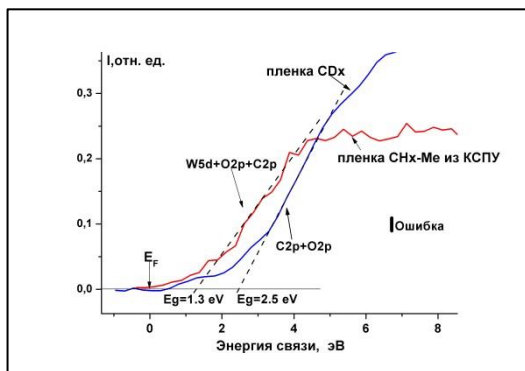


Рис. 2. Оценка запрещенных зон E_g по касательной (пунктирная линия) к краю ВЗ из спектров на рис.1 дает величины $E_g = 2.5 \pm 0.04$ эВ (CD_x) и $E_g = 1.3 \pm 0.04$ эВ (CH_x -Me), измеренные относительно уровня Ферми E_F .

Список использованных источников

- [1] G. Giruzzi, M. Yoshida, et al. Nucl. Fusion. 2017. V.57. P. 085001.
- [2] Н. Ю. Свечников, В. Г. Станкевич, и др. Поверхность. Рентген., синхр. и нейтр. исслед. 2017. № 12. С. 3–11.

Н.П. БОБЫРЬ^{1,2}, Т.А. АНФИМОВА^{1,3*}, Б.В. ИВАНОВ¹, А.С. АНИКИН², И.Г. ЛЕСИНА², А.А. СЕМЕНОВ², Н.Е. ЗАБИРОВА², А.С. КРЮКОВА², А.Н. БУКИН^{2,3}, А.В. ЛИЗУНОВ²

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

²АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара», Москва

³Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва
*Anfimova_TA@nrcki.ru

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РАДИОЛЮМИНОГРАФИИ ДЛЯ АНАЛИЗА НАКОПЛЕНИЯ ТРИТИЯ В ЭЛЕКТРОННО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ДЕФЕКТАХ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛАХ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Важным критерием выбора материалов для термоядерного реактора выступают характеристики взаимодействия с изотопами водорода, поскольку воздействие интенсивных потоков дейтерия и трития на стенки вакуумной камеры будет сопровождаться диффузией сквозь стенку и захватом изотопов водорода в металлах и сплавах. Дополнительными ловушками для захвата водорода будут выступать дефекты, образующиеся в результате воздействия ионов и нейтронов на материалы стенки. В связи с этим особую актуальность приобретают исследования влияния нейтронно-индуцированных повреждений на накопление изотопов водорода в материалах термоядерного реактора. Ввиду сложности осуществления нейтронного облучения для решения исследовательских задач применяются иные методы создания дефектов – облучение тяжелыми ионами, легкими ионами (протонами, углеродом), а также электронами.

В данной работе продемонстрирована принципиальная возможность применения метода радиолюминографии [1] для изучения влияния дефектов, созданных облучением малым потоком электронов, на удержание трития в вольфраме. В рамках данного исследования была решена задача определения чувствительности указанного метода к небольшим количествам трития, накапливаемым в таких дефектах. Используемый метод является неразрушающим и не оказывающим влияния на тритий, удерживаемый в материале, что обеспечивает возможность проведения повторного анализа. Приведены результаты исследования распределения трития в вольфраме, облученном электронами, непосредственно после насыщения из газовой фазы, а также после длительного (~2 года) хранения в комнатных условиях.

Работа выполнена при поддержке НИЦ "Курчатовский институт" (приказ от 18.11.2021 №2948).

Список использованных источников

[1] Иванов Б.В. Радиолуминография как метод изучения взаимодействия изотопов водорода с конструкционными материалами: область применения, достоинства и недостатки // Успехи в химии и химической технологии. 2013, 27(6):131-135.

Н.Е. ЕФИМОВ^{1*}, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ¹, Д.Г. БУЛГАДАРЯН¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

*NEEfimov@mephi.ru

КАЛИБРОВКА АНАЛИЗАТОРА ПОТОКОВ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ ДЛЯ ТОКАМАКА МИФИСТ

Один из наиболее распространённых методов определения температуры ионной компоненты плазмы в токамаках подразумевает анализ энергетических распределений нейтралов перезарядки, покидающих область плазменного шнура. Для этого поток частиц из разрядной камеры предварительно ионизуют и затем осуществляют его разделение в электростатических или магнитных сепараторах. Обдирка нейтральных атомов, как правило, осуществляется путём их пропускания через газовую среду или сквозь тонкую (~ 50 Å) углеродную плёнку. При этом в случае анализа нейтралов с энергиями до 5 кэВ газовая обдирка оказывается более эффективной [1].

МИФИСТ – малый учебно-исследовательский токамак ($a = 13$ см, $R = 25$ см) с тороидальным полем до 0,8 Тл, током плазмы порядка 8 кА и ожидаемой температурой ионов 200 эВ [2]. Для анализа энергетических распределений потока нейтральных атомов из плазмы будет применена комбинация газовой мишени (длина 50 мм, диаметры входного и выходного отверстий 1 мм) и электростатического энергоанализатора с плоскопараллельными пластинами и тормозящим полем. Подобная конструкция ранее применялась на малых токамаках и отличается надёжностью и компактностью [3].

В качестве рабочего вещества газовых ионизаторов в токамаках распространены H_2 и N_2 . В данной работе предложено применить для обдирки гексафторида серы. Этот газ привлекателен высокой температурой сублимации ($-63,8$ °C), что позволяет поддерживать низкий уровень его парциального давления в вакуумной камере за счёт применения азотной криоловушки. Таким образом, снижаются требования на скорость откачки основными высоковакуумными насосами данной диагностики. За счёт высокой энергии сродства к электрону SF_6 применяется как газ, повышающий вакуумную электрическую изоляцию путем захвата свободных электронов, что также может привести к более эффективной ионизации нейтральных атомов водорода.

В рамках данной работы на ионно-пучковой установке «Большой масс-монохроматор «МИФИ» [4] проведено определение зависимости

коэффициента обдирки атомов водорода при прохождении через различные газовые мишени (H_2 , N_2 , SF_6 , Ar) от давления газа и энергии частиц. В качестве источника нейтральных атомов водорода кэВных энергий использован эффект перезарядки пучка моноэнергетических ионов на твердотельной золотой мишени при малоугловом рассеянии. Показано, что применение SF_6 по сравнению с остальными газами позволяет достичь лучшей эффективности обдирки атомов при меньшем давлении газа (рис. 1), что снижает требования к системе откачки анализатора. Получена кривая зависимости коэффициента ионизации атомов водорода от их энергии (рис. 2), позволяющая осуществить восстановление истинной формы спектра после обдирки атомов.

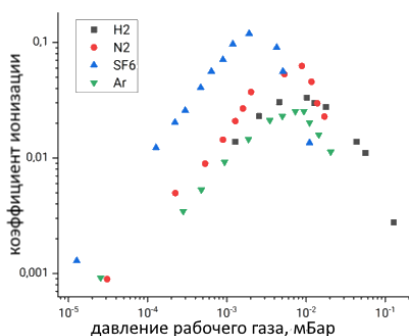


Рисунок 1. Зависимость коэффициента ионизации атомов водорода с энергией 3 кэВ от давления при различных рабочих газах.

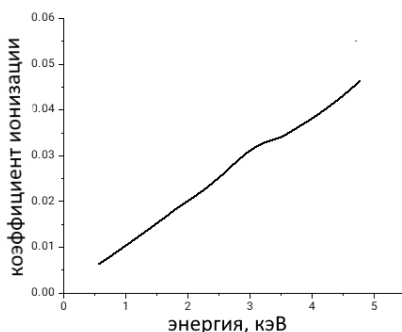


Рисунок 2. Зависимость коэффициента ионизации при рабочем газе SF_6 с давлением $7E-4$ мБар от энергии атомов водорода.

Для определения влияния аппаратной функции анализатора на форму энергетического распределения проведено компьютерное моделирование в среде Comsol Multiphysics траектории движения ионов в созданном электростатическом энергоанализаторе (рис. 3), а также экспериментальная проверка на моноэнергетическом пучке ионов водорода различных энергий. Получены численная и экспериментальная зависимости энергии настройки каждого канала от разности потенциалов на обкладках, а также зависимость $\Delta E/E$ от номера канала (рис. 4). Наблюдается хорошее согласие модели с экспериментом, что позволяет использовать её в дальнейшем для более широкого диапазона энергий частиц. Энергетическое разрешение для каналов

оказывается не хуже 20%.

Таким образом, в работе проведена разработка и калибровка анализатора нейтралов перезарядки для токамака МИФИСТ. Предложена методика определения зависимости коэффициента обдирки нейтралов от давления газовой мишени и энергии частиц с помощью ионного пучка. Показана целесообразность применения гексафторида серы для обдирки пучка атомов, получены калибровочные зависимости для восстановления истинного энергетического распределения частиц.

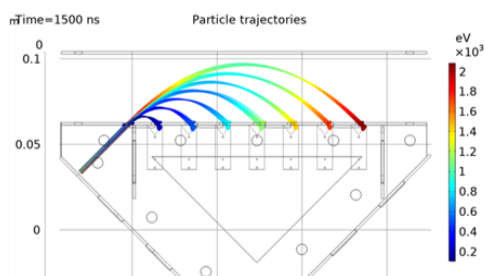


Рисунок 3. Трасектории движения протонов с различными энергиями в электрическом поле анализатора нейтралов при потенциале на верхней обкладке 1200 В. Расчёт в Comsol Multiphysics 5.6.

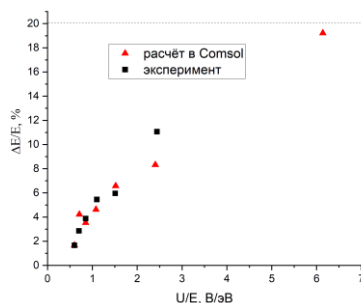


Рисунок 4. Зависимость разрешения анализатора от отношения потенциала на сетке к энергии диагностического пучка ионов.

Список использованных источников

- [1] Kislyakov A.I., Petrov M.P. Neutral atom analyzers for diagnosing hot plasmas: A review of research at the ioffe physicotekhnical institute // Plasma Phys. Reports. 2009. Vol. 35, № 7. P. 535–551.
- [2] Kirneva N.A. et al. Working area of the mephist tokamak: Preliminar estimation // Probl. At. Sci. Technol. Ser. Thermonucl. Fusion. 2020. Vol. 43, № 3. P. 90–100.
- [3] Ajay K., Pandya S.P., Aggarwal S. Experimental Results of Core Ion Temperature and Neutral Density Measurements on ADITYA Tokamak using Four Channels Neutral Particle Analyzer // J. Fusion Energy. Springer US, 2020. Vol. 39, № 3. P. 111–121.
- [4] Bulgadaryan D. et al. Application of keV-energy proton scattering for thin film analysis // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. Elsevier, 2019. Vol. 438, № August 2018. P. 54–57.

Ю.М. ГАСПАРЯН*, Д.Г. БУЛГАДАРЯН, А.И. АЛИЕВА, Н.Н. ДЕГТЯРЕНКО, Н.Е. ЕФИМОВ, В.С. ЕФИМОВ, А.В. КАЗИЕВ, С.А. КРАТ, В.В. КУЛАГИН, Е.Д. МАРЕНКОВ, Ф.С. ПОДОЛЯКО, Н.С. СЕРГЕЕВ, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ, И.А. СОРОКИН, А.А. СТЕПАНЕНКО, А.М. СТОЛБОВ, М.А. ПОПОВА, М.М. ХАРЬКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**YMGasparyan@mephi.ru*

МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ НАКОПЛЕНИЯ И УДАЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА ИЗ СТЕНОК ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК

В настоящее время идет строительство международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР, также в различных странах ведутся активные работы по разработке демонстрационных реакторов (ДЕМО). В России активно обсуждается разработка гибридных термоядерных реакторов и источников нейтронов. Основные отличия термоядерных установок нового поколения – большая мощность и длительность разрядов, работа с радиоактивным тритием, производство высокоэнергетических нейтронов и частиц гелия в ходе DT- реакции. Эти особенности требуют уточненных данных о поведении изотопов водорода в этих условиях, а также разработки дистанционных методов контроля их накопления в установках.

Активно рассматривается возможность использования лазерного излучения для этих целей, под действием которого в зависимости от мощности излучения происходит либо десорбция захваченного газа, либо абляция поверхностного слоя. Разработка дистанционных методов контроля на основе лазерного излучения признана одной из приоритетных задач ИТЭР на ближайшие годы. Основные механизмы накопления изотопов водорода в термоядерных установках – это соосаждение с распыленным материалов стенки в зонах преимущественного осаждения и накопление в объеме материала, которое может вносить большой вклад при наличии высокой концентрации радиационных дефектов, создаваемых высокоэнергетическими нейтронами. В данной работе описаны результаты экспериментов, расчетов и компьютерного моделирования поведения изотопов водорода в металлах, в том числе при импульсном лазерном воздействии, проводимых в лаборатории «Физико-химические процессы в стенках термоядерных установок» института ЛаПлаз НИЯУ МИФИ.

В частности, на экспериментальной установке «Большой-масс

монохроматор МИФИ» была определена зависимость количества дейтерия, выходящего из соосажденных титан-дейтериевых и вольфрам-дейтериевых слоев, от плотности энергии (до 30 Дж/см^2) воздействующего на них лазерного импульса длительностью 10 нс (рис. 1). Для импульса с этими параметрами с помощью моделирования в коде TMAP7 определена динамика изменения профилей концентрации водорода в вольфраме, а также исследовано влияние на выход водорода различных заселенностей, энергий и концентраций ловушек и теплофизических свойств материала. Сравнение результатов полученных результатов с экспериментальными для некоторых конфигураций параметров показано на рис. 2.

Проведена оценка атомарной фракции в потоке десорбции изотопов водорода при лазерном воздействии в зависимости от условий на поверхности. На основе рассматриваемой модели было получено аналитическое выражение, определяющее поток атомов водорода с поверхности в зависимости от температуры, интегрального потока десорбции и потенциального барьера активации хемосорбции. Была получена характерная температура, при которой атомарная фракция начинает преобладать над молекулярной. Представлена оценка атомарной фракции водорода при потоках, характерных для лазерно-индуцированной десорбции. Согласно расчетам, десорбция с чистой поверхности вольфрама будет происходить преимущественно в виде молекул вплоть до температуры плавления вольфрама.

Исследована радиационная динамика расширяющейся лазерной плазмы. Показано, что при условии локального термодинамического равновесия плазмы интенсивность излучения для высокоионизированного облака зависит от показателя адиабаты γ . Если $\gamma > 5/3$, интенсивность излучения атомов увеличивается со временем до тех пор, пока температура облака не станет низкой и степень ионизации не станет большой. За $\gamma < 5/3$ интенсивность излучения атомов в высокоионизированном режиме может иметь минимум. В слабоионизованном случае интенсивности убывают со временем. Эти результаты не зависят от конкретных профилей температуры и плотности и, следовательно, действительны для любого режима автомодельного расширения.

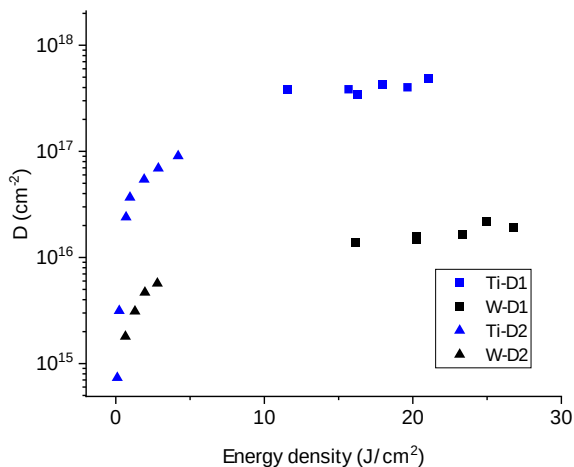


Рисунок 1. Выход дейтерия из соосаженных Ti-D и W-D пленок с разным содержанием дейтерия в зависимости от плотности энергии лазерного излучения

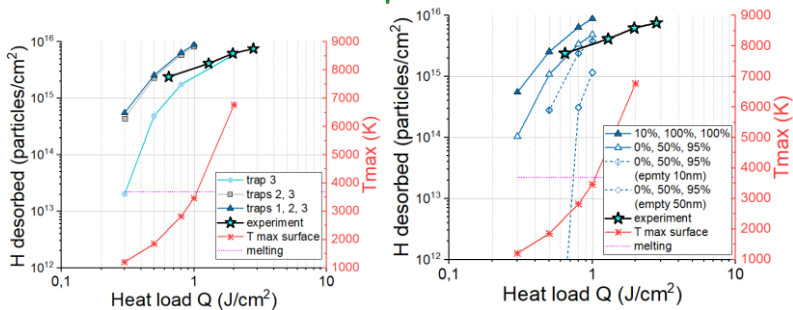


Рисунок 2. Общий выход D при различных нагрузках в сравнении с экспериментальными данными. а) - разное сочетание «включенных» ловушек; б) - 3 ловушки, разное заполнение

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ДЕЙТЕРИЯ В ВОЛЬФРАМЕ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНО- ИНДУЦИРОВАННОЙ ДЕСОРБЦИИ

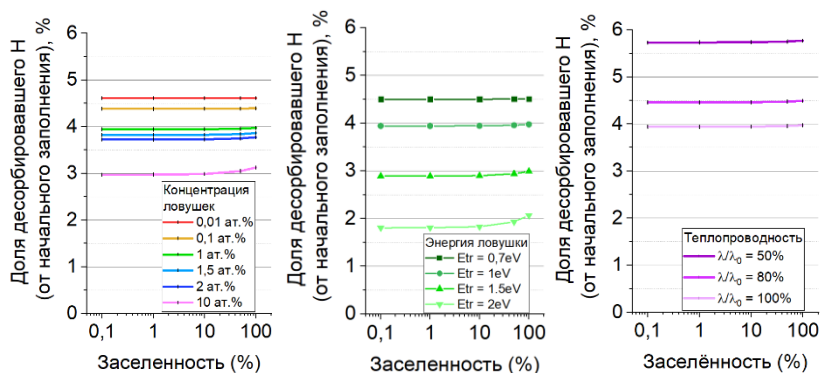
Термоядерная энергетика является многообещающим источником энергии, однако использование радиоактивного трития для реакции представляет опасность из-за его накопления. Соосаждение преобладает над другими вариантами накопления. Изотопы водорода из плазмы и возвращающиеся атомы распыленной стенки образуют на поверхности тонкую соосажденную пленку, значительно насыщенную водородом. Для контроля трития в стенке предлагаются дистанционные методы, в том числе лазерные методы [1]. Лазерный импульс нагревает локальную область стенки реактора, вызывая десорбцию водорода или испарение материала стенки, в зависимости от мощности импульса и передаваемой за импульс энергии. При лазерном импульсе на поверхности стенки образуется кратер, а ушедший из него материал попадает в пристеночную плазму, по оптическим спектрам которой можно определить элементный состав стенки, а также оценить количество ранее захваченного в неё водорода. Альтернативным вариантом сбора информации является использование масс-спектрометра. Лазерные методы обладают преимуществом работы *in situ*, большой вариацией калибровки параметров для достижения желаемого эффекта.

В данной работе определялось влияние неопределенности материала пленки на расчёт содержания водорода в пленке. Моделирование является продолжением предыдущего, проводившегося на основе полученных ранее на установке «Большой масс-монокроматор МИФИ» экспериментальных данных по десорбции дейтерия из вольфрамовых слоев при воздействии Nd:YAG лазера с длиной волны 1064 нм и длительностью импульса в 20 нс. Плотность энергии излучения в данной работе соответствовала 5 – 45 МВт/см², или 1 Дж/см² полной переданной энергии за импульс.

Моделирование проводилось с помощью кода TMAP7, позволяющего одновременно решать задачи диффузии и теплопроводности с различными граничными условиями. В простейшем предположении ожидается выход водорода пропорциональный изначальному содержанию, однако в реальности удержание водорода может обуславливаться так же и

характеристиками материала. При моделировании варьировались такие параметры материала, как концентрация и энергия ловушек, тепловые свойства материала.

При фиксированной концентрации ловушек или фиксированной энергии ловушки или фиксированной функции теплопроводности от температуры доля выхода N оставалась постоянной для различных начальных заселенностей (рисунок 1), что говорит о пропорциональности выхода водорода начальному заполнению. При большей атомарной плотности ловушек и при большей энергии ловушек доля выхода меньше благодаря увеличению влияния перезахвата, но при 100% начальной заполненности эффект перезахвата ослабевает, что приводит к небольшому увеличению доли выхода N .



а) различные концентрации ловушек, б) различные энергии ловушек, в) различная теплопроводность материала

Рисунок 1 – Доля выхода N в зависимости от заселенности ловушек при варьировании параметров материала

При варьировании концентрации ловушек от 0,01 ат.% до 10 ат.% ($E_b = 1$ эВ) доля выхода N составляет $3,8 \pm 0,8$ % от начального заполнения, то есть отклонение от среднего значения до 22%. При варьировании энергии ловушки от 0,7 эВ до 2 эВ ($c_t = 1$ ат.%) доля выхода N составляет $3,2 \pm 1,3$ % от начального заполнения, то есть отклонение от среднего значения до 41%. Было проведено моделирование с теплопроводностью, составляющей 50% и 80% от первоначальной. При фиксированном отношении λ/λ_0 доля выхода N постоянна, в диапазоне коэффициента от 0,5 до 1 доля выхода N составляет

$4,8 \pm 0,9$ % от начального заполнения, то есть отклонение от среднего значения до 19%.

Таким образом, в широком диапазоне параметров можно ожидать пропорциональность потока десорбции концентрации водорода с точностью лучше, чем 50%.

По результатам данных расчетов и лабораторных экспериментов планируется разработка диагностической системы для токамака Глобус-М2 в ФТИ им.А.Ф.Иоффе.

Список использованных источников

[1] E.E. Mukhin et al., Nucl. Fusion 56 (2016) 036017.

ОЦЕНКА СООТНОШЕНИЯ ПОТОКОВ ДЕСОРБЦИИ АТОМАРНОГО И МОЛЕКУЛЯРНОГО ВОДОРОДА С ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМА

Накопление радиоактивного трития (Т) в стенках будущих термоядерных установок, типа ИТЭР, ограничено требованиями безопасности в случае возникновения чрезвычайных ситуаций. Одной из перспективных методик по контролю содержания трития в стенках термоядерных установок является масс-спектрометрический анализ лазерно-индуцированной десорбции (ЛИД) захваченного газа [1]. Поток десорбции изотопов водорода (H/D/T) включает в себя как молекулы H_2 , так и атомы H (в случае смеси изотопов также возможна десорбция молекул, включающих разные изотопы, например, HD). В зависимости от состояния и температуры поверхности соотношение между потоками атомов и молекул может меняться. В случае ЛИД определение величин атомарной и молекулярных фракций в потоке с поверхности важно для корректной и наиболее точной интерпретации масс-спектрометрических измерений.

В данной работе на примере вольфрама (W), как одного из наиболее перспективных материалов обращенных к плазме элементов в термоядерных установках [2], был проведен анализ состава потока десорбции. Анализ строился на основе диаграммы потенциальной энергии атома водорода вблизи поверхности и предположения, что интегральный поток десорбции (J) состоит из атомов и молекул одного изотопа: $J = J_a + J_m$. На основе этого было получено аналитическое выражение, определяющее поток атомов с поверхности в зависимости от ее температуры, потенциального барьера хемосорбции молекул водорода (E_c) и интегрального потока десорбции.

Была проведена оценка соотношения потоков атомов и молекул с поверхности при различных параметрах десорбции. На рисунке 1 приводится зависимость J_a/J от температуры поверхности для различных значений E_c и J . Варьирование потока J проводилось в диапазоне: от 10^{16} до $10^{28} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$. Из графика следует, что при увеличении потока десорбции снижается вероятность выхода атомарного водорода. Также можно заметить, что при постоянной температуре увеличение потенциального барьера хемосорбции

(точечными линиями показаны зависимости при $E_c = 0.2$ эВ) ведет к росту атомарной фракции в потоке.

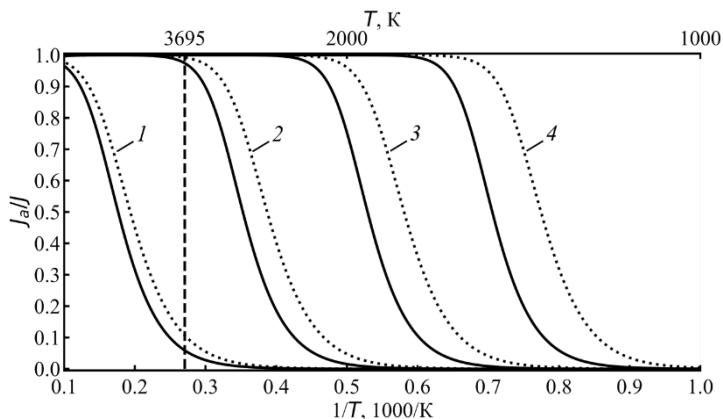


Рисунок 1 – Зависимость нормированного потока атомарного водорода от обратного значения температуры при различных значениях E_c и J . (1) – $J = 10^{28} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$, (2) – $10^{24} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$, (3) – $10^{20} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$, (4) – $10^{16} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$. Сплошные линии – $E_c = 0$, точечные линии – $E_c = 0.2$ эВ. Вертикальная пунктирная линия обозначает температуру плавления вольфрама

В условиях ЛИД интегральный поток десорбции может достигать значения $10^{28} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$ [3], что соответствует кривой (1) на приведенном графике. Согласно расчетам, можно ожидать, что при таких значениях потока десорбция с поверхности будет происходить преимущественно в виде молекул вплоть до температуры плавления вольфрама.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 0723-2020-0043).

Список использованных источников

- [1] Philipps V. et al. Development of laser-based techniques for in situ characterization of the first wall in ITER and future fusion devices // Nucl. Fusion. 2013. Vol. 53, № 9. P. 093002.
- [2] Pitts R.A. et al. Physics basis for the first ITER tungsten divertor // Nucl. Mater. Energy. 2019. Vol. 20. P. 100696.
- [3] Gasparyan Y. et al. Laser-aided diagnostic of hydrogen isotope retention on the walls of the Globus-M2 tokamak // Fusion Eng. Des. 2021. Vol. 172. P. 112882.

Л.А.ВАРШАВЧИК^{1*}, Н.А.БАБИНОВ¹, З.Г.ЛЮЛЛИН¹,
Е.А.СТАРОВОЙТОВ¹, С.И.КОГАКОВ¹, Е.Е.МУХИН¹
¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 119071, Санкт-Петербург
^{*}lidia.varsh@mail.ioffe.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПЫЛЕНИЯ НА ВНУТРИВАКУУМНУЮ ОПТИКУ ДИАГНОСТИКИ ДИВЕРТОРНОГО ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ИТЭР

Внутривакуумные оптические компоненты диагностических систем ИТЭР подвергаются загрязнению продуктами эрозии первой стенки. Для обеспечения долговременной работоспособности оптических диагностик ИТЭР, в частности диверторного томсоновского рассеяния (ДТР) предполагается периодическая чистка ВЧ-разрядом поверхности первого собирающего зеркала. Для разработки оптимальной конструкции оптических компонентов и систем пассивной защиты, а также для уточнения технических требований к системе чистки и оценки степени ее воздействия на оптические компоненты, необходима информация об ожидаемых потоках продуктов эрозии на оптические поверхности.

Для оценки скорости загрязнения оптических компонентов ДТР продуктами эрозии первой стенки было проведено моделирование транспорта вещества в диагностическом канале ДТР методом Монте-Карло в программном коде KITE с учетом рассеяния частиц на газе, процессов распыления стенок канала и отражения частиц от них. В качестве входных данных использовались значения потоков атомов и ионов из основного объема токамака на входе в диагностический канал ДТР. Были определены скорость и неоднородность запыления первого зеркала ДТР и окружающих конструкций (в том числе лазерной оптики) атомами бериллия в зависимости от давления окружающего газа дейтерия (0.1 Па, 1 Па и 7.4 Па), которые позволят сделать вывод о необходимой периодичности и параметров ВЧ-чистки и, следовательно, технических требованиях к системе.

Моделирование напыления на первый оптический компонент ДТР. Для моделирования транспорта продуктов эрозии первой стенки в диагностическом канале ДТР в качестве входных данных были использованы рассчитанные кодом SOLPS-ITER значения потоков ионов Be^+ , Be^{+2} , Be^{+3} , Be^{+4} и D^+ и атомов Be, D и D_2 из основного объема токамака на вход в диагностический канал, в зазор между диверторными кассетами. Входные потоки бериллия и дейтерия были заданы на 36 ячейках двумерной сетки

SOLPS-ITER, расположенных перед диверторными кассетами от нижней до верхней границы входа в канал ДТР. Для ионов бериллия и дейтерия были заданы средние скорости потоков и ускоряющий пристеночный потенциал; для атомов бериллия и дейтерия использовались функции распределения по скоростям. Для последующего моделирования КИТе были выбраны элементы с большей плотностью потока, которые являются основным источником частиц: ионы Be^{+2} , Be^{+4} и D^{+} , а также атомы Be и D_2 .

С помощью КИТе проводилось моделирование процессов распространения потоков частиц между диверторными кассетами, нейтрализации ионов при отражении от стенок канала, возникновения новых атомов бериллия в процессе распыления стенок канала энергичными частицами, и дальнейший транспорт нейтральных атомов бериллия до первого зеркала собирающей оптики диагностики ДТР. Учитывались столкновения частиц с тепловыми молекулами дейтерия, определялась зависимость скорости загрязнения первого зеркала от давления дейтерия. Моделирование взаимодействия частиц со стенками (отражение и распыление) проводилось на основе базы данных, полученной из проведенных расчетов в программе TRIM, использующей модель бинарных столкновений в твердом теле. Для набора достаточной статистики моделирование КИТе проводилось в три этапа, с промежуточным сохранением распределений и размножением моделируемых частиц (с уменьшением их веса) при смене этапов.

Результаты моделирования. В результате проведенного моделирования можно сделать следующие выводы. При основном рабочем давлении в диверторе ИТЭР 7.4 Па загрязнение оптических поверхностей (собирающей и лазерной оптики) диагностики ДТР не происходит: атомы бериллия теряют энергию в процессе рассеяния на газе и осаждаются на стенках канала, не достигая оптических поверхностей, расположенных на достаточном удалении от плазмы. При давлении 1 Па, которое расположено на нижней границе диапазона рабочих давлений дивертора ИТЭР, загрязнение оптических компонентов оказалось на много порядков выше, но по-прежнему слишком низким для существенного влияния на работоспособность оптической диагностики.

Основную опасность для оптических компонентов представляет загрязнение при экстремально низком давлении ~ 0.1 Па, которое может реализоваться, например, в режиме кондиционирования стенок ИТЭР. Основной вклад в загрязнение компонентов вносят атомы бериллия, распыленные со стенок канала и технических конструкций потоком ионов D^{+} из основного объема. В таком режиме напыление непрозрачного слоя

бериллия происходит за время порядка нескольких минут. Загрязнение области расположения лазерных оптических компонентов происходит с сопоставимой скоростью.

Результаты проведенного моделирования говорят о том, что загрязнения оптических элементов диагностики ДТР (расположенной в диверторной области), следует ожидать прежде всего не во время основной работы ИТЭР, а при различного рода аварийных ситуациях, включая, например, незакрытую диагностическую заслонку во время процедуры кондиционирования первой стенки. Таким образом, разрабатываемая система чистки внутривакуумных оптических компонентов должна быть ориентирована прежде всего на устранение последствий аварийных ситуаций, а не на частую регулярную работу. Ожидается, что для диагностических систем, расположенных в экваториальных и верхних портах ситуация может быть иной из-за низкого базового давления во время основной работы ИТЭР (не более 0.1 Па), этот вопрос требует дальнейшего исследования.

А.М. ДМИТРИЕВ^{1,2,4*}, А.Г. РАЗДОБАРИН¹, Л.А. СНИГИРЕВ¹, Д.И.ЕЛЕЦ^{1,4},
И.М. БУКРЕЕВ¹, А.П. ЧЕРНАКОВ^{1,2}, Е.Е. МУХИН¹, С.Ю. ТОЛСТЯКОВ¹,
И.Б. КУПРИЯНОВ³, В.Л. БУХОВЕЦ⁵, А.Е. ГОРОДЕЦКИЙ⁵, А.В.

МАРКИН⁵, Р.Х. ЗАЛАВУТДИНОВ⁵

¹ФГБУН ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

²АО «Спектрал-Тех», Санкт-Петербург

³АО «ВНИИНМ им. А.А. Бочвара», Москва

⁴Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

⁵ФГБУН ИФХЭ им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва

*artem.dmitriev@mail.ioffe.com

МАГНЕТРОННОЕ ОСАЖДЕНИЕ БЕРИЛЛИЯ И ЦИКЛИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ОКОН В ПЛАЗМЕ ВЧ РАЗРЯДА

Обращенные к плазме первые зеркала и защитные окна оптических диагностик токамака-реактора ITER и стойкость их параметров при длительной эксплуатации находятся в центре внимания обширной программы исследований [1], включающей лабораторные исследования и испытания в работающих токамаках. Осаждение материалов, состоящих из продуктов эрозии материалов первой стенки (в основном – бериллий и вольфрам) и окружающих элементов конструкции может оказать существенное влияние на параметры оптических компонентов, расположенных вблизи первой стенки. Ввиду ограниченного доступа к обращенным к плазме оптическим элементам необходима in-situ система восстановления их оптических характеристик. Система плазменной очистки, основанная на емкостном высокочастотном разряде, в котором очищаемое зеркало или окно играет роль нагруженного электрода, показала свою эффективность для удаления пленок углеводородов, металлов и их оксидов [2-6] и предлагается для использования в ITER [1]. Принцип работы системы плазменной очистки основан на физическом и/или химическом распылении загрязняющих осадений потоком ионов, формируемых в приэлектродном слое ВЧ разряда. Продолжительная ионная бомбардировка, однако, может привести к повреждению поверхности очищаемого элемента. В связи с этим существует необходимость реализации системы контроля процесса очистки с обратной связью, предоставляющей информацию о состоянии разряда и параметрах оптической поверхности.

По причине высокой токсичности бериллия большинство исследований процесса плазменной очистки зеркал проводилось с использованием модельных осадений: Al, Al₂O₃, Au и т.д. Изучение взаимодействия бериллийсодержащих пленок с поверхностью оптических элементов и

процесса их распыления имеет, тем не менее, определяющее значение для верификации эффективности системы плазменной очистки. В докладе представлены результаты циклических экспериментов по осаждению бериллийсодержащих пленок и их распылению с поверхности перспективных материалов защитных окон и первого зеркала диагностики томсоновского рассеяния в диверторе токамака ITER. В качестве таких материалов использовались окна из плавленого кварца, монокристаллического сапфира, боросиликатного стекла, а также зеркала из монокристаллического молибдена. Формирование бериллийсодержащих пленок осуществлялось при помощи ВЧ магнетрона, работающего на частоте 13,56 МГц. Бериллиевая мишень была изготовлена из российской марки бериллия ТГП-56ПС, одобренной для применению в ИТЭР. Полученные пленки бериллия были охарактеризованы при помощи сканирующей электронной микроскопии (SEM), энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX), рентгеновская фотоэлектронной спектроскопии (XPS) и др. In-situ плазменная очистка осуществлялась при помощи ВЧ емкостного разряда с частотой 81 МГц в гелии при давлении 2 Па. Процесс очистки контролировался путем мониторинга интенсивности отражения лазерного излучения на длине волны 532 нм от поверхности кварцевого образца. Оптические характеристики образцов контролировались в промежутках между циклами осаждения/удаления и по завершению экспериментальной кампании. Всего было совершено 15 циклов осаждения и очистки. По итогам экспериментальной кампании обсуждается эффективность плазменной очистки и стойкость материалов зеркал и окон.

Список использованных источников

- [1] P. Shigin et al., Fus. Eng. Des. 146 (2021), 112162
- [2] A.E. Gorodetskii et al., Prot. Met. Phys. Chem. Surf. 47, 540 (2011)
- [3] E.E. Mukhin et al., J. Nucl. Fusion 52 (2012) 013017
- [4] A.G. Razdobarin et al., J. Nucl. Fusion 55 (2015) 093022
- [5] L. Moser et al., J. Nucl. Fusion 55 (2015) 063020
- [6] A.M. Dmitriev et al., Fusion Eng. Des. 146 Part A (2019) 1390-1393

З.Г. ЛЮЛЛИН^{1,2*}, Н.А. БАБИНОВ^{1,2}, Л.А. ВАРШАВЧИК^{1,2}, Е. Е. МУХИН¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

²ЗАО Спектрал-Тех, Санкт-Петербург

*zahar.lyullin@gmail.com

AB INITIO ПОТЕНЦИАЛЫ И СЕЧЕНИЯ УПРУГОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТА ЧАСТИЦ В ГАЗЕ

Одной из задач, решаемых при разработке оптических диагностик для термоядерных установок следующего поколения, в том числе ИТЭР, является проблема загрязнения внутривакуумных оптических элементов продуктами эрозии. Для разработки эффективной конструкции необходим расчет потоков продуктов эрозии первой стенки на оптические поверхности, а также моделирование процесса чистки оптических элементов путем распыления (с учетом процессов перепыления) в газовом разряде. Для решения обеих задач необходимо моделирование транспорта частиц в разреженном газе и слабоионизированной плазме при условиях, когда основным процессом, влияющим на движение частиц, является упругое рассеяние на газе.

Для повышения точности моделирования транспорта частиц в газе важно иметь точные данные о сечениях упругого рассеяния частиц. В диапазоне средних энергий частиц (0.01-100 эВ) для описания столкновения частиц хорошо работает классическое приближение. При этом данные о потенциале взаимодействия частиц позволяют получить всю необходимую при моделировании информацию о рассеянии, а точность рассчитанных сечений определяется точностью используемого потенциала взаимодействия.

На данный момент разработано большое количество различных модельных бинарных потенциалов межатомного и межмолекулярного взаимодействия, как чисто отталкивающих, так и имеющих область притяжения. Из последних достаточно широко известен и часто используется потенциал Леннарда-Джонса, сочетающий простоту и достаточно высокую точность.

С развитием компьютерного моделирования стало возможным рассчитать потенциалы взаимодействия частиц методом *ab initio* т.е. из первых основополагающих принципов без привлечения дополнительных эмпирических предположений или специальных моделей. В ходе работы был выполнен расчет потенциалов взаимодействия с помощью программы NWChem. NWChem - это программный пакет *ab initio* для вычислительной химии, который включает функции квантовой химии и молекулярной

динамики. Он нацелен на масштабируемость как с точки зрения способности эффективно решать сложные задачи, так и с точки зрения возможности расширения решаемых задач при использовании дополнительных параллельных вычислительных ресурсов. NWChem является программой с открытым исходным кодом и находится в свободном доступе.

При расчете потенциала взаимодействия частиц были использованы квантово-механические методы, основанные на методе Хартри – Фока - приближенном методе решения уравнения Шрёдингера путём сведения многочастичной задачи к одночастичной в предположении, что каждая частица движется в усреднённом самосогласованном поле, создаваемом всеми остальными частицами системы. Недостатком метода в первоначальном виде является низкая точность определения энергии системы, связанная с отсутствием учета корреляционного взаимодействия электронов. В связи с этим в настоящее время метод как правило используется в сочетании с различными дополнительными методами, позволяющими определить энергию корреляции электронов (методы пост-Хартри-Фока).

В настоящей работе для нахождения энергии корреляции была использована модель связанных кластеров. Используемый метод позволяет выполнять вычисления с полной итеративной обработкой одиночных и двойных корреляций и неитеративным включением эффектов тройных корреляций методом теории возмущений.

Помимо метода моделирования, на точность расчетов влияет выбранный базисный набор функций для представления рассчитываемой волновой функции в виде линейной комбинации базисных функций. Это позволяет преобразовать дифференциальные уравнения в частных производных в алгебраические уравнения, подходящие для эффективной реализации моделирования на компьютере.

Для расчета потенциалов взаимодействия частиц выбраны наборы серии cc-pVNZ, разработанные Даннингом и соавторами. В настоящее время такие «корреляционно-согласованные поляризованные» базисные наборы широко используются и являются общепринятым стандартом для коррелированных или *пост-хартри-фововских* вычислений. Кроме того, поскольку в нашем случае моделируется взаимодействие пар атомов, в том числе расположенных далеко друг от друга, для точных расчетов необходимо добавить диффузные функции для описания дальнедействующих взаимодействий, таких как силы Ван-дер-Ваальса.

В ходе работ была проведена серия расчетов, в результате которых были получены потенциалы взаимодействия различных пар атомов, интересных с

точки зрения моделирования их транспорта в диагностических патрубках токамаков и других плазменных установках: Be-He, Be-Ne, Al-He, Al-Ne.

Была проведена оценка точности полученных потенциалов взаимодействий и их сравнение с потенциалом Леннарда-Джонса. Используя полученные потенциалы в качестве входных данных, были рассчитаны энергетические зависимости дифференциальных и транспортных сечений упругого рассеяния атомов бериллия и алюминия в инертных газах. Рассчитанные данные сравниваются с сечениями, полученными при использовании потенциала Леннарда-Джонса.

Полученные результаты позволят улучшить точность моделирования транспорта частиц в разреженном инертном газе и слабоионизированной плазме.

P. BITTNER^{1*}, H.R. KOSLOWSKI¹, A. LITNOVSKY^{1,2}, Ch. LINSMEIER¹

¹*Forschungszentrum Jülich GmbH - IEK-4, Jülich, Germany*

²*National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia*

**p.bittner@fz-juelich.de*

MODELING OF SURFACE SEGREGATION OF Cr IN THE WCrY SMART ALLOY

Self-passivating Metal Alloys with Reduced Thermo-oxidation (SMART) are promising candidates for the first wall of the DEMOnstration power plant (DEMO). These materials aim at having an increased oxidation resistance during accidental conditions and acceptable plasma performance during regular operation of the power plant.

In this work, a tungsten-chromium-yttrium SMART alloy (WCrY) with a composition of 68 at% of W, 31 at% of Cr and 1 at% of Y is studied. Previous research already showed superior oxidation behavior in comparison to that of pure tungsten [1,2], and first experimental results were obtained for the material's behavior under plasma loading [1]. However, a detailed physical understanding of the interplay between sputtering, segregation and diffusion of the alloying elements inside the material during plasma exposure is still missing.

To obtain a better understanding of these processes and assess their effect on the surface concentrations, a phenomenological transport model based on the work of Ho [3] is proposed. Ho's model, which includes diffusion and sputter erosion only, is complemented by a segregation flux term to allow for diffusion against a concentration gradient of the alloying elements toward the surface.

Based on the experience that surface segregation affects the near surface region only, a three parameter segregation flux term is proposed. It includes a segregation constant K , a characteristic length L and the equilibrium surface concentration c_{eq} . The model is applied to annealing experiments at 800 K and 1000 K conducted by Koslowski et al. [4,5]. Good agreement between simulation and measured data is obtained using $L = 2 \text{ nm}$, $K_{800K} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ nm/s}$, $K_{1000K} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ nm/s}$, and diffusion coefficients of Cr in the WCrY matrix of $D_{800K} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ nm}^2/\text{s}$ and $D_{1000K} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ nm}^2/\text{s}$.

List of references

[1] J. Schmitz, Development of tungsten alloy plasma facing-materials for the fusion power plant, Ruhr-Universität Bochum, 2020, <https://doi.org/10.13154/294-7468>

- [2] A. Litnovsky et al., *Physica Scripta* (2017) 014012, <https://doi.org/10.1088/1402-4896/aa81f5>
- [3] P.S. Ho, *Surface Science* 72, 253 (1978), [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(78\)90294-7](https://doi.org/10.1016/0039-6028(78)90294-7)
- [4] H.R. Koslowski et al., *Nuclear Materials and Energy* 22 (2020) 100736, <https://doi.org/10.1016/j.nme.2020.100736>
- [5] H.R. Koslowski et al., *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B* 479 (2020) 42-46, <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2020.06.005>

В.П. БУДАЕВ^{1,2*}, Ю.В.МАРТЫНЕНКО¹, М.Ю. НАГЕЛЬ¹

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва

²Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва
budaev@mail.ru

ПЛАЗМЕННЫЙ УСКОРИТЕЛЬ С КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ НА БАЗЕ ПЛАЗМЕННОЙ УСТАНОВКИ ПЛМ

Капиллярно-пористые электроды на основе лития и олова являются перспективными для использования в электродинамическом плазменном ускорителе [1-4]. Такие электроды имеют преимущество перед твердотельными, их жидкометаллическая поверхность восстанавливается после действия повышенной плазменной нагрузки, не возникают эффекты формирования неоднородной поверхности, препятствующей протеканию тока с электрода в плазму. Материал, испаренный с жидкометаллической поверхности, при поступлении в плазму может выступать плазмообразующим веществом, влияя на динамику потока плазмы, такой эффект в достаточной мере не исследован в установках с магнитным удержанием плазмы, где планируется использовать компоненты на основе капиллярно-пористых систем (КПС). Эффекты взаимодействия плазмы с жидкометаллическими электродами необходимо исследовать в стационарном плазменном разряде для целей использования в системах космического плазменного двигателя, в установках для испытаний материалов термоядерного реактора мощными плазменными потоками, технологических плазменных установках.

Перспективной установкой для таких исследований является установка ПЛМ [5] и ее модернизированный вариант ПЛМ-М в НИУ «МЭИ». Установка ПЛМ представляет собой линейную магнитную ловушку с мультикасповой схемой магнитного удержания плазмы, состоящую из катушек с током, создающих продольное магнитное поле (поле на оси - 0,02 Тл), и восьмиполусной системы из постоянных неодимовых магнитов, создающих мультикасповую конфигурацию (аналог известной схемы с продольными токами – так называемыми “палками Иоффе”), поле в каспах - 0,2 Тл. Особенностью этой установки является стационарный режим многочасового удержания плазмы (более 8 часов) с достигнутыми параметрами плазмы - температура электронов более 3-5 эВ с фракцией горячих электронов до 50 эВ, плотность плазмы до 10^{19} см⁻³ и более, что представляет преимущество для отработки технологий стационарного космического плазменного двигателя и испытания материалов стенки термоядерного реактора.

В установке ПЛМ на первом этапе планируется создать и испытать ускоритель типа рельсотрон, у которого электроды (рельсы) представляют собой капиллярно пористые системы [3]. В эксперименте зажигается стационарный разряд между катодом и анодом, затем на расположенные вдоль разряда капиллярно-пористые электроды подаётся напряжение, генерируется ток между электродами, который формирует ускоренный поток плотной плазмы вдоль разряда. Ускоритель будет работать в импульсном режиме, что позволит откачивать разрядную камеру между импульсами и работать с достаточно большими плотностями плазмы. Рабочим газом будет гелий. Сила, ускоряющая плазму в рельсотроне, равна

$$F = L \cdot J^2 / 2, \quad (1)$$

где L – индуктивность единицы длины рельсотрона, J – ток между электродами (рельсами).

При интенсивной тепловой нагрузке на электроды жидкий металл, наполняющий пористый мат КПС, испаряется с поверхности электрода, наполнение пористого мата эффективно восстанавливается за счёт капиллярных сил [1]. Тепловая нагрузка на электроды, в основном, определяется потенциалом и температурой плазмы. Плотность мощности, выделяемая на катоде, равна

$$Q_k = (e n \alpha_1 v_i / 4) \cdot (U_k + (I_1 - \phi) + 1.5T) + ((v_i - 4j / e n \alpha_1) n \alpha_1 / 4) \cdot 1.5T, \quad (2)$$

где $v_i = (2eT/M)^{1/2}$, $v_e = (2eT/m)^{1/2}$, I – потенциал ионизации, ϕ – работа выхода, T – температура плазмы, $U_k = (T/e) \cdot \ln(v_e / (v_i - 4j / e n \alpha_1))$ – потенциал катода, j – плотность тока.

Плотность мощности, выделяемая на аноде, равна

$$Q_a = j \cdot (1.5T + \phi), \quad (3)$$

Температура плазмы T определяется омическим нагревом при протекании тока:

$$(3\alpha_1 + (3T + I_1) \cdot \partial \alpha_1 / \partial T) n \cdot r^2 \cdot h \cdot dT/dt + W_R + (Q_k + Q_a) \cdot r^2 = j^2 h / \sigma \cdot r^2, \quad (4)$$

где $\alpha_1(T)$ – степень ионизации испаренного металла, W_R – мощность излучения плазмы, Q_k и Q_a – плотности мощности, выделяемая на электродах,

σ – проводимость плазмы, h – расстояние между электродами, r – поперечный размер канала тока в плазме.

Испарение металла с поверхности приводит к потере его содержания в емкости - наполнителе КПС, что необходимо учитывать в балансе массы КПС. Потеря массы металла из наполнителя капиллярно-пористых электродов при испарении в плазму с единицы поверхности определяется как

$$dm/dt = \rho_m s \cdot \exp(-H/kT_s), \quad (5)$$

где $s = (3/4\pi)^{1/3} \cdot c_s$, c_s – скорость звука, H – энергия испарения, T_s – температура поверхности электрода.

В эксперименте на ПЛМ будут выполняться измерения температуры плазмы, плотности плазмы, размер и характеристики ускоряемого плазменного потока в импульсе, характеристики капиллярно-пористых элементов - расход металла и состояние электродов.

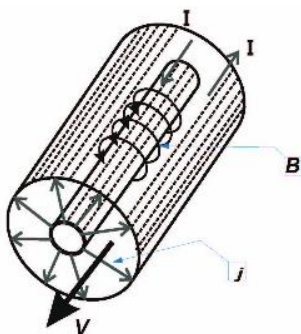


Рисунок 1 - Схема коаксиального электродинамического плазменного ускорителя

На следующем этапе будет создан и исследован коаксиальный электродинамический плазменный ускоритель (см. рис.1) с капиллярно-пористыми поверхностями электродов, обращёнными к плазме [4]. Плазма в такой схеме ускоряется силой Лоренца, действующей на ток I в плазме между электродами со стороны магнитного поля B , создаваемого током в электродах. Такой коаксиальный ускоритель будет также работать в импульсном режиме для обеспечения откачки вакуумной камеры между импульсами при больших плотностях ускоряемых плазменных ступков.

Рабочим газом в разряде при испытаниях коаксиального ускорителя будет гелий. Тепловая нагрузка и характеристики плазмы определяется омическим нагревом плазмы подобно рельсотрону (см. выше).

План работ на создаваемом электродинамическом плазменном ускорителе с капиллярно-пористыми электродами на основе лития и олова на базе установки ПЛМ включает исследования и испытания:

- перспективных капиллярно-пористых электродов плазменных электродинамических ускорителей для космических двигателей,
- макетов диверторных пластин и первой стенки термоядерных реакторных установок, в том числе, с использованием жидких металлов,
- обработки материалов и конструкций в интересах инновационного материаловедения, включая задачи снижения аэродинамического сопротивления летательных аппаратов при высоких скоростях полета,
- плазмодинамики для проверки разрабатываемых инновационных схем в интересах управляемого термоядерного синтеза.

Список использованных источников

- [1] Мартыненко Ю.В., Ильгисонис В.И. Капиллярно-пористые электроды для магнитогидродинамических плазменных преобразователей энергии. Патент № 26378816 БИ № 34 от 07.12.2017.
- [2] В. И. Ильгисонис, Ю. В. Мартыненко. МГД-двигатель с капиллярно-пористыми электродами. Физика плазмы, 2019, Т. 45, № 1, с. 63-692.
- [3] Ю. В. Мартыненко, М. Ю. Нагель. Плазменный рельсотрон с капиллярно-пористыми электродами, Физика плазмы, 2021, том 47, № 4, с. 334–340.
- [4] Ю.В. Мартыненко, М.Ю. Нагель. Электродинамический плазменный двигатель с капиллярно-пористыми электродами. ЖТФ, 2021, том 91, вып. 9, 1348 - 1353.
- [5] Будаев В.П. и др. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2017, 40, 3, 23.

П.В. МИНАШИН^{1*}, А.Б. КУКУШКИН^{1,2}
¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

*Minashin_PV[at]nrcki.ru

СПЕКТРАЛЬНАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ, ВЫХОДЯЩЕГО НА ПЕРВУЮ СТЕНКУ В ИТЭР

В условиях токамака-реактора ИТЭР (высокие по сравнению с действующими установками значения электронной температуры в центре плазменного шнура $T_e(0) \approx 30$ кэВ и напряженности магнитного поля, $B_0 = 5.3$ Т) существенно возрастает роль электронного циклотронного (ЭЦ) излучения плазмы как компоненты электронного энергобаланса плазмы [1], [2], так и как источника тепловых и электромагнитных воздействий на внутрикамерные компоненты и диагностики [3], [4]. В наиболее энергоэффективных разрядах в ИТЭР интегральная (по частотам и углам падения на поверхность) мощность ЭЦ излучения плазмы, падающего на единичную площадку вакуумной стенки, F , превосходит мощность рассеянного излучения от инжектированных в плазму ЭМ волн для ЭЦ резонансного нагрева и поддержания тока и диагностики коллективного томсоновского рассеяния [3]. Необходимо дополнительно исследовать спектральную зависимость собственного ЭЦ излучения плазмы, так как тепловые и радиационные нагрузки на первую стенку являются возрастающей функцией частоты излучения. Особенно важно учитывать влияние собственного ЭЦ излучения плазмы на системы диагностик, использующих миллиметровые волны: рефлектометрию со стороны сильного и слабого магнитного поля, рефлектометрию положения плазмы, а так же диагностику коллективного томсоновского рассеяния, так как линии передач этих диагностик в принципе позволяют проводить дополнительные измерения спектра ЭЦ излучения [5] на высоких частотах.

В работе приведены расчеты кодом CYNEQ [6], [7] спектральной интенсивности ЭЦ излучения, выходящего из плазмы на стенку вакуумной камеры, для различных сценариев работы ИТЭР необходимые для будущей оценки влияния этого излучения на внутрикамерные компоненты и диагностики.

Алгоритм расчета интенсивности ЭЦ излучения плазмы. В условиях токамака реактора (средняя температура электронов $\langle T_e \rangle_v \geq 10$ кэВ,

некруглое сечение тора, средние значения аспектного отношения $A \sim 3$, многократное отражение излучения от стенок вакуумной камеры) перенос собственного ЭЦ излучения плазмы оказывается нелокальным, т.е. большая часть энергии ЭЦ излучения переносится волнами (средние и большие гармоники, $n \geq 3$, фундаментальной ЭЦ частоты), для которых плазма является оптически тонкой. Для этих условий задача переноса энергии для ЭЦ гармоник $n \geq 3$ решается полуаналитически в коде CYNEQ [6], [7] с помощью использования предположения об угловой изотропии интенсивности ЭЦ излучения, подсказанного расчетами монте-карловским кодом SNECTR [8]. В оптически прозрачной области интенсивность выходящего излучения, I , является функцией только частоты и типа волны и зависит от усредненных по углам коэффициентов поглощения и испускания ЭЦ волн. Код CYNEQ был проверен в бенчмаркингах с другими кодами для расчета переноса ЭЦ излучения плазмы [9], [10].

Для излучения на ЭЦ гармониках $n = 1$ и $n = 2$ плазма является оптически плотной и локальная интенсивность близка к чернотельной с температурой, равной локальной температуре электронов. Поэтому оценка спектральной интенсивности ЭЦ излучения, дифференциальной также и по телесному углу, проводилась по формуле $I(\nu) = \nu^2 T_{\text{rad}}(\nu)/c^2$, $T_{\text{rad}}(\nu) = T_e(r_{\text{res}})$, где r_{res} – координата ЭЦ резонанса волна-частица для волны с частотой ν .

Результаты расчетов интенсивности ЭЦ излучения в ИТЭР. Расчеты проведены для пяти сценариев работы ИТЭР, полученных моделированием с помощью кода CORSICA [11]. Основные параметры сценариев показаны в Таблице. 1. Геометрические параметры ИТЭР: большой радиус тора $R_0 = 6.2$ м, малый радиус тора $a = 2$ м, удлинение $k_{\text{elong}} = 2.1$, треугольность $\delta = 0.5$, магнитное поле на геометрической оси $B_0 = 5.3$ Т. Средний по поверхности коэффициент отражения ЭЦ излучения от стенки вакуумной камеры, R_w , в ИТЭР является свободным параметром в определенном диапазоне значений.

Таблица 1. Основные параметры сценариев ИТЭР.

N	1	2	3	4	5
Сценарии	HMODE 13	HYBRID EC11	HYBRID LH03	STEADY EC1F	STEADY EC42
$T_e(0)$, кэВ	22.1	29.2	31.4	37.4	35.9
$\langle T_e \rangle_\nu$, кэВ	10.6	13.2	14.3	15.3	14.2
$n_e(0)$, 10^{19} м^{-3}	9.7	8.5	8.5	6.0	6.5
$\langle n_e \rangle_\nu$, 10^{19} м^{-3}	8.7	7.4	7.4	5.2	5.7
I_p , МА	15.0	12.5	12.5	9.0	8.5

На рис. 1 показаны спектры ЭЦ излучения плазмы для гармоник ЭЦ частоты $n = 1, 2$, а на рис. 2 – спектры ЭЦ излучения для $n \geq 3$ в 4-м сценарии из Таблицы 1, для которого интегральная мощность падающего на стенку ЭЦ излучения оказывается наибольшей. На рис. 3 показана зависимость плотности мощности падающего на стенку ЭЦ излучения плазмы, F , для сценариев из Таблицы 1 от коэффициента отражения R_w .

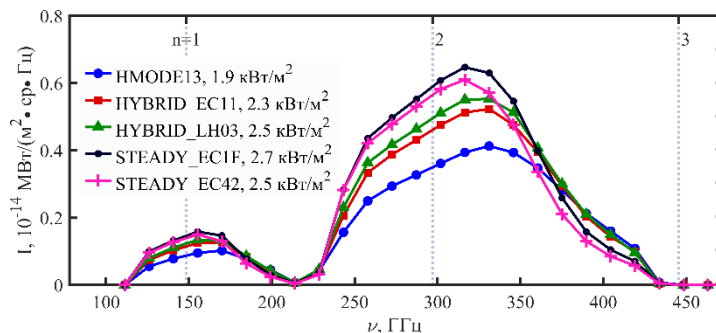


Рис. 1. Спектральная интенсивность, выходящего из плазмы ЭЦ излучения, для низких гармоник ЭЦ $n = 1, 2$, и интегральная по спектру плотность потока энергии ЭЦ излучения (приведено в легенде) для сценариев работы ИТЭР, указанных в Таблице 1.

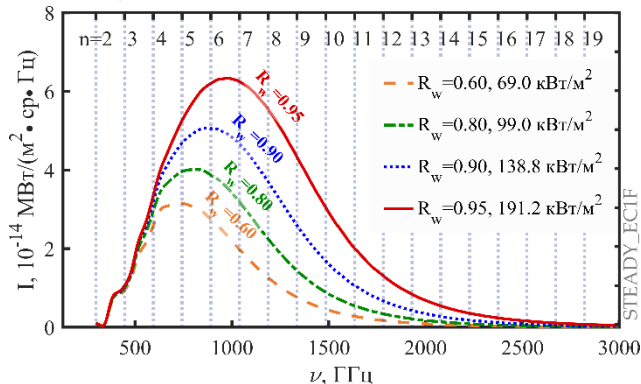


Рис. 2. Спектральные интенсивности ЭЦ излучения для ЭЦ гармоник $n \geq 3$, рассчитанные кодом CYNEQ, для различных коэффициентов отражения ЭЦ волны от стенки камеры, R_w , для 4-го сценария в Таблице 1. В легенде указана интегральная по спектру мощность ЭЦ излучения на первую стенку, деленная на площадь стенки вакуумной камеры $S = 876 \text{ м}^2$.

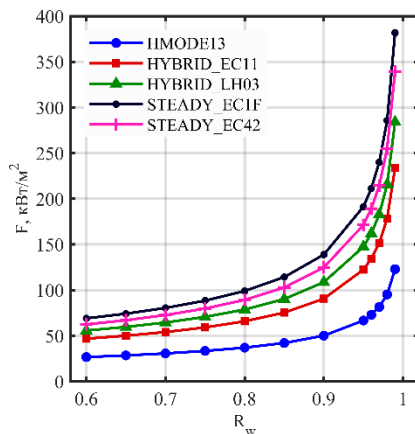


Рис. 3. Интегральная по спектру плотность потока энергии ЭЦ излучения плазмы на первую стенку, F , для сценариев разряда ИТЭР из Таблицы 1 для различных коэффициентов отражения ЭЦ излучения от стенки.

Выводы. Расчеты кодом CYNEQ спектральной интенсивности собственного электронного циклотронного (ЭЦ) излучения плазмы, выходящего из нее, показывают возможность сильного воздействия этого излучения на внутрикамерные компоненты и диагностики в различных сценариях работы ИТЭР.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Д.А. Шелухину и В.А. Вершкову за постановку задачи и полезные обсуждения.

Список использованных источников

- [1] Albajar F., Bornatici M. *et al.* // Nuclear Fusion, 2005, v. 45, № 7, pp. 642-648.
- [2] Kukushkin A.B., Minashin P.V., Polevoi A.R. // Plasma Physics Reports, 2012, v. 38, № 3, pp. 211-220.
- [3] Oosterbeek J.W. *et al.* // Fusion Eng. Des., 2015, v. 96-97, pp. 553-556.
- [4] Moseev D. *et al.* // Fusion Eng. Des., 2021, v. 172, p. 112754.
- [5] Udintsev V.S. *et al.* // EPJ Web of Conferences, 2012, v. 32, p. 03013.
- [6] Kukushkin A.B. // Proc. 14th IAEA Conf. on Plasma Phys., 1992, v. 2, pp. 35-45.
- [7] Kukushkin A.B., Minashin P.V. // Proc. 36th EPS Conf. on Plasma Physics, 2009, ECA, v. 33E, P-4.136.
- [8] Tamor S. // Nuclear Technology - Fusion, 1983, v. 3, № 2, pp. 293-303.
- [9] Albajar F. *et al.* // Fusion Science and Technology, 2009, v. 55, № 1, pp. 76-83.
- [10] Kukushkin A.B., Minashin P.V. // Proc. 24th IAEA FEC, 2012, TH/P6-25.
- [11] Kim S.H. *et al.* // Nuclear Fusion, 2016, v. 56, № 12, p. 126002.

Д.И. КАВЫРШИН^{1,3*}, В.П. БУДАЕВ^{1,2}, С.Д. ФЕДОРОВИЧ¹, А.В. КАРПОВ^{1,2}, В.Ф. ЧИННОВ³, М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ¹, В. ЧАН КУАНГ¹, М.К. ГУБКИН¹, Е.В. МУРАВЬЕВА¹, А.С. МЯЗИН¹, Г.Б. ВАСИЛЬЕВ¹, К.А. РОГОЗИН¹, А.А. КОНЬКОВ¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва

³ФГБУН Объединенный институт высоких температур
Российской академии наук (ОИВТ РАН, Москва)

*dimakav@rambler.ru

ОПТИЧЕСКАЯ ЭМИССИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЛАСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА С ВОЛЬФРАМОВЫМ ОБРАЗЦОМ

Объектом исследования в данной работе выступает плазма гелия низкого давления с магнитным удержанием на экспериментальном стенде МЭИ – «плазменном линейном мультикаспе» (ПЛМ) [1]. Установка представляет собой магнитную ловушку с минимумом магнитного поля на оси, плазма в которой создаётся потоком электронов, движущихся от термокатода в левой части установки (см. рисунок 1) к аноду. В установке удастся создать стационарный поток гелиевой плазмы и поддерживать его в течение нескольких часов при постоянных параметрах разряда (давление в камере $10^{-3} \div 10^{-1}$ торр, ток разряда 4÷15 А, радиус струи 15÷17 мм, падение напряжения на разрядном промежутке 100÷200 В), обеспечивая тепловую нагрузку на поверхность вводимой в приосевую область мишени до 10 МВт/м².

Для создания локальных областей дополнительного перегрева поверхности вольфрамового образца с целью моделирования условий интенсивного дугообразования на обращённых к плазме элементах первой стенки токамака использовался стенд на основе периодического (частота следования импульсов ~ 1 Гц) Nd:YAG лазера с длительностью импульса ~10 нс и энергией, вкладываемой в импульс не менее 50 мДж.

Для диагностики параметров плазмы в области ее взаимодействия с испытуемым образцом в стенках канала установки были оборудованы смотровые окна из сапфира, обеспечивающими возможность спектральной диагностики в диапазоне длин волн 250-1100 нм. В данной работе представлены результаты одновременной регистрации оптических эмиссионных спектров излучения плазмы во всём указанном диапазоне длин волн со спектральным разрешением 0.2-1 нм с использованием четырёхканального оптоволоконного спектрометра AvaSpec. Режим

испытаний макета облицовки вольфрамового модуля представлен в Таблица .

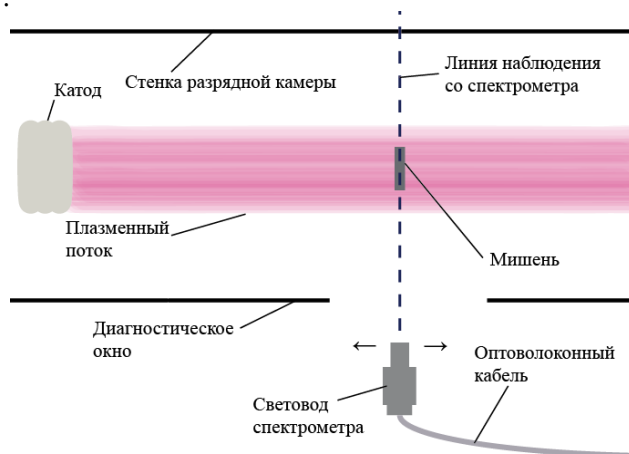


Рис.1. Схема разрядной камеры и спектральных измерений.

Таблица 1 – Режим плазменных испытаний макета вольфрамового модуля

Ток разряда I, A	Потенциал катода U, В	Потенциал образца φ, В	Температура образца t, °C	Ток из плазмы на образец , i, A	Давление гелия в разрядной камере p, Торр
12.39	-174	-98	1530	1.83	$1.3 \cdot 10^{-2}$

Лазерный луч фокусировался на поверхности образца в области максимальной или близкой к максимальной плазменной нагрузке. Форма пятна луча на поверхности - эллипс (малый диаметр 0.42 мм, большой диаметр 2.2 мм). Площадь пятна при фокусировке на поверхности – 0.725 мм². Лазерная нагрузка на поверхности образца могла достигать величины $69 \cdot 10^8$ Дж м⁻²с^{-1/2}, что превышает пороговую величину плавления вольфрама. Воздействие лазера практически не оказывает влияния на интенсивность

гелиевых линий, при этом заметно появление в спектре неразрешённых линий атомарного вольфрама W I (Ошибка! Источник ссылки не найден. 2). На Ошибка! Источник ссылки не найден. 3 представлен спектр излучения, зарегистрированный спектрометром, наблюдающим область взаимодействия испытуемого образца и плазменного потока в координатах “Относительная интенсивность – длина волны” и координатах Вина [2]. На спектре, помимо атомарных линий гелия и линии водорода H- α серии Бальмера, можно заметить рост континуума с длиной волны, связанный с излучением нагретой поверхности образца.

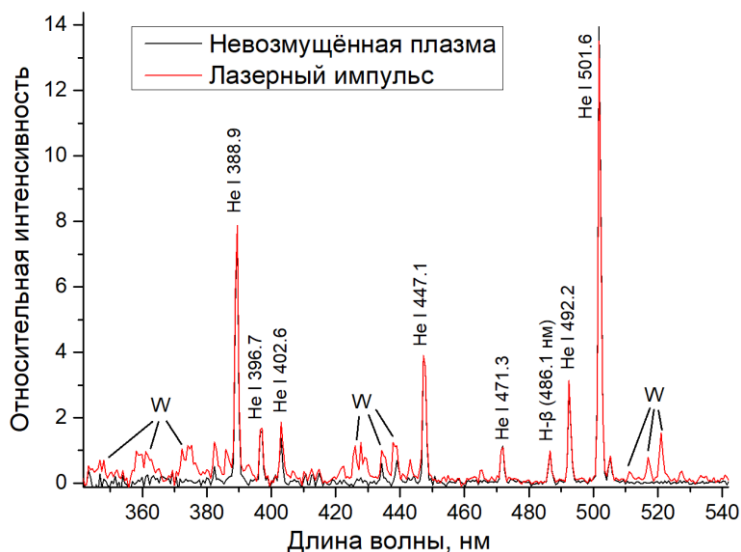


Рис. 2. Спектры невозмущённой плазмы и при лазерном облучении.

Определённая по углу наклона описывающей этот участок роста в координатах Вина прямой температура составляет $T = 1850$ К. После выхода на стационарный режим работы установки был достигнут тепловой баланс и эта температура оставалась неизменной, воздействие лазерных импульсов также приводило лишь к кратковременному появлению локальных областей перегрева поверхности образца. В спектрах также можно обнаружить крайне слабую линию иона гелия He II 468.6 нм, что позволяет оценить температуру

электронов в плазме $T_e = 7000 \pm 2000$ К [3, 4].

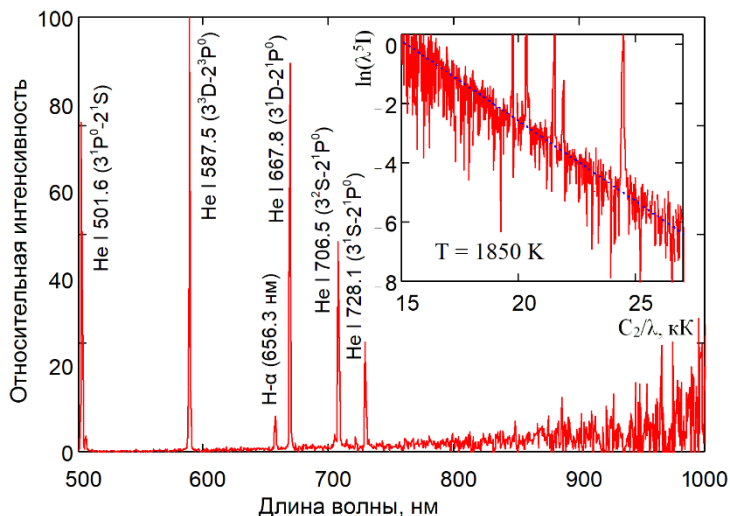


Рис. 3. Спектр излучения плазмы и образца в длинноволновой области.

Спектроскопические измерения выполнены при поддержке гранта РФФ 21-79-10281, работы по генерации плазмы на ПЛМ выполнены при поддержке проекта Госкорпорации "Росатом" №223 ЕОТП-УТП 774/158-Д.

Список использованных источников

- [1] В.П. Будаев, С.Д. Федорович, Ю.В. Мартыненко, М.В. Лукашевский, М.К. Губкин, А.В. Карпов, А.В.Лазукин, Е.А. Шестаков, Д.И. Кавыршин, К.С. Рогозин "Плазменная установка ПЛМ для испытаний вольфрама мощными стационарными плазменно-тепловыми нагрузками", Ядерная физика и инжиниринг Т.9 (2018), №3, с. 283-294
- [2] Магунов А.Н. Спектральная пирометрия. – М.: Физматлит, 2012.
- [3] О. В. Коршунов, В. Ф. Чиннов, Д. И. Кавыршин, "Сильноионизованная дуговая плазма He. Неравновесность, неидеальность и кинетика", ТВТ, 57:2 (2019), 164–173

[4] О. В. Коршунов, В. Ф. Чиннов, Д. И. Кавыршин “Сильноионизованная дуговая плазма Не. Определение температуры в условиях неравновесности и влияния плазменных микрополей”, ТВТ, 57:3, (2019), 338–346

С.Д. ФЕДОРОВИЧ^{1*}, В.П. БУДАЕВ^{1,2}, А.В. КАРПОВ^{1,2}, А.П. СЛИВА¹, А.Ю. МАРЧЕНКОВ¹, М.В.ЛУКАШЕВСКИЙ¹, М.К. ГУБКИН¹, Д.И. КАВЫРШИН¹, А.В. ЗАХАРЕНКОВ¹, В. ЧАН КУАНГ¹, К.А. РОГОЗИН¹, А.А. КОНЬКОВ¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва

*FedorovichSD@mail.ru

ДИАГНОСТИКА ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ ПЛАЗМЫ И ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ НА ОБРАЩЕННЫЕ К ПЛАЗМЕ МАТЕРИАЛЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С ДУГОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ

В современных токамаках наблюдаются экстремально большие тепловые потоки и потоки частиц на поверхность диверторных пластин и лимитеров [1]. Процессы дугообразования на обращенной к плазме поверхности возникают при превышении порогового уровня локального теплового потока на поверхность и вызванного им перегрева поверхности; такой процесс ожидается при воздействии ЭЛМов в крупномасштабном токамаке и реакторе, его в полной мере можно будет изучать лишь в крупномасштабном стационарном токамаке (WEST, EAST, ИТЭР и др.). Моделирование таких нагрузок можно проводить в линейных плазменных установках - симуляторах дивертора. Для таких целей в НИУ «МЭИ» на плазменной установке ПЛМ (плазменный линейный мультикасп) [2] выполняются исследования взаимодействия плазма-стенка и испытания новых технологий интенсивного охлаждения конструкций вольфрамовых и жидкометаллических литиевых внутрикамерных компонентов при мощных плазменно-пучковых тепловых нагрузках до и более 10 МВт/м², в том числе, при дуговых процессах. Для исследования взаимодействия плазма-стенка при таких экстремально высоких нагрузках необходимы комплексные одновременные измерения свойств приповерхностной турбулентной плазмы, формирующей потоки на материал, и регистрация тепловых потоков на материал. Для измерения этих характеристик была разработана диагностика на основе зондов Ленгмюра, пирометрических измерений и термопар для использования при испытаниях вольфрамовых модулей теплозащитной обшивки дивертора.

Принципиальная схема зондовых измерений представлена на рисунке 1. Зондовая сборка из 4-х ленгмюровских зондов (расстояние между зондами было 3 мм) погружалась быстрым манипулятором поперек плазменного

цилиндрического разряда в область над испытуемым модулем теплозащитной облицовки. В эксперименте определено оптимальное время пребывания зондов в центральной области плазменного разряда - не более 1,5 с. Внутренний диаметр камеры установки ПЛМ - 150 мм, амплитуда передвижения зондовой сборки - 110 мм. Максимальная скорость передвижения сборки зондов превышает 500 мм/с. Система регистрации сигнала и сбора данных создана с использованием запоминающих осциллографов Owon XDS3202a, позволяющих зарегистрировать сигналы в частотном диапазоне от 1 Гц до 1 МГц.

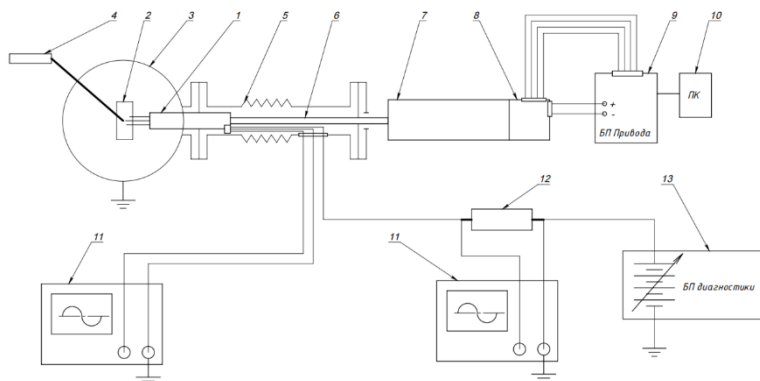


Рисунок 1 – Схема диагностики приповерхностной плазмы, турбулентности плазмы и тепловых потоков

1- сборка зондов, 2- испытуемый образец, 3-разрядная камера, 4-пирометр, 5-сильфон, 6 - система передвижений, 7 -линейный привод, 8 - сервопривод, 9,10 - автоматическая система управления, 11 - цифровой запоминающий осциллограф, 12 - измерительный шунт, 13 -источник питания диагностики.

Созданная диагностика была смонтирована на усовершенствованную установку ПЛМ (рисунок 2). Сигнал с термопар, установленных в испытуемом модуле, регистрировался многоканальной системой сбора и обработки данных. Расхождение показаний термопар с показаниями пирометра не превышало 1 К при измерении температуры поверхности. Юстировка пирометра проводилась по температуре плавления олова 232°С. Проведены измерения характеристик приповерхностной плазмы и тепловых потоков при плазменных испытаниях теплозащитных диверторных облицовочных модулей, изготовленных по технологии ИТЭР.

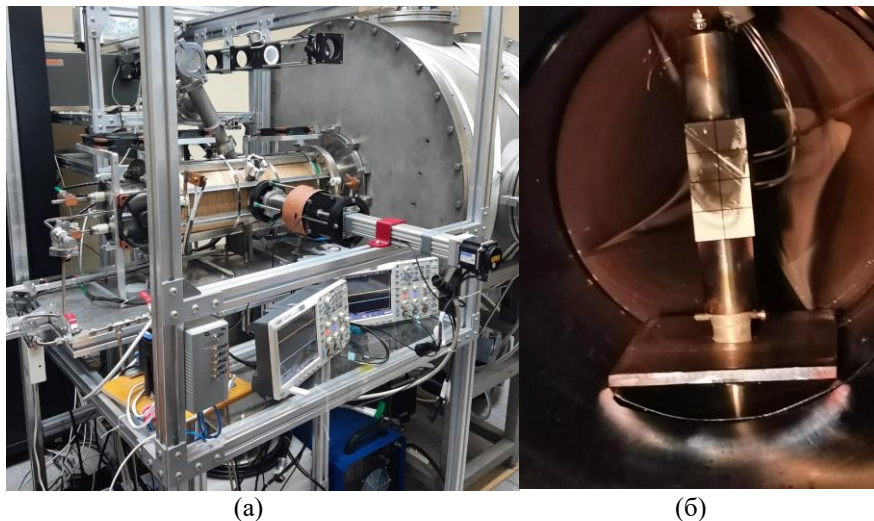


Рисунок 2 – (а) Система диагностики на усовершенствованной плазменной установке ПЛМ. (б) Макет вольфрамового диверторного модуля

Вольфрамовый теплозащитный диверторный модуль был изготовлен из вольфрама марки ВМ-П ИТЭР - восемь вольфрамовых пластин размером $10 \times 10 \times 8$ мм, припаянных к медной подложке размером $20 \times 20 \times 42$ мм с трубкой диаметром 14 мм для подключения системы охлаждения, рисунок 2б. Измеренный тепловой поток на поверхность при плазменных испытаниях в гелиевой плазме - $0,2-0,25$ МВт/м².

В экспериментах измерительные зонды устанавливались на расстоянии от 5 мм до 70 мм до поверхности вольфрамового модуля. Система измерения позволяла регистрировать концентрацию плазмы и потенциал плазмы в зоне измерения зондом. На ленгмюровские зонды подавался потенциал -100 вольт при измерении ионного тока насыщения (соответствующий концентрации плазмы), регистрировались флуктуации сигнала. Анализ этих сигналов позволил получить данные о характеристиках турбулентности приповерхностной плазмы. Потенциал плазмы определялся по измерениям плавающего потенциала. Среднеквадратичное отклонение флуктуаций плавающего потенциала от среднего значения было $1,8 \pm 0,55$ В. Относительный уровень флуктуаций $0,5 \pm 0,15$. Спектры зарегистрированных

сигналов лежат в диапазоне от 1 до 1000 кГц, рисунок 3. Свойства флуктуаций зарегистрированных характеристик приповерхностной плазмы указывают на дрейфово-диссипативный тип турбулентности плазмы, наблюдаемый в пристеночной плазме токамаков.

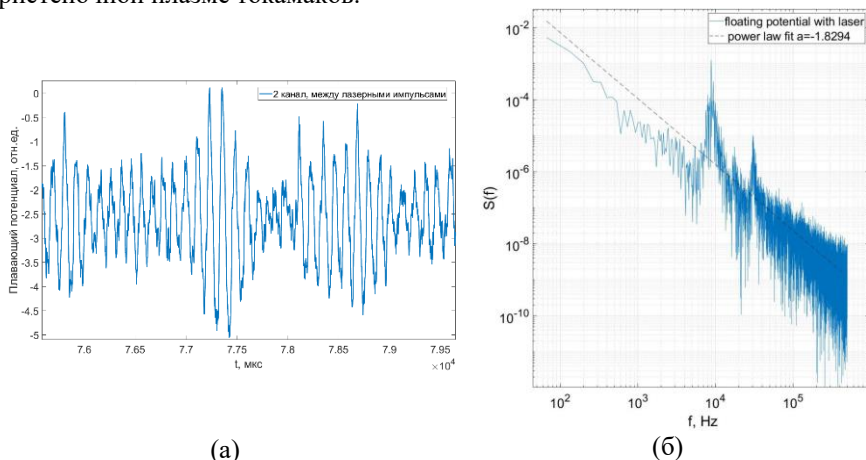


Рисунок 3 – (а) - плавающий потенциала зонда. (б) - Фурье-спектр флуктуаций потенциала зонда, подгонка спектра (пунктир) степенной функцией $S \sim f^{-a}$, $a=1,83$

Проведены комбинированные испытания вольфрамовых макетов облицовки дивертора двумя типами нагрузок: нагрузками 0,5-1 МВт/м² на плазменном стенде в стационарном режиме суммарной длительности 50 часов, нагрузками до 50 МВт/м² на стенде с электронным пучком.

Плазменные испытания проводились при поддержке Госкорпорации "Росатом" проект № 223 ЕОТП-УТП 774/158-Д, спектроскопические исследования параметров плазмы - при поддержке гранта РФФИ 21-79-10281, оценка радиационных эффектов – при поддержке гранта РФФИ 19-29-02020, рентгеновский анализ – при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FSWF-2020-0023).

Список использованных источников

- [1] Будаев В.П. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2015, т. 38, № 4, с. 5.
- [2] Будаев В.П. и др. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2017. т.40, №3. с.35.

Д.И. ЧЕРКЕЗ, Н.О. СТЕПАНОВ*, С.С. АНАНЬЕВ, А.В. СПИЦЫН
НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия
*6121591@gmail.com

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С МАТЕРИАЛАМИ НА ОСНОВЕ ВЧ-ИСТОЧНИКА ГЕЛИКОННОГО ТИПА: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Источники низкотемпературной плазмы в настоящее время широко применяются в самых разнообразных областях науки и техники, и промышленности: бытовое применение в качестве источников света; производство микроэлектроники; плазменная обработка материалов; научные исследования, посвященные различным аспектам взаимодействия плазмы с материалами, в т.ч. перспективными для применения в термоядерном реакторе. Плазменные источники основываются на различных методах ионизации газа: ионизация молекул в тлеющем газовом разряде, ионизация газа электронным ударом, возбуждение высокочастотными (ВЧ) и сверхвысокочастотными (СВЧ) источниками тока и т.д. Для проведения прикладных исследований в области взаимодействия плазмы с поверхностью применительно к задачам термоядерных установок наиболее интересны высокопоточные плазменные генераторы, имитирующие плазменные потоки существующих и строящихся термоядерных реакторов.

К перспективному типу компактных плазменных источников для исследования взаимодействия плазмы с материалами можно отнести ВЧ-источники плазмы, в частности с индукционным разрядом геликонного типа. Достоинством подобных плазменных источников является возможность варьировать плотность плазмы (и, соответственно, потоки плазмы) в широких пределах, а также отсутствие эродированных в ходе горения разряда электродов, что существенно влияет на чистоту плазмы. В тоже время, установки такого типа, позволяют достигать плотности плазмы порядка 10^{17} – 10^{19} м⁻³ и отличаются компактностью.

В работе представлены результаты проектирования и создания лабораторной экспериментальной установки ГПИ-2 на основе 13,56 МГц геликонного источника плазмы мощностью 2 кВт. Установка предназначена для изучения взаимодействия плазмы с перспективными для применения в термоядерных реакторах материалами. В работе также рассмотрены перспективы дальнейшей модернизации: увеличение вводимой ВЧ-мощности и применение дополнительных магнитных катушек (до 0,3 Тл) для создания

магнитной фокусировки с целью повышения плотности плазменного потока. В текущей конфигурации установки в качестве рабочего газа используются изотопы водорода: протий или дейтерий, в т.ч. с возможностью добавления примесей – гелия, неона или аргона.

В работе также приведены первые результаты экспериментов с измерением величин ионных токов в зависимости от введённой ВЧ мощности, а также данные, полученные с помощью зондов Ленгмюра. Полученные результаты подтверждают возможность работы источника плазмы в ожидаемом диапазоне плотностей потока ионов 1020–1022 ионов/(с·м²).

Эта работа была частично поддержана Российским научным фондом (№ 18-72-10162).

К.В. ЧАН^{1*}, В.П. БУДАЕВ^{1,2}, А.В. ДЕДОВ¹, С.Д. ФЕДОРОВИЧ¹, Д.И. КАВЫРШИН^{1,3}, А.В. КАРПОВ^{1,2}, Ю.В. МАРТЫНЕНКО², А.Т. КОМОВ¹, А.В. ЛУБЕНЧЕНКО¹, М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ¹, А.В. ЗАХАРЕНКОВ¹, М.К. ГУБКИН¹, Г.Б. ВАСИЛЬЕВ¹, К.А. РОГОЗИН¹, А.А. КОНЬКОВ¹, В.С. КВАСКОВ¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

³Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), Москва, Россия

*chutichxomray@gmail.com

СИСТЕМА ВЧ-НАГРЕВА ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В УСТАНОВКЕ ПЛМ-М

Плазменная линейная магнитная ловушка ПЛМ-М построена на базе имеющейся установки ПЛМ (НИУ «МЭИ») [1] с целью моделирования краевой плазмы в термоядерных реакторах, испытания обращенных к плазме внутрикамерных компонентов соответствующей нагрузкой, ожидаемой в термоядерном реакторе и изучения проблем взаимодействия плазмы с поверхностью, включая перенос примесей, распыление, совместное осаждение, рекристаллизацию, изменение поверхностных слоев [2].

В данной работе разработана и изготовлена система стационарного ВЧ-нагрева с использованием геликонной антенны для повышения плазменных параметров в установке ПЛМ-М, которые способствуют обеспечить соответствующие реакторным плазменные нагрузки на материалы. Кроме того, с помощью данной системы ВЧ-нагрева будут проводиться исследования возможности применения геликонного источника плазмы для кондиционирования стенок токамака и в плазменных двигателях.

Система ВЧ-нагрева состоит из геликонной антенны, системы охлаждения, источника ВЧ-питания, системы согласования и магнитной системы (рис. 1). Кварцевое стекло толщиной стенки 3 мм и внешним диаметром 75 мм помещается внутрь антенны, чтобы избежать прямого контакта между антенной и плазмой. Энергия мощностью до 4кВт из ВЧ-генератора, передается в плазму через коаксиальный кабель маркой РК 50-7-22; систему согласования и геликонную антенну на частоте 27,12 МГц. Для передачи мощности извне внутренней геликонной антенне использованы охлаждаемые ВЧ-вакуумные вводы.

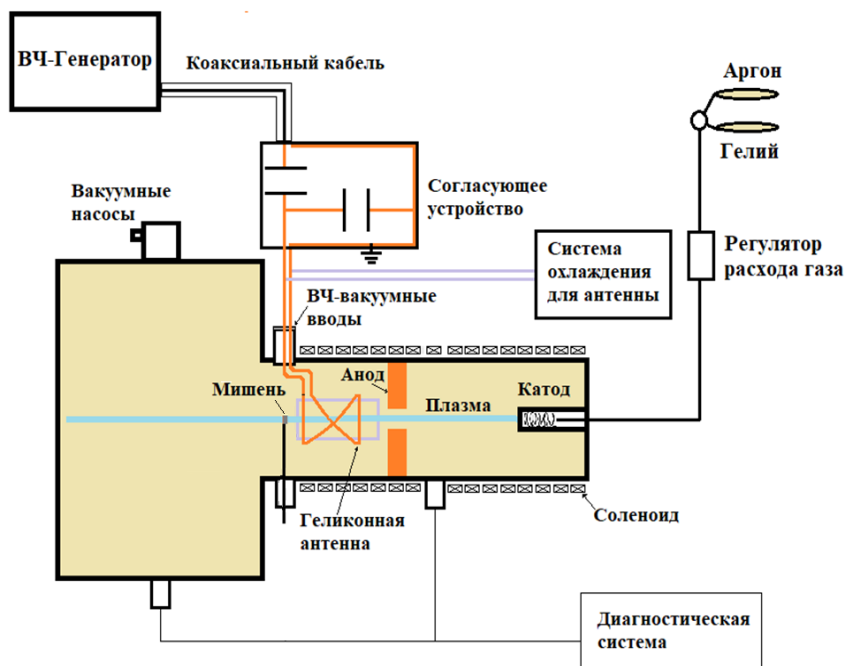


Рисунок 1 – Блок-схема установки ПЛМ-М с системой ВЧ-нагрева плазмы. Указано положение внутренней геликонной антенны с водяным охлаждением.

Геликонная антенна (рис. 2а) полувинтового типа имеет длину 100 мм и внутренний диаметр 78 мм, изготовлена из медной трубки диаметром 6 мм. Для обеспечения возможности работы системы ВЧ-нагрева плазмы в стационарном режиме к антенне подключается система водяного охлаждения.

Система согласования (рис. 2б) состоит из двух вакуумных переменных конденсаторов номинальной емкостью от 20 до 1000 пФ. Задача данной системы является приравнением сопротивления нагрузки (индуктивное сопротивление антенны, активное сопротивление плазмы) сопротивлению генератора (50 Ом), чтобы исключить потерь мощности. Эта система должна обеспечивать гарантированную работу с активной составляющей ВЧ-нагрузки от ~ 1 до 50 Ом и с реактивной составляющей от $j1$ до $j250$ Ом.

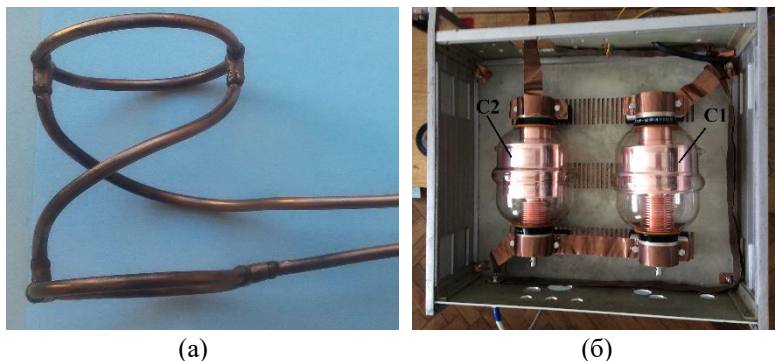


Рисунок 2 – (а) Фотография изготовленной геликонной антенны;
(б) Фотография изготовленной системы согласования.

Вакуумная и газовая системы установки ПЛМ-М позволяют устанавливать давление в экспериментальной камере в заданных пределах. Минимальное достигнутое давление в рабочей камере $1 \cdot 10^{-4}$ Па, что полностью обеспечивает режимы работы геликонного разряда.

Важным техническим элементом, используемым в системе ВЧ-нагрева плазмы геликонного типа, является внешнее стационарное магнитное поле параллельное оси симметрии разрядной камеры. Это внешнее магнитное поле способствует удержанию внутри плазмы заряженных частиц, возбуждению электромагнитных геликонных волн, энергия которых может проникать вглубь плазмы и поглощаться во всем плазменном объеме.

В установке ПЛМ-М, магнитная система состоит из двух частей: продольное магнитное поле, создаваемое катушкой с током до 200 А, и система радиальных магнитных полей, которые формируются постоянными неодимовыми магнитами. В результате формируется мультикасповая конфигурация магнитного поля - 8-польный мультикасп, имеющего значение до 0,2 Тл в каспах, которое удовлетворит условию возбуждения электромагнитных геликонных волн при частоте 27,12 МГц.

Система диагностики плазмы в установке ПЛМ-М включает в себя тройной зонд Ленгмюра и систему оптической спектроскопии высокого разрешения на основе монохроматор-спектрографа.

Ожидается, что система позволит получить плазму, имеющую электронные температуру T_e до 10 эВ и плотность $n_e = (1-10) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ при величине магнитного поля на оси до 0,03 Тл в стационарном режиме работы.

Ожидаемая плотность теплового потока на поверхность, обращенную к

плазме - до 10 МВт/м^2 и более, достигаемая в экспериментах с дополнительной нагрузкой с использованием лазерного комплекса ПЛМ-М.

Спектроскопическое исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ 21-79-10281, испытания материалов на установке ПЛМ - при поддержке проекта № 223 ЕОТП-УТП 774/158-Д ГК «Росатом» ЧУ «Наука и инновации», анализ поверхности материалов проведен при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FSWF-2020-0023), оценки радиационных эффектов проведены при поддержке гранта РФФИ 19-29-02020.

Список использованных источников

- [1] Будаев В.П. и др. Плазменная установка ПЛМ для испытаний вольфрама мощными стационарными плазменно-тепловыми нагрузками / ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА И ИНЖИНИРИНГ. – 2018. – том 9. - № 3. – С. 283-294.
- [2] V. P. Budaev Stochastic clustering of material surface under high-heat plasma load / Physics Letters A. – 2017. –Vol. 381. – № 43. – pp. 3706-3713.
- [3] Chen F. F. Helicon discharges and sources: a review / Plasma Sources Science and Technology. – 2015. – Vol. 24. – № 1. – pp. 1-25.
- [4] Shunjiro S. Helicon high-density plasma sources: physics and applications / Advances in Physics. – 2018. – Vol. 3. – № 1. – pp. 185-220.

Ю.А. ГУРОВА^{1*}, А.Н. СУЧКОВ¹, Д.М. БАЧУРИНА¹, Н.С. ПОПОВ¹, О.Н. СЕВРЮКОВ¹, А.М. ЛИТНОВСКИЙ^{1,2}, Ш. ТАН^{2,3}

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия

²Forschungszentrum Jülich, Германия

³Hefei University of Technology, Китай

*Violinarus@inbox.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ СПЛАВА-ПРИПОЯ TiZr4Be ДЛЯ ПАЙКИ САМОПАССИВИРУЮЩИХСЯ ВОЛЬФРАМОВЫХ СПЛАВОВ СО СТАЛЬЮ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА DEMO

Термоядерный реактор DEMO (DEMOstration Power Plant) — это следующий шаг на пути к созданию промышленной термоядерной электростанции. Проекты DEMO разрабатываются во всем мире.

В каждой из разрабатываемых концепций предусматривается создание такого важного компонента, который является частью бланкета, как первая стенка (FW – First Wall), основная функция которой заключается в том, чтобы способствовать производству электроэнергии за счет преобразования тепловой энергии, получаемой благодаря потокам тепла из плазменного шнура. Все концепции подразумевают использование в качестве конструкционного материала стали ферритно-мартенситного класса с пониженной активацией, а материал, обращенный к плазме, будет вольфрам.

В случае аварии с потерей теплоносителя (LOCA) с одновременным попаданием воздуха в вакуумную камеру, происходит быстрое окисление вольфрама и выброс радиоактивных оксидов (WO₃) в атмосферу. Чтобы решить данную проблему ученые активно развивают создание умных сплавов, в состав которых кроме вольфрама будут входить такие легирующие элементы как иттрий, цирконий и хром. В случае аварии произойдет образование стабильной защитной пленки на поверхности материала при высоких температурах, которая будет предотвращать образование оксида.

При создании материала первой стенки возникает сложность при прямом соединении вольфрама (вольфрамового сплава) со сталью из-за большой разницы в коэффициенте теплового расширения (КТР). Для подавления разницы КТР обычно используются промежуточные прослойки, такие как ванадий или тантал, при этом высокотемпературная пайка является перспективной технологией. В настоящее время большинство работ посвящено припоям на основе меди и никеля, однако их применимость ограничена из-за высокой остаточной радиоактивности. Поэтому в данной работе был использован полностью малоактивируемый

припой 48Ti-48Zr-4Be мас.% (TiZr4Be). Температура плавления данного припоя позволяет совместить процессы пайки и термообработки сталей.

В работе проведена пайка вольфрамовых сплавов (WCrY и WCrZr) со сталями ферритно-мартенситного класса Rusfer, Eurofer, по режимам термообработки сталей (1100°C /60 мин +720°C /180 мин, 980°C /30 мин +750°C /90 мин) соответственно.

Паяные соединения Rusfer/Ta/SA и Eurofer/Ta/SA, полученные с использованием припоя TiZr4Be, характеризуются отсутствием трещин, несплошностей и пор. С помощью EDS анализа установлено структурно-фазовое состояние паяных швов Rusfer/ TiZr4Be /Ta и Eurofer/ TiZr4Be /Ta идентичны: в швах образуются твердые иглообразные фазы на основе тантала на фоне фаз, состоящих из компонентов припоя и соединяемых материалов.

В швах WCrY/ TiZr4Be /Ta и WCrZr/ TiZr4Be /Ta образуются фазы на основе Ti, также в шве WCrZr/ TiZr4Be /Ta происходит образование фаз на основе вольфрама.

Работа выполнена при поддержке Эндаумент Фонда НИЯУ МИФИ.

А.П. СЛИВА¹, В.К. ДРАГУНОВ¹, А.Ю. МАРЧЕНКОВ^{1*}, В.П. БУДАЕВ^{1,2},
Д.А. ЖГУТ¹, И.Е. ЖМУРКО¹, С.Д. ФЕДОРОВИЧ¹, А.В. КАРПОВ¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва

*art-marchenkov@yandex.ru

О МЕТОДЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ С ПРИСАДОЧНОЙ ПРОВОЛОКОЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОХЛАЖДАЕМЫХ ВОЛЬФРАМОВЫХ МОДУЛЕЙ ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ОБЛИЦОВКИ ДИВЕРТОРА ТОКАМАКА- РЕАКТОРА

Вольфрам используется для изготовления облицовки модулей теплозащитной облицовки дивертора ИТЭР, рассматривается для изготовления диверторов и первой стенки токамаков-реакторов ТИН и ДЕМО. Для обеспечения охлаждения этих модулей используются бронзовые и медные подложки сложной конструкции с трубками охлаждения. Соединение вольфрамовых пластин с подложками осуществляется сваркой, такие сложные многоэлементные конструкции не обеспечивают оптимальные условия эксплуатации модулей теплозащитной облицовки, они трудоемки при изготовлении. Пучковые, тепловые, плазменные испытания вольфрамовых модулей нагрузками, ожидаемыми в ИТЭР, показали [1], что из-за высоких градиентов температур при термоциклических нагрузках внутри вольфрамовой облицовки, а также на границе контакта с теплоотводящими конструкциями из бронзы и меди возникают высокие остаточные напряжения, которые выступают как движущая сила зарождения и развития трещин [2], что является риском разрушения модулей и попадания в камеру воды из разрушенных трубок охлаждения. В этой связи, перспективными являются технологии изготовления цельных модулей диверторных панелей из вольфрамовых материалов. При этом существует потенциальная возможность сформировать градиентную границу в зоне контакта с охладителем в трубке, что позволит снизить концентрацию напряжений и избежать разрушений по границе раздела в процессе эксплуатации [3].

Одной из таких технологий является аддитивное формообразование. Среди многочисленных процессов аддитивного производства наибольший прогресс достигнут в технологии селективного лазерного плавления (SLM), заключающейся в спекании мелкодисперсного порошкового металлического материала с помощью лазера. По результатам исследований были выявлены

основные факторы, препятствующие получению качественного материала путём аддитивного формообразования [4, 5]. Во-первых, низкая жидкотекучесть вольфрама, высокая вязкость в жидком состоянии и высокая скорость кристаллизации приводят к высокой пористости наплавленного материала. Во-вторых, вольфрам интенсивно окисляется при высоких температурах, что приводит к загрязнению поверхности, появлению несплавлений и пористости. В-третьих, вольфрам имеет низкую пластичность, что приводит к трещинообразованию на этапах кристаллизации и последующего охлаждения в твердой фазе.

На сегодняшний день методом SLM получены относительно неплохие результаты – в наиболее удачных образцах пористость вольфрама не превышает десятых долей процента, а трещины практически полностью отсутствуют [6]. Вместе с тем, необходимо принимать во внимание тот факт, что из-за низкого запаса пластичности наличие даже таких незначительных для большинства конструкционных материалов дефектов в виде пористости или растрескивания, для вольфрама является весьма критичным при воздействии эксплуатационных нагрузок. В связи с этим, вопрос о повышении качества вольфрамовых деталей, получаемых методами аддитивного формообразования, остаётся открытым и актуальным.

Для вольфрама использование технологии электронно-лучевого сплавления (ЕВМ) является предпочтительным, поскольку обязательное наличие вакуума позволяет защитить нагретый и расплавленный вольфрам от взаимодействия с атмосферой (т.е. от окисления). Результаты применения отработанной технологии ЕВМ позволили получить вольфрам с низкой степенью пористости и без видимых трещин [7]. Одной из причин отсутствия стабильности процесса формообразования заготовок из вольфрама является использование порошков в качестве материала для формирования заготовок. Существенная площадь поверхности порошкового сырьевого материала обуславливает снижение чистоты материала формируемых изделий и заготовок, что является основной причиной образования пористости и может провоцировать появление трещин. В этой связи, одним из способов аддитивного формообразования, показавшим свою перспективность на различных материалах (рис. 1), является метод электронно-лучевой наплавки с использованием присадочной проволоки.

Площадь поверхности одного килограмма вольфрамового порошка фракцией 50 мкм составляет $6,234 \text{ м}^2$, а одного килограмма проволоки диаметром 0,5 мм – $0,416 \text{ м}^2$. Таким образом, переход к проволочному сырью приведет к уменьшению площади поверхности более чем на порядок. Кроме того, проволока является более удобным сырьем: её проще готовить к

наплавке, хранить и транспортировать.

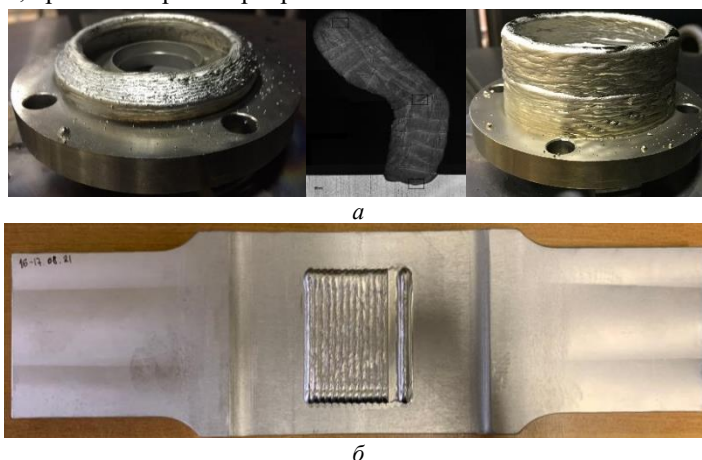


Рисунок 1. Применение электронно-лучевого аддитивного формообразования для получения заготовок и конструкций из различных материалов: а – тела вращения из стали 316L, б – образец для механических испытаний из сплава ВТ6ч

Ввиду формирования высокого уровня напряжений в получаемых заготовках и изделиях задача обеспечения технологической прочности формируемых конструкций стоит наиболее актуально. Повышения стойкости против образования трещин можно добиться за счет легирования и обеспечения правильного термического цикла при формировании изделий и заготовок. Пластичность вольфрама сильно зависит от его чистоты и состояния: температура перехода в хрупкое состояние составляет $300...400^{\circ}\text{C}$ для деформированного технического вольфрама и около 500°C – для рекристаллизованного [8]. Относительное удлинение при комнатных температурах практически равняется нулю, при температуре 1650°C – 49% [8], а допустимая степень деформации при горячей обработке давлением составляет 35% при 1000°C [9]. Однако, температура начала рекристаллизации вольфрама около 1400°C , и нагрев технического вольфрама электронно-лучевой плавки (чистота 99,8 мас. %) выше 1500°C приводит к сильному росту зерна вследствие собирательной рекристаллизации [8]. Рекристаллизационный отжиг резко ухудшает пластичность вольфрама и повышает температуру перехода в хрупкое состояние [10]. Таким образом, в процессе построения конструкция должна находиться при температуре, обеспечивающей высокую пластичность металла, при которой не происходит роста зерна. Использование постоянного подогрева изделий и заготовок в

интервале температур 1200...1400°C в процессе их формирования может обеспечить допустимый термдеформационный режим без образования трещин. Для этого необходимо разрабатывать специализированное оборудование, позволяющее производить нагрев в вакуумной камере до требуемых температур, специализированную оснастку для подачи проволочного сырьевого материала в условиях интенсивного теплового облучения из зоны построения, и конструкцию многослойных тепловых экранов для защиты электронной пушки, приводов и внутрикамерного оборудования от интенсивного теплового излучения.

Электронно-лучевое аддитивное формообразование с проволочным сырьевым материалом позволяет формировать материал с заданным химическим составом *in situ* из нескольких проволок [11], в том числе градиентных материалов – с плавным, регулируемым изменением химического состава [12, 13]. Применение таких технологий перспективно для изготовления охлаждаемых вольфрамовых модулей теплозащитной облицовки дивертора токамака-реактора из вольфрама и его сплавов.

Работа частично поддержана проектом № 223 ЕОТП-УТП 774/158-Д ГК «Росатом» ЧУ «Наука и инновации» и Министерством науки и высшего образования РФ (FSWF-2020-0023).

Список использованных источников

- [1] Будаев В.П. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез **38(4)** 5-33 (2015)
- [2] Zammuto I. et al. Fusion Engineering and Design **136** 1052-1057 (2018)
- [3] Yan L. et al. Additive Manufacturing **31** 100901 (2019)
- [4] Zhou X. et al. J. Materials Processing Technology **222** 33-42 (2015)
- [5] Guo M. et al. Int. J. Refractory Metals and Hard Materials **79** 37-46 (2019)
- [6] Bertrand Ph. et al. Applied Surface Science **254(4)** 989-992 (2007)
- [7] Wright J. Additive Manufacturing of Tungsten via Selective Laser Melting and Electron Beam Melting: PhD Thesis. England: University of Sheffield, 2019. 190 с.
- [8] Гуревич С.М. и др. Металлургия и технология сварки тугоплавких металлов и сплавов на их основе. – Киев: Наук. Думка, 1982. – 304 с.
- [9] Корнеев Н.И. и др. Обработка давлением тугоплавких металлов и сплавов. – М: Металлургия, 1975. – 439 с.
- [10] Колачев Б.А. и др. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: Учебник для вузов. – М.: МИСИС, 2005. – 432 с.
- [11] Патент РФ № 2725537. Способ электронно-лучевого аддитивного получения заготовок. Драгунов В.К., Слива А.П., Гончаров А.Л. и др. 02.07.2020. Бюл. № 19
- [12] Osipovich K.S. et al. J. Materials Science **55** 9258-9272 (2020)
- [13] Zykova A. et al. Materials Letters **312** 131586 (2022)

СОДЕРЖАНИЕ

С.В. МИРНОВ^{1*}, А.В. ВЕРТКОВ², М.Ю. ЖАРКОВ², А.В. КУРЯЧИЙ², И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ², А.С. ДЖУРИК¹, М.М. МУРАЧЕВ¹, В.Б. ЛАЗАРЕВ¹, Н.Т. ДЖИГАЙЛО¹, Н.В. ЛЕШОВ¹, Р.В. ЧЕКУШИН¹, С.И. КРАВЧУК¹, В.А. МОРОЗОВ¹, П.А. АНТОНОВ¹, А.В. ЗОРИН¹, Я.А. ВАСИНА¹, Н.П. ПЕТРОВА¹

*СОЗДАНИЕ И ПЛАЗМЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА ТОКАМАКЕ Т-11М
ДЕЙСТВУЮЩЕЙ МОДЕЛИ ПОЛУЗАМКНУТОГО КОНТУРА ЦИРКУЛЯЦИИ
ЛИТИЯ ДЛЯ КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО ТОКАМАКА12*

И.В. МАЗУЛЬ*, Р.Н. ГИНИЯТУЛИН, А.А. КАВИН, Н.В. ЛИТУНОВСКИЙ,
А.Н. МАХАНЬКОВ, П.Ю. ПИСКАРЕВ, В.Н. ТАНЧУК

ОБРАЩЕННЫЕ К ПЛАЗМЕ КОМПОНЕНТЫ ТОКАМАКА ТРТ14

М.Ю. ЖАРКОВ^{1*}, А.В. ВЕРТКОВ¹, И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ¹, С.В. МИРНОВ²,
В.Б. ЛАЗАРЕВ²

*ЛИТИЕВЫЙ ЛИМИТЕР КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО ТИПА ТОКАМАКА Т-11М
КАК ПРОТОТИП ЛИМИТЕРА ТОКАМАКА Т-15МД.....15*

А.А. ПИСАРЕВ^{1*}, Л.Е. ЗАХАРОВ², А.В. ВЕРТКОВ³, В.В. ДУШИК⁴,
М.Ю. ЖАРКОВ³, М.С. КОЛЕСНИК⁵, И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ³, И.В.
МАЗУЛЬ⁵, П.Ю. ПИСКАРЕВ⁵, Р.В. РУЛЕВ⁵, Г.М. ТАРАСЮК¹, А.А.
ШАПОРЕНКОВ⁴

*МАКЕТ ПРИЕМНОЙ ПЛАСТИНЫ ДИВЕРТОРА ТОКАМАКА, ОСНОВАННОГО НА
КОНЦЕПЦИИ ТЕКУЩЕГО СЛОЯ ЖИДКОГО ЛИТИЯ19*

В.П. БУДАЕВ^{1,2*}, А.М. ЖИТЛУХИН³, Ю.В. МАРТЫНЕНКО¹, В.Л.
ПОДКОВЫРОВ³, И.М. ПОЗНЯК^{3,4}, Д.В. КОВАЛЕНКО³, В.Ю. ЦЫБЕНКО³,
З.И. НОВОСЕЛОВА^{3,4}, Е.Д. ФЕДУЛАЕВ^{3,4}, Д.А. БУРМИСТРОВ^{2,3}, С.Д.
ЛИДЖИГОРЯЕВ^{3,4}, О.Р. ИСМАГИЛОВ³

*ИСПЫТАНИЯ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ОБЛИЦОВКИ
КУПОЛА ДИВЕРТОРА ИТЭР ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ НА КСПУ-Т:
РЕЗУЛЬТАТЫ И ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ НА УСЛОВИЯ ИТЭР23*

I. BORODKINA^{1,2}, D.V. BORODIN³, D. DOUAI⁴, D. TSKHAKAYA¹,
H. KUMPULAINEN⁵, E.DE LA CAL⁶, J. ROMA ZANOV³, A. HUBER³ and JET
CONTRIBUTORS*

*OVERVIEW OF PLASMA-FACING COMPONENT EROSION AND IMPURITY
MIGRATION STUDIES AT JET-ILW.....27*

В.А. ПОПОВ^{1,2*}, А.С. АРАКЧЕЕВ^{1,3}, И.В. КАНДАУРОВ¹, А.А. КАСАТОВ^{1,2},
В.В. КУРКУЧЕКОВ¹, Ю.А. ТРУНЕВ¹, А.А. ВАСИЛЬЕВ¹,
Л.Н. ВЯЧЕСЛАВОВ¹

*ТЕРМОТОК В ВОЛЬФРАМЕ И ПРИПОВЕРХНОСТНОМ ИСПАРЁННОМ СЛОЕ
ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРЕВЕ.....31*

Н. В. ДАВЫДОВ^{1,2*}, А. С. АРАКЧЕЕВ², А.А. ВАСИЛЬЕВ², Л.Н.
ВЯЧЕСЛАВОВ², И.В. КАНДАУРОВ², А.А. КАСАТОВ^{1,2}, Д.Е.
ЧЕРЕПАНОВ²

*ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПЛАСТИН ПРИ
ИМПУЛЬСНОМ НАГРЕВЕ.....32*

А.А. ВАСИЛЬЕВ^{1,3*}, А.С. АРАКЧЕЕВ^{1,3}, А.В. БУРДАКОВ^{1,3},
Л.Н. ВЯЧЕСЛАВОВ^{1,2,3}, И.В. КАНДАУРОВ¹, А.А. КАСАТОВ^{1,2,3},
В.В. КУРКУЧЕКОВ^{1,2}, А.Г. МАКСИМОВА^{1,2,4}, В.А. ПОПОВ^{1,2},
А.А. РУКТУЕВ^{1,3}, Д.Е. ЧЕРЕПАНОВ^{1,2,3}, А.А. ШОШИН^{1,2}

*ДИНАМИКА ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМА ПОСЛЕ ОБРАЗОВАНИЯ
СЕТИ ТРЕЩИН ВО ВРЕМЯ ТЕПЛОВОГО УДАРА34*

Р.А. СЕЛИВАНОВ¹, И.А. СОРОКИН^{1,2}, С.А. КРАТ^{1*}, Н.С. СЕРГЕЕВ^{1,3}, Д.В.
КОЛОДКО^{1,2}, Ф.С. ПОДОЛЯКО¹, Е.А. ФЕФЕЛОВА¹, О.В. ВОЛКОВА⁴, В.В.
ЗАХАРОВ⁴

*ИССЛЕДОВАНИЕ БОР-ЛИТИЕВОГО КОМПОЗИТА ПОД ДЕЙСТВИЕМ
МОЩНЫХ ТЕПЛОВЫХ И ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ НАГРУЗОК.....37*

К.А. РОГОЗИН^{1,2*}, В.П. БУДАЕВ^{1,2}, С.Д. ФЕДОРОВИЧ¹, А.В. КАРПОВ^{1,2},
М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ¹, А.П. СЛИВА¹, А.Ю. МАРЧЕНКОВ¹, В.Ч. КУАНГ¹,
В.С. КВАСКОВ^{1,2}, А.А. КОНЬКОВ¹

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОЙ И ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ НАГРУЗОК НА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ ТОКАМАКА-РЕАКТОРА.....40

Н.Н. КАСИМОВА*, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, С.С. ДОВГАНЮК, А.М. ЗАХАРОВ

МОДИФИКАЦИЯ АЛЮМИНИЙ-ВОЛЬФРАМОВЫХ СЛОЕВ НА ВОЛЬФРАМЕ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ.....44

В.П. БУДАЕВ^{1,2*}, С.Д. ФЕДОРОВИЧ¹, Ю.В. МАРТЫНЕНКО^{2,1}, А.В. КАРПОВ^{1,2*}, А.Ю. МАРЧЕНКОВ¹, М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ¹, А.В. ЛАЗУКИН¹, М.К. ГУБКИН¹, Д.И. КАВЫРШИН¹, Д.С. ЛУКЬЯНЦЕВ¹, М.В. БУДАЕВА⁴, В. ЧАН КУАНГ¹, Г.Б. ВАСИЛЬЕВ¹, К.А. РОГОЗИН¹, А.А. КОНЬКОВ¹

РОСТ НАНОСТРУКТУР НА ТИТАНЕ И ЖЕЛЕЗЕ ПРИ ПЛАЗМЕННОМ ОБЛУЧЕНИИ СТАЦИОНАРНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ НАГРУЗКАМИ В УСТАНОВКЕ ПЛМ.....48

Н.С. СЕРГЕЕВ^{1,2*}, И.А. СОРОКИН^{1,3}, Ф.С. ПОДОЛЯКО¹, О.В. ОГОРОДНИКОВА¹, В.С. ЕФИМОВ¹, Ю.М. ГАСПАРЯН¹, М.Д. САВЕЛЬЕВ¹

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЫ С ПРИМЕСЬЮ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ.....52

Н.Н. АНДРИАНОВА¹, А.М. БОРИСОВ^{1,2}, Е.С. МАШКОВА³, М.А. ОВЧИННИКОВ^{3*}

МОДИФИЦИРОВАНИЕ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКОДОЗНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ИОНОВ ПЛАЗМЫ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК56

М.М. ЦВЕНТУХ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВЕЩЕСТВА ИЗ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ КАТОДНОГО ПЯТНА ВАКУУМНОЙ ДУГИ.....60

А.А. КОНЬКОВ^{1*}, К.А. РОГОЗИН¹, В.ЧАН КУАНГ¹, В.С. КВАСКОВ¹, С.В. БЕЛОУСОВ¹, А.В. КАРПОВ¹, А.В. ЗАХАРЕНКОВ¹, С.Д. ФЕДОРОВИЧ¹,

В.П. БУДАЕВ¹

*ИСПЫТАНИЕ ОХЛАЖДАЕМЫХ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИТИЕВЫХ
КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ СИСТЕМ СТАЦИОНАРНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ И
ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ НАГРУЗКОЙ63*

А.С. УМЕРЕНКОВА^{1*}, Ю. ВАН¹, З.Р. АРУТЮНЯН¹, Ю.М. ГАСПАРЯН¹,
В.С. ЕФИМОВ¹, А.М. ЛИТНОВСКИЙ², О.В. ОГОРОДНИКОВА¹, К.
ГАРСИЯ-РОЗАЛЕС³

ЗАХВАТ ИОНОВ ДЕЙТЕРИЯ В SMART СПЛАВАХ W-Cr-Y67

Н.П. БОБЫРЬ^{1*}, В.С. ЕФИМОВ², Б.И. ХРИПУНОВ¹, Д.И. ЧЕРКЕЗ¹,
Д.А. КОЗЛОВ¹, Д.С. ДУГИН¹, С.С. АНАНЬЕВ¹

*ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСИ ТАНТАЛА НА ЗАХВАТ ДЕЙТЕРИЯ ПРИ
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ ПЛАЗМЕННОМ ОБЛУЧЕНИИ В СПЛАВЕ W-Ta69*

Д.С. ДУГИН^{1*}, Н.П. БОБЫРЬ^{1,2}, Д.А. КОЗЛОВ¹

*ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ДЕФЕКТОВ В
БРОНЗЕ Cu₁Cr_{0,1}Zr НА НАКОПЛЕНИЯ ДЕЙТЕРИЯ70*

З.Р. АРУТЮНЯН^{*}, Ю.М. ГАСПАРЯН, В.С. ЕФИМОВ, С.А. КРАТ, А.А.
ПИСАРЕВ

*ЗАМЕЩЕНИЕ ИЗОТОПОВ ГЕЛИЯ В ВОЛЬФРАМЕ ПРИ ИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ
.....71*

Е.А. ФЕФЕЛОВА^{*}, С.А. КРАТ, Ю.М. ГАСПАРЯН, В.С. ЕФИМОВ, М.М.
ЗАРИПОВА, М.Г. ИСАЕНКОВА, А.А. ПИСАРЕВ

*ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСИ ГЕЛИЯ НА СВОЙСТВА СООСЖДЕННЫХ ВОЛЬФРАМ-
ДЕЙТЕРИЕВЫХ СЛОЁВ И УДЕРЖАНИЕ ДЕЙТЕРИЯ В НИХ73*

Н.В. ЛЕШОВ^{*}, А.Н. ЩЕРБАК, В.Г. ПЕТРОВ, А.Ю. АФОНИН

*ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДСКАЗАНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ С ПОМОЩЬЮ
ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ТОКАМАКА T-11M75*

Г.Б. ВАСИЛЬЕВ^{1*}, С.Д. ФЕДОРОВИЧ¹, А.В. КАРПОВ^{1,2}, В.П. БУДАЕВ^{1,2},

Д.И. КАВЫРШИН^{1,3}, В. ЧАН КУАНГ¹, М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ¹, М.К. ГУБКИН¹, К.А. РОГОЗИН¹, А.А. КОНЬКОВ¹

ИСПЫТАНИЯ ВОЛЬФРАМОВЫХ МОДУЛЕЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ПЛАЗМЕННОЙ И ЛАЗЕРНОЙ НАГРУЗКОЙ82

А.П. МЕНУШЕНКОВ

СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ – УНИКАЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕЩЕСТВА82

А.А. АЙРАПЕТОВ, Я.А. САДОВСКИЙ, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ

ЗОНДОВОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЫ С ДИВЕРТОРОМ В ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ83

А.В. ГРУНИН, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ*

ЗОНДОВОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ «ПЛАЗМА/СТЕНКА» В ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ 85

С.В. РОГОЖКИН^{1,2*}, А. А. НИКИТИН^{2,1}, А.А. ХОМИЧ^{2,1}, А.А. БОГАЧЕВ^{2,1}, А.В. КЛАУЗ^{1,2}, Н.А. ИСКАНДАРОВА^{2,1}, А.А. ЛУКЬЯНЧУК^{2,1}, О.А. РАЗНИЦЫН^{2,1}, А.С. ШУТОВ^{2,1}, А.Г. ЗАЛУЖНЫЙ^{1,2}, Ю.Е. ГОРШКОВА³, Г.Д. БОГУЧАВА³

КОМПЛЕМЕНТАРНЫЙ АНАЛИЗ РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В МАТЕРИАЛАХ87

Д.М. БАЧУРИНА^{1*}, А.Н. СУЧКОВ¹, И.В. КОЗЛОВ^{1,2}, Н.П. БОБЫРЬ³, Ю.А. ГУРОВА¹, В.С. ЕФИМОВ¹, Е.С. КУЛИКОВА³, А.В. СПИЦИН^{1,3}, Ю.М. ГАСПАРЯН¹

ВЛИЯНИЕ ДЕЙТЕРИЯ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ МАЛОАКТИВИРУЕМОГО ПРИПОЯ TiZr4Vc89

Н.Ю. СВЕЧНИКОВ*, В.Г. СТАНКЕВИЧ

О ВОЗМОЖНОСТИ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОДУКТОВ ЭРОЗИИ ВОЛЬФРАМА С УГЛЕРОДНЫМИ ПРИМЕСЯМИ92

Н.П. БОБЫРЬ^{1,2}, Т.А. АНФИМОВА^{1,3*}, Б.В. ИВАНОВ¹, А.С. АНИКИН², И.Г. ЛЕСИНА², А.А. СЕМЕНОВ², Н.Е. ЗАБИРОВА², А.С. КРЮКОВА², А.Н. БУКИН^{2,3}, А.В. ЛИЗУНОВ²

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РАДИОЛЮМИНОГРАФИИ ДЛЯ АНАЛИЗА НАКОПЛЕНИЯ ТРИТИЯ В ЭЛЕКТРОННО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ДЕФЕКТАХ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛАХ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ.....94

Н.Е. ЕФИМОВ^{1*}, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ¹, Д.Г. БУЛГАДАРЯН¹

КАЛИБРОВКА АНАЛИЗАТОРА ПОТОКОВ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ ДЛЯ ТОКАМАКА МИФИСТ.....96

Ю.М. ГАСПАРЯН*, Д.Г. БУЛГАДАРЯН, А.И. АЛИЕВА, Н.Н. ДЕГТЯРЕНКО, Н.Е. ЕФИМОВ, В.С. ЕФИМОВ, А.В. КАЗИЕВ, С.А. КРАТ, В.В. КУЛАГИН, Е.Д. МАРЕНКОВ, Ф.С. ПОДОЛЯКО, Н.С. СЕРГЕЕВ, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ, И.А. СОРОКИН, А.А. СТЕПАНЕНКО, А.М. СТОЛБОВ, М.А. ПОПОВА, М.М. ХАРЬКОВ

МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ НАКОПЛЕНИЯ И УДАЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА ИЗ СТЕНОК ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК.....99

М.А. ПОПОВА*, М.В. ГРИШАЕВ, Д.Г. БУЛГАДАРЯН, Ю.М. ГАСПАРЯН

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ДЕЙТЕРИЯ В ВОЛЬФРАМЕ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ДЕСОРБЦИИ102

В.В. КУЛАГИН*, А.Ю. ХОМЯКОВ, Ю.М. ГАСПАРЯН, Н.Н. ДЕГТЯРЕНКО

ОЦЕНКА СООТНОШЕНИЯ ПОТОКОВ ДЕСОРБЦИИ АТОМАРНОГО И МОЛЕКУЛЯРНОГО ВОДОРОДА С ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМА105

Л.А.ВАРШАВЧИК^{1*}, Н.А.БАБИНОВ¹, З.Г.ЛЮЛЛИН¹, Е.А.СТАРОВОЙТОВ¹, С.И.КОГАКОВ¹, Е.Е.МУХИН¹

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПЫЛЕНИЯ НА ВНУТРИВАКУУМНУЮ ОПТИКУ ДИАГНОСТИКИ ДИВЕРТОРНОГО ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ИТЭР107

А.М. ДМИТРИЕВ^{1,2,4*}, А.Г. РАЗДОБАРИН¹, Л.А. СНИГИРЕВ¹, Д.И.ЕЛЕЦ^{1,4}, И.М. БУКРЕЕВ¹, А.П. ЧЕРНАКОВ^{1,2}, Е.Е. МУХИН¹, С.Ю. ТОЛСТЯКОВ¹,

И.Б. КУПРИЯНОВ³, В.Л. БУХОВЕЦ⁵, А.Е. ГОРОДЕЦКИЙ⁵, А.В.
МАРКИН⁵, Р.Х. ЗАЛАВУТДИНОВ⁵

*МАГНЕТРОННОЕ ОСАЖДЕНИЕ БЕРИЛЛИЯ И ЦИКЛИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА
ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ОКОН В ПЛАЗМЕ ВЧ РАЗРЯДА.....110*

З.Г. ЛЮЛЛИН^{1,2*}, Н.А. БАБИНОВ^{1,2}, Л.А. ВАРШАВЧИК^{1,2}, Е. Е. МУХИН¹

*AB INITIO ПОТЕНЦИАЛЫ И СЕЧЕНИЯ УПРУГОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЛЯ
МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТА ЧАСТИЦ В ГАЗЕ.....112*

Р. BITTNER^{1*}, H.R. KOSLOWSKI¹, A. LITNOVSKY^{1,2}, Ch. LINSMEIER¹

MODELING OF SURFACE SEGREGATION OF Cr IN THE WCry SMART ALLOY ...115

В.П. БУДАЕВ^{1,2*}, Ю.В.МАРТЫНЕНКО¹, М.Ю. НАГЕЛЬ¹

*ПЛАЗМЕННЫЙ УСКОРИТЕЛЬ С КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ
НА БАЗЕ ПЛАЗМЕННОЙ УСТАНОВКИ ПЛМ117*

П.В. МИНАШИН^{1*}, А.Б. КУКУШКИН^{1,2}

*СПЕКТРАЛЬНАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ, ВЫХОДЯЩЕГО НА ПЕРВУЮ СТЕНКУ В ИТЭР121*

Д.И. КАВЫРШИН^{1,3*}, В.П. БУДАЕВ^{1,2}, С.Д. ФЕДОРОВИЧ¹, А.В.
КАРПОВ^{1,2}, В.Ф. ЧИННОВ³, М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ¹, В. ЧАН КУАНГ¹,
М.К. ГУБКИН¹, Е.В. МУРАВЬЕВА¹, А.С. МЯЗИН¹, Г.Б. ВАСИЛЬЕВ¹, К.А.
РОГОЗИН¹, А.А. КОНЬКОВ¹

*ОПТИЧЕСКАЯ ЭМИССИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ОБЛАСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА С ВОЛЬФРАМОВЫМ
ОБРАЗЦОМ125*

С.Д. ФЕДОРОВИЧ^{1*}, В.П. БУДАЕВ^{1,2}, А.В. КАРПОВ^{1,2}, А.П. СЛИВА¹, А.Ю.
МАРЧЕНКОВ¹, М.В.ЛУКАШЕВСКИЙ¹, М.К. ГУБКИН¹, Д.И.
КАВЫРШИН¹, А.В. ЗАХАРЕНКОВ¹, В. ЧАН КУАНГ¹, К.А. РОГОЗИН¹,
А.А. КОНЬКОВ¹

*ДИАГНОСТИКА ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ ПЛАЗМЫ И
ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ НА ОБРАЩЕННЫЕ К ПЛАЗМЕ МАТЕРИАЛЫ В*

ЭКСПЕРИМЕНТАХ С ДУГОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ.....	130
Д.И. ЧЕРКЕЗ, Н.О. СТЕПАНОВ*, С.С. АНАНЬЕВ, А.В. СПИЦЫН	
УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С МАТЕРИАЛАМИ НА ОСНОВЕ ВЧ-ИСТОЧНИКА ГЕЛИКОННОГО ТИПА: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ	134
К.В. ЧАН ^{1*} , В.П. БУДАЕВ ^{1,2} , А.В. ДЕДОВ ¹ , С.Д. ФЕДОРОВИЧ ¹ , Д.И. КАВЫРШИН ^{1,3} , А.В. КАРПОВ ^{1,2} , Ю.В. МАРТЫНЕНКО ² , А.Т. КОМОВ ¹ , А.В. ЛУБЕНЧЕНКО ¹ , М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ ¹ , А.В. ЗАХАРЕНКОВ ¹ , М.К. ГУБКИН ¹ , Г.Б. ВАСИЛЬЕВ ¹ , К.А. РОГОЗИН ¹ , А.А. КОНЬКОВ ¹ , В.С. КВАСКОВ ¹	
СИСТЕМА ВЧ-НАГРЕВА ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В УСТАНОВКЕ ПЛМ-М	136
Ю.А. ГУРОВА ^{1*} , А.Н. СУЧКОВ ¹ , Д.М. БАЧУРИНА ¹ , Н.С. ПОПОВ ¹ , О.Н. СЕВРЮКОВ ¹ , А.М. ЛИТНОВСКИЙ ^{1,2} , Ш. ТАН ^{2,3}	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ СПЛАВА-ПРИПОЯ TiZr4Be ДЛЯ ПАЙКИ САМОПАССИВИРУЮЩИХСЯ ВОЛЬФРАМОВЫХ СПЛАВОВ СО СТАЛЬЮ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА DEMO	140
А.П. СЛИВА ¹ , В.К. ДРАГУНОВ ¹ , А.Ю. МАРЧЕНКОВ ^{1*} , В.П. БУДАЕВ ^{1,2} , Д.А. ЖГУТ ¹ , И.Е. ЖМУРКО ¹ , С.Д. ФЕДОРОВИЧ ¹ , А.В. КАРПОВ ¹	
О МЕТОДЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ С ПРИСАДОЧНОЙ ПРОВОЛОКОЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОХЛАЖДАЕМЫХ ВОЛЬФРАМОВЫХ МОДУЛЕЙ ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ОБЛИЦОВКИ ДИВЕРТОРА ТОКАМАКА- РЕАКТОРА.....	142

**МАТЕРИАЛЫ
XXV КОНФЕРЕНЦИИ**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Москва, НИЯУ МИФИ, 27-28 января 2022 г.