

XXIII КОНФЕРЕНЦИЯ

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Москва, НИЯУ МИФИ, 23-24 января 2020 г.

Сборник научных трудов

**Москва
2020**

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

**МАТЕРИАЛЫ
XXIII КОНФЕРЕНЦИИ**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Москва, НИЯУ МИФИ, 23-24 января 2020 г.

Москва
2020

ББК 22.333
УДК 533.9 (06)
В 40

Материалы XXIII конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью». Москва, 23-24 января 2020 г.
М.: НИЯУ МИФИ, 2019 г., 122 с.

Сборник содержит материалы докладов, представленных на ежегодно проводимую в НИЯУ МИФИ 23-ю конференцию по взаимодействию плазмы с поверхностью. Тематика конференции охватывает экспериментальные и теоретические исследования взаимодействия плазмы с поверхностью в установках управляемого термоядерного синтеза. Сборник сформирован по мере поступления докладов, которые опубликованы в авторской редакции при минимальной редакционной правке.

Редакционная коллегия:

В.А. Курнаев,
Ю.М. Гаспарян,
А.Б. Ляшенко

ISBN 978-5-7262-2651-4

23 конференция
«ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ»

Заседание №1

Четверг, 23 января

начало в 10.00

Аудитория Актовый зал

Председатель – профессор Беграмбеков Л.Б.

9.30 – 10.00	Регистрация участников
10.00 – 10.05	Открытие
10.05 – 10.20	<u>С.С. АНАНЬЕВ, Д.Н. ДЕМИДОВ, С.В. СУСПИН.</u> <i>Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский институт»</i> Моделирование транспорта водорода в материалах ТЯР с учетом радиационно стимулированных дефектов
10.20 – 10.35	<u>А.Г. ПОСКАКАЛОВ^{1,2}, Н.С. КЛИМОВ^{1,2}, Ю.М. ГАСПАРЯН¹, Д.В. КОВАЛЕНКО², О.В. ОГРОДНИКОВА¹, В.С. ЕФИМОВ¹</u> <i>¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</i> <i>²Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Троицк, Москва</i> Моделирование накопления дейтерия при импульсных плазменных нагрузках характерных для ИТЭР
10.35 – 10.50	<u>М.М. ЦВЕНТУХ</u> <i>Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва</i> Развитие сквозной модели взрывозмиссионного импульса на основе перехода через критическое состояние вещества
10.50 – 11.05	<u>Е.Д. ВОВЧЕНКО, Ю.М. ГАСПАРЯН, С.А. КРАТ, В.А. КУРНАЕВ, А.А. ПИСАРЕВ, Т.В. СТЕПАНОВА</u> <i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</i> LIBS анализ присутствия Li в W тайлах токамака T-10
11.05 – 11.20	<u>Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, А.С. КАПЛЕВСКИЙ, С.С. ДОВГАНЮК, Н.Н. КАСИМОВА</u> <i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</i> Захват изотопов водорода в покрытия бериллия и алюминия, напыленные в плазме
11.20- 11.35	<u>В.П. БУДАЕВ^{1,2}, С.Д. ФЕДОРОВИЧ¹, И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ³, А.В. ВЕРТКОВ³, А.В. КАРПОВ², М.К. ГУБКИН¹, ВАН ООСТ Г.^{1,4}, Ю.В. МАРТЫНЕНКО², П.Г. ФРИК¹, Е.В. СВИРИДОВ¹, Д.Н. ГЕРАСИМОВ¹, А.В. ЛУБЕНЧЕНКО¹, А.В. ЗАХАРЕНКОВ¹, А.Ю. МАРЧЕНКОВ¹, М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ¹, И.В. ВОИНКОВА¹, А.В. ЛАЗУКИН¹, А.А. КОНЬКОВ¹, К.А. РОГОЗИН¹, Г.Б. ВАСИЛЬЕВ¹, З.А. ЗАКЛЕЦКИЙ¹</u> <i>¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва</i>

	<p>²НИЦ «Курчатовский институт», Москва ³АО Красная звезда, Москва ⁴Гентский университет, Гент</p> <p>Исследование жидкометаллической литиевой капиллярно-пористой системы стационарной плазмы в установке ПЛМ</p>
11.35 – 11.55	Перерыв на кофе
11.55 – 12.10	<p><u>Д.И. ЕЛЕЦ</u>¹, А.Г. РАЗДОБАРИН¹, А.М. ДМИТРИЕВ¹, Н.А. БАБИНОВ¹, А.Н. БАЖЕНОВ¹, И.М. БУКРЕЕВ¹, И.А. ХОДУНОВ¹, А.Н. КОВАЛЬ¹, Г.С. КУРСКИЕВ¹, А.Е. ЛИТВИНОВ¹, Е.Е. МУХИН¹, Д.С. САМСОНОВ¹, В.А. СЕНИЧЕНКОВ¹, В.А. СОЛОВЕЙ¹, И.Б. ТЕРЕЩЕНКО¹, С.Ю. ТОЛСТЯКОВ¹, Л.А. ВАРШАВЧИК¹, П.В. ЧЕРНАКОВ², Ал.П. ЧЕРНАКОВ^{1,2}, Ан.П. ЧЕРНАКОВ^{1,2}, Н.С. ЖИЛЬЦОВ¹</p> <p>¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе ²Спектрал-Тех, АО, Санкт-Петербург, Россия</p> <p>Некоторые аспекты диагностики накопления изотопов водорода в первой стенке реакторов токамаков</p>
12.10 – 12.25	<p><u>З.Р. АРУТЮНЯН</u>, Ю.М. ГАСПАРЯН, В.С. ЕФИМОВ, С.А. РЯБЦЕВ, А.А. ПИСАРЕВ</p> <p><i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</i></p> <p>Удержание дейтерия в поверхностном слое вольфрама, предоблученном ионами гелия</p>
12.25 – 12.40	<p><u>Л.А. ВАРШАВЧИК</u>^{1,2}, Н.А. БАБИНОВ^{1,2}, П.А. ЗАТЫЛКИН^{1,2}, А.А. ЧИРОНОВА², А.П. ЧЕРНАКОВ², А.М. ДМИТРИЕВ¹, А.Г. РАЗДОБАРИН¹, Д.С. САМСОНОВ¹, Е.Е. МУХИН¹</p> <p>¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 119071, Санкт-Петербург ²Спектрал-Тех, АО, 194021, Санкт-Петербург</p> <p>Код KITE: моделирование распыления, транспорта и осаждения для чистки оптических элементов ИТЭР</p>
12.40 – 12.55	<p><u>Н.Е. ЕФИМОВ</u>, Д.Г. БУЛГАДАРЯН, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ, В.А. КУРНАЕВ</p> <p><i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</i></p> <p>Применение спектроскопии ионного рассеяния для анализа осаждения тонких слоев лития на вольфрам</p>
12.55 – 13.15	<p><u>Я.А. ВАСИНА</u>^{1,2}, А.С. ПРИШВИЦЫН^{1,2}, А.Н. ЩЕРБАК¹, А.С. ДЖУРИК¹, В.Б. ЛАЗАРЕВ¹, С.В. МИРНОВ^{1,2}, ОТРОЩЕНКО В.Г¹.</p> <p>¹АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Троицк, Москва ²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</p> <p>Экспериментальные испытания четырех комбинаций литиевых лимитеров на токамаке Т-11М как прототипа эмиттер-коллекторной системы стационарного токамака</p>
13.15 – 13.30	Перерыв на кофе
13.30 – 14.30	Стендовая секция

Заседание №2

Пятница, 24 января

начало в 10.00

Аудитория Актовый зал

Председатель – профессор Курнаев В.А.

10.00 – 10.05	Открытие второго дня
10.05 – 10.30	И.М. ПОЗНЯК АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Москва, РФ Об итогах ИТРА DivSOL в Южной Корее
10.30 – 10.50	В.А. КУРНАЕВ ¹ , А.В. МАРКИН ² , Ю.М. ГАСПАРЯН ¹ , <u>Е.Е. МУХИН</u> ³ , Д.Г. БУЛГАДАРЯН ¹ , Е.Д. ВОВЧЕНКО ¹ , А.Г. РАЗДОБАРИН ³ , В.С. НОРАКИДЗЕ ¹ , Д.И. ЕЛЕЦ ³ , Л.А. СНИГИРЕВ ³ + КОЛЛЕКТИВЫ МИФИ, ИФХЭ ИМ ФРУМКИНА, ФТИ ИМ ИОФФЕ ¹ НИЯУ МИФИ, Россия, 115409, Москва ² ИФХЭ им. Фрумкина, РАН, 119071, Москва ³ ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 119071, Санкт-Петербург Дистанционные методы анализа содержания изотопов водорода в материалах первой стенки токамаков
10.50 – 11.10	<u>М.Ю. ЖАРКОВ</u> ¹ , А.В. ВЕРТКОВ ¹ , И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ ^{1,2} , В.А. ВЕРШКОВ ³ , Г.Е. НОТКИН ³ , С.В. МИРНОВ ⁴ , В.Б. ЛАЗАРЕВ ⁴ , И.Л. ТАЖИБАЕВА ^{2,5} ¹ АО «Красная звезда», Москва, РФ ² НИЯУ МИФИ, Москва, РФ ³ НИЦ «Курчатовский институт», Москва, РФ ⁴ АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Москва, РФ ⁵ Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Республика Казахстан Прототипы литиевых квазистационарных внутрикамерных элементов токамака
11.10 – 11.30	<u>Л.Н.ХИМЧЕНКО</u> ¹ , В.П.БУДАЕВ ^{2,3} ¹ Частное учреждение «Проектный центр ИТЭР», Москва. ² Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва. ³ Национальный исследовательский университет «Московский Энергетический Институт», Москва. Как учет взрывной электронной эмиссии на вольфрамовых диверторных пластинах и бериллиевой стенке может повлиять на представления о балансе энергии и примесном составе в ИТЭР
11.30 – 11.50	Перерыв на кофе
11.50 – 12.15	<u>A. LITNOVSKY</u> ¹ , J. SCHMITZ ^{1,2} , F. KLEIN ¹ , K. DE LANNOYE ³ , A. KRETER ¹ , TH. MORGAN ⁴ , J.W. COENEN ¹ AND CH. LINSMEIER ¹ . ¹ Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Energie und Klimaforschung - Plasmaphysik, 52425 Jülich, Germany

	<p>²Department of Applied Physics, Ghent University, 9000 Ghent, Belgium ³Vrije Universiteit Brussel, 1050 Elsene, Belgium ⁴DIFFER Dutch Institute For Fundamental Energy Research, De Zaale 20, 5612 AJ Eindhoven, The Netherlands</p> <p>Plasma performance of smart tungsten-based alloys for a future fusion power plant</p>
12.15 – 12.35	<p>В.П. БУДАЕВ^{1,2}, С.Д. ФЕДОРОВИЧ¹, А.В. ДЕДОВ¹, Ю.В. МАРТЫНЕНКО², А.В. КАРПОВ², М.К. ГУБКИН¹, П.Г. ФРИК¹, Д.Н. ГЕРАСИМОВ¹, А.П. СЛИВА¹, Г. ВАН ООСТ^{1,3}, Е.В. СВИРИДОВ¹, А.В. ЛУБЕНЧЕНКО¹, А.Ю. МАРЧЕНКОВ¹, М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ¹, А.В. ЗАХАРЕНКОВ¹, И.В. ВОИНКОВА¹, А.В. ЛАЗУКИН¹, З.А. ЗАКЛЕЦКИЙ¹, К.А. РОГОЗИН¹, А.А. КОНЬКОВ¹, Г.Б. ВАСИЛЬЕВ¹ ¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва ²НИЦ «Курчатовский институт», Москва ³Гентский университет, Гент</p> <p>Испытание плазменными нагрузками вольфрамовых конструкционных материалов термоядерного реактора в установке ПЛМ</p>
12.35 – 12.55	<p>А.А. АЙРАПЕТОВ¹, Н.А. ПУНТАКОВ¹, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ¹, С.С. ДОВГАНЮК¹, А.В. ГРУНИН¹, А.С. КАПЛЕВСКИЙ¹, А.В. ТЕНИШЕВ¹, С.А. ГРАШИН², И.И. АРХИПОВ³ ¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» ²НИЦ «Курчатовский институт», Москва ³ИФХЭ РАН им. А.Н. Фрумкина, Москва</p> <p>Свойства графита, предназначенного для контактирующих с плазмой элементов токамака Т-15МД</p>
12.55 – 13.15	<p>А.М. ДМИТРИЕВ^{1,2}, Н.А. БАБИНОВ^{1,2}, И.М. БУКРЕЕВ¹, Л.А. ВАРШАВЧИК¹, Д.И. ЕЛЕЦ¹, П.А. ЗАТЫЛКИН¹, Е.Е. МУХИН¹, А.Г. РАЗДОБАРИН¹, Д.С. САМСОНОВ¹, Л.А. СНИГИРЕВ¹, С.Ю. ТОЛСТЯКОВ¹, Ал.П. ЧЕРНАКОВ^{1,2}, Ан.П. ЧЕРНАКОВ^{1,2}, П.В. ЧЕРНАКОВ², А.Е. ГОРОДЕЦКИЙ³, В.Л. БУХОВЕЦ³, А.В. МАРКИН³, Р.Х. ЗАЛАВУТДИНОВ³, П.А. ШИГИН⁴, И.Б. КУПРИЯНОВ⁵, В.Л. ПОДКОВЫРОВ⁶, Д.В. КОВАЛЕНКО⁶ ¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург ²ЗАО Спектрал-Тех, Санкт-Петербург ³ИФХЭ им. Фрумкина, Москва ⁴Международная Организация ИТЭР, Кадараш, Франция ⁵АО «ВНИИНМ», Москва ⁶АО «ГНЦ ТРИНИТИ», Троицк</p> <p>Статус разработки системы плазменной очистки первого зеркала в ФТИ им. А.Ф. Иоффе</p>
13.15 – 14.15	Перерыв на обед
14.15 – 14.35	<p>А. PRISHVITSYN¹, R. DEJARNAC², J. HORACEK², M. JERAB², J. ADAMEK², J. CAVALIER², V. WEINZETTL², P. VONDRACEK², A. VERTKOV³ ¹Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ» ²Institute of Plasma Physics of the Czech Academy of Sciences, Prague, Czech Republic</p>

	<p>³JSC «Red Star», Moscow, Russian Federation Свечение нейтрального и ионизованного лития вблизи поверхности литиевой мишени в токамаке COMPASS</p>
14.35 – 14.55	<p>V.KH. ALIMOV^{1,2,3}, Y. HATANO⁴, R.KH. ZALAVUTDINOV¹ ¹A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Moscow, Russia ²National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia ³National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia ⁴Hydrogen Isotope Research Center, University of Toyama, Toyama, Japan Modeling of hydrogen isotope trapping in self-damaged tungsten</p>
14.55 – 15.15	<p>Н.Н. ДЕГТЯРЕНКО, А.А. ПИСАРЕВ Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ» Влияние атомов гелия на поведение пар Френкеля при малых расстояниях разлета</p>
15.15 – 15.35	<p>С.А. КРАТ, Ю.М. ГАСПАРЯН, Я.А. ВАСИНА, А.С. ПРИШВИЦЫН, А.А. ПИСАРЕВ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» Теоретическое описание соосаждения водорода с металлами</p>
15.35 – 15.55	<p>А.Е. ГОРОДЕЦКИЙ¹, В.Л. БУХОВЕЦ¹, А.В. МАРКИН¹, В.И. ЗОЛОТАРЕВСКИЙ¹, Т.В. РЫБКИНА¹, В.Л. ВОЙТИЦКИЙ¹, Р.Х. ЗАЛАВУТДИНОВ¹, А.П. ЗАХАРОВ¹, А.М. ДМИТРИЕВ², А.Г. РАЗДОБАРИН², Е.Е.МУХИН² ¹Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва ²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург Подавление блистерообразования в Мо зеркалах после полировки алмазными составами</p>
15.55 – 16.15	<p>В.Л. БУХОВЕЦ¹, А.В. МАРКИН¹, А.Е. ГОРОДЕЦКИЙ¹, В.Л. ВОЙТИЦКИЙ¹, Р.Х. ЗАЛАВУТДИНОВ¹, Е.Е. МУХИН², А.Г. РАЗДОБАРИН² ¹Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН ²Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН Изменение светопропускания фианита при экспозиции в плазме дейтерия и гелия</p>
16.15 – 16.35	<p>А.В. ГОЛУБЕВА¹, Б.И. ХРИПУНОВ¹, Н.П. БОБЫРЬ¹, Н.Н. КОЛОБЫЛИНА¹, А.А. МЕДНИКОВ¹, В.Х. АЛИМОВ¹, В.М. ЧЕРНОВ² ¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва ²АО Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. Академика А.А. Бочвара, Москва Селективное распыление ферритно-мартенситных сталей</p>
16.35 – 16.55	<p>Дискуссия</p>
16.55	<p>Welcome together (103, корп. 33, кафедра физики плазмы, надо одеваться)</p>

Стендовая секция

1. И.С. ПИМЕНОВ, С.В. НЕУДАЧИН, А.А. БОРЩЕГОВСКИЙ

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Спонтанное падение Li-содержащей чешуйки как триггер нелокального понижения потоков тепла и частиц при ко+ко и ко+контр генерации тока ЭЦ-волнами в токамаке Т-10

2. В.П. БУДАЕВ^{1,2}, С.Д. ФЕДОРОВИЧ¹, А.В. ДЕДОВ¹, А.Т. КОМОВ¹, А.В. КАРПОВ², М.К. ГУБКИН¹, Ю.В. МАРТЫНЕНКО², П.Г. ФРИК¹, Е.В. СВИРИДОВ¹, Д.Н. ГЕРАСИМОВ¹, М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ¹, А.В. ЛУБЕНЧЕНКО¹, А.Ю. МАРЧЕНКОВ¹, А.В. ЗАХАРЕНКОВ¹, А.В. ЛАЗУКИН¹, З.А. ЗАКЛЕЦКИЙ¹, Г.Б. ВАСИЛЬЕВ¹, В. ЧАН КУАНГ¹

¹*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва*

²*НИЦ «Курчатовский институт», Москва*

Плазменная установка ПЛМ-2 для полномасштабных испытаний материалов термоядерного реактора стационарными плазменными нагрузками

3. С.Д. ФЕДОРОВИЧ¹, А.В. КАРПОВ², В.П. БУДАЕВ^{1,2}, С.А. ГРАШИН², М.К. ГУБКИН¹, А.П. СЛИВА¹, Ю.В. МАРТЫНЕНКО², А.Ю. МАРЧЕНКОВ¹, М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ¹, З.А. ЗАКЛЕЦКИЙ¹, В. ЧАН КУАНГ¹, Г.Б. ВАСИЛЬЕВ¹, К.А. РОГОЗИН¹

¹*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва*

²*НИЦ «Курчатовский институт», Москва*

Исследование компонентов защитной графитовой облицовки камеры токамака Т-15МД стационарными плазменными нагрузками в установке ПЛМ и мощными электронными пучками

4. С.Д. ФЕДОРОВИЧ¹, В.П. БУДАЕВ^{1,2}, Ю.В. МАРТЫНЕНКО², А.В. КАРПОВ², М.К. ГУБКИН¹, А.Ю. МАРЧЕНКОВ¹, Д.Н. ГЕРАСИМОВ¹, М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ¹, А.В. ЛАЗУКИН¹, З.А. ЗАКЛЕЦКИЙ¹

¹*Национальный Исследовательский Университет «МЭИ»;* ²*Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский институт»*

Рост наноструктурированной высокопористой поверхности на образцах стали при плазменной обработке в установке ПЛМ

5. Н.Н. АНДРИАНОВА¹, А.М. БОРИСОВ¹, А.В. МАКУНИН², Е.С. МАШКОВА², М.А. ОВЧИННИКОВ^{1,2}

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

²*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

Исследование процессов ионно-индуцированного наноструктурирования и гофрирования поверхности углеродного волокна

С.С. АНАНЬЕВ, Д.Н. ДЕМИДОВ, С.В. СУСЛИН

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТА ВОДОРОДА В МАТЕРИАЛАХ ТЯР С УЧЕТОМ РАДИАЦИОННО СТИМУЛИРОВАННЫХ ДЕФЕКТОВ

Единственное доступное на данный момент топливо для коммерческих термоядерных реакторов (ТЯР) состоит из дейтерия и трития, использование которых требует строгого контроля всех возможных утечек с точки зрения безопасности. В данной работе, мы проводим оценку влияния радиационно стимулированных вакансий, на накопление изотопов водорода в некоторых материалах ТЯР, а также на их утечку в теплоноситель и нейтронную защиту в условиях характерных для гибридного реактора ДЕМО-ТИН.

Облучение обращённых к плазме и конструкционных материалов термоядерными нейтронами и нейтронами высокой энергии влияет на материалы – в них образуются радиогенные гелий и водород [1], что приводит к ухудшению механических свойств материалов. Также под воздействием повреждающего нейтронного облучения, в кристаллических решётках конструкционных материалов образуются собственные точечные дефекты (СТД) и вакансионные поры, которые могут захватывать и накапливать тритий.

В качестве перспективных обращённых к плазме материалов ТЯР на сегодняшний день рассматриваются вольфрам [2, 3], бериллий [4, 5] а также углерод и коррозионно-стойкая сталь в сочетании с бронзовой подложкой [1, 2, 6]. Поэтому актуальной задачей является исследование кинетических свойств изотопов водорода и механизмов его накопления в приведённых выше металлах и сплавах.

На эффективный коэффициент диффузии изотопов водорода в металле оказывает существенное влияние его взаимодействие с разнообразными по своей физической природе ловушками, в которых он может накапливаться или задерживаться на время, определяемое энергией связи водорода с данной ловушкой [7]. В качестве ловушек могут выступать как одиночные вакансии и их комплексы, так и образующиеся вакансионные поры. Однако в рамках данной работы, мы ограничились рассмотрением моновакансий.

Эффективный коэффициент диффузии водорода в металле в поле ловушек (в качестве ловушек настоящей работе будем иметь ввиду как незаполненные вакансии, так и вакансии с несколькими атомами водорода внутри) можно записать в виде выражения [1]:

$$D_{eff}^H = D^H \left(1 + \frac{1}{\mu} \sum_{n=1}^N C_{nHv} \exp \left(\frac{E_b^n}{k_B T} \right) \right)^{-1} \quad (1)$$

В соотношении (1) D_H – коэффициент диффузии водорода в металле без учёта взаимодействия с ловушками, $\mu = (v_0 a^2)(D_v^0)$, v_0 – частота атомных колебаний в решётке, a – параметр решётки, D_v^0 – предэкспоненциальный множитель для коэффициента диффузии водорода в металле,

В соотношении (1) будут учитываться комплексы, содержащие до 4 атомов водорода в железе и в вольфраме ($N=4$), поскольку результаты анализа концентраций комплексов в железе и ванадии показали, что концентрации комплексов вакансий с большим количеством водорода пренебрежимо малы. Отметим, что это приближение оказывается верным, только при небольших концентрация водорода. В случае высоких концентраций, эффективный коэффициент диффузии будет крайне слабо зависеть от концентрации вакансий, так как в этом случае в вакансиях практически отсутствуют незанятые места.

Концентрация комплексов вакансия-водород, содержащаяся в выражении (1), зависит от концентрации свободного водорода, которая на границе с газом в стационарном случае может быть определена из закона Сивертса. В случае железа – $C_H^0 = 7.1 \exp(-0.27 / k_B T) \sqrt{P^H}$, в случае вольфрама – $C_H^0 = 28.1 \exp(-1.03 / k_B T) \sqrt{P^H}$ [8].

Исходя из равновесия процессов попадания водорода в вакансии, и его выхода из них, найдены концентрации комплексов вакансия-водород, содержащих различное количество атомов водорода, а также количество водорода, удерживаемое в вакансиях (рисунок 1). Видно, что в области низких температур, вакансии оказывают значительное влияние на удержание водорода в железе и в вольфраме.

Исходя из полученных концентраций ловушек, вычислены эффективные коэффициенты диффузии. На рисунке 2 представлены температурные зависимости отношений D_H/D_H^{eff} в Fe и W. Отметим, что изменение парциального давления P_H в диапазоне, релевантном для стенки вакуумной камеры установки ДЕМО-ТИН 0.1-100 Па не приводило к значимым изменениям отношения D_H/D_H^{eff} . Это является следствием малой заселенности вакансий в этом диапазоне давлений.

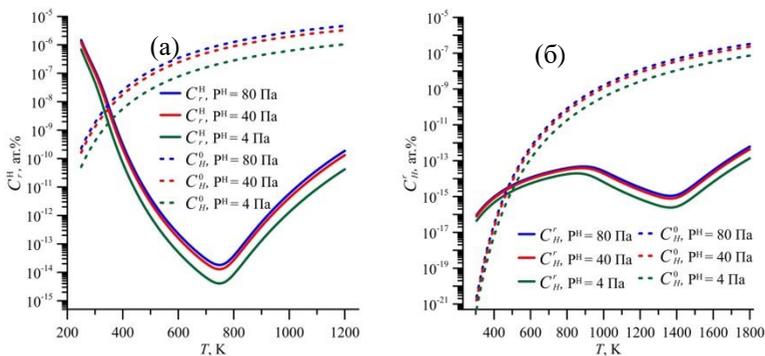


Рисунок 1. Температурные зависимости концентраций удерживаемого водорода в комплексах - сплошная линия, и в виде раствора – пунктирная линия; для Fe (а) и для W (б)

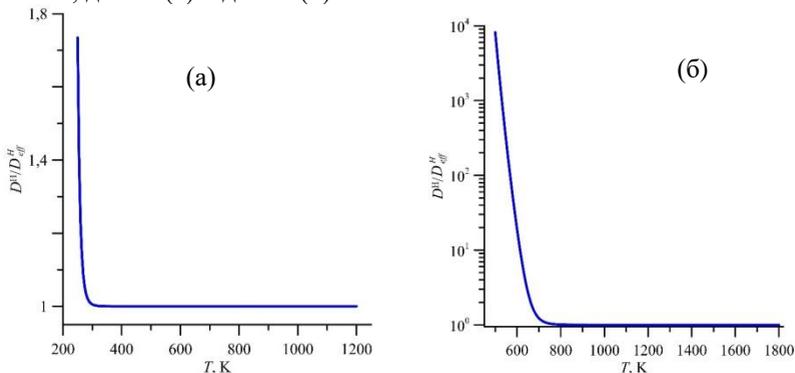


Рисунок 2. Температурные зависимости отношений D_H/D_H^{eff} для Fe (а) и для W (б)

Так же можно отметить существенное различие во влиянии ловушек на коэффициент диффузии водорода в Fe и W при низких температурах.

Так же было оценено влияние изменение коэффициента диффузии на поток водорода через металл (рисунок 3). Таким образом, при низких температурах и давлениях вакансии сильно замедляют диффузию через рассматриваемые металлы.

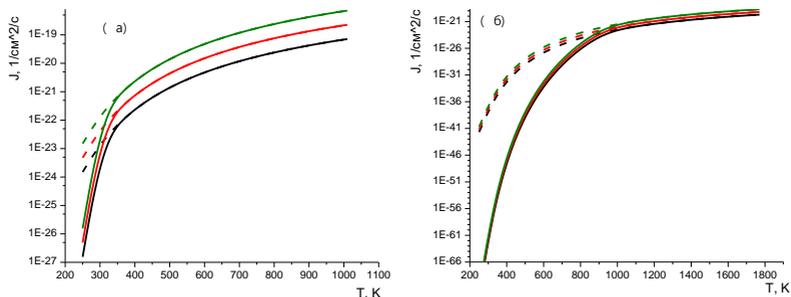


Рисунок 3. Температурная зависимость потока водорода через (а) – железо, (б) – вольфрам; для давлений 0.4 Па(черный), 4 Па (красный), 40 Па (зеленый); сплошная линия – с учетом взаимодействия водорода с вакансиями, пунктир – без учета вакансий. Толщина стенки 1 см.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (14.09.2019 №1085)

Список литературы:

[1] Khripunov V. First wall material damage induced by fusion-fission neutron environment // *Fusion Eng. Des.* 2016. Т. 109–111. С. 7–12.

[2] Heuer S. и др. Atmospheric plasma spraying of functionally graded steel/tungsten layers for the first wall of future fusion reactors // *Surf. Coatings Technol.* 2019. Т. 366. С. 170–178.

[3] Hoashi E. и др. Study on melting and solidification behaviors of tungsten loaded by high heat flux for divertor in tokamak fusion reactor // *Fusion Eng. Des.* 2018. Т. 136. № February. С. 350–356.

[4] Vladimirov P. и др. Current status of beryllium materials for fusion blanket applications // *Fusion Sci. Technol.* 2014. Т. 66. № 1. С. 28–37.

[5] Poitevin Y. и др. Tritium breeder blankets design and technologies in Europe: Development status of ITER Test Blanket Modules, test & qualification strategy and roadmap towards DEMO // *Fusion Eng. Des.* 2010. Т. 85. № 10–12. С. 2340–2347.

[6] Dias M. и др. New WC-Cu composites for the divertor in fusion reactors // *J. Nucl. Mater.* 2019. Т. 521. С. 31–37.

[7] Проницаемость водорода через металлы: учебное пособие / А.А. Писарев, И.В.

[8] O.V. Ogorodnikova // *Journal of Nuclear materials*, 290-293, (2001) pp. 459-463.

А.Г. ПОСКАКАЛОВ^{1,2}, Н.С. КЛИМОВ^{1,2}, Ю.М. ГАСПАРЯН¹, Д.В.
КОВАЛЕНКО², О.В. ОГОРОДНИКОВА¹, В.С. ЕФИМОВ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

²Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт
инновационных и термоядерных исследований, Троицк, Москва

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ДЕЙТЕРИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ НАГРУЗКАХ ХАРАКТЕРНЫХ ДЛЯ ИТЭР

В Международном термоядерном реакторе ИТЭР в качестве обращенного к плазме материала будет использоваться вольфрам (W), из которого будет изготовлено защитное покрытие диверторных пластин. Тепловые нагрузки на пластины дивертора в токамаке масштаба ИТЭР в стационарной стадии DT-разряда будут достигать ~ 10 МВт/м², приводя к повышению температуры пластин в среднем до 1400 К; в срывах и ЭЛМах импульсные кратковременные нагрузки (~ 1 мс) на диверторные пластины будут достигать величины 0,6 – 3,5 ГВт/м², что будет вызывать периодическое повышение температуры, сопоставимой с температурой плавления материала [1].

В силу кратковременности импульсных событий ранее предполагалось незначительное влияние данных процессов на общее накопление дейтерия (D) в материалах первой стенки. Однако в работах [2, 3] установлено, что данное утверждение требует детального изучения.

Ранее на установке КСПУ-Т нами исследовались закономерности захвата D в W во время облучения импульсными потоками плазмы [3]. Согласно данным термодесорбционного анализа вольфрамовых образцов, облученных водородной плазмой, установлено, что имеет место захват дейтерия в поверхностном слое вольфрама. Для образцов вольфрама, у которых происходило плавление поверхности во время облучения, количество дейтерия, выходящего с единицы поверхности в результате термодесорбции, находится на уровне $(3 - 4) \times 10^{16}$ частиц/см², и на порядок превосходит соответствующие значения, полученное для образцов, на которых следы плавления отсутствовали $\sim 1 \times 10^{15}$ частиц/см². С помощью анализа ядерных реакций (NRA) исследовано накопление D в первых 7 мкм образцов, облученных плазмой с тепловой нагрузкой ниже и выше порога плавления вольфрама. Эти данные показали, что у поверхности общее накопление находится на уровне $\sim 10^{11}$ частиц/см², что указывает на значительное накопление D в глубине W.

В настоящей работе для объяснения диффузионных процессов, происходящих во время импульсных плазменных нагрузок на поверхность W и применение их к расчетам импульса токамака ITER, было проведено моделирование с помощью расчетной программы TMAP7, которая позволяет моделировать коллективное движение частиц в твердом теле на базе решения однородного уравнения диффузии. Основные параметры модели были следующими: образец вольфрама толщиной 2 мм, теплопроводность и теплоемкость, которого меняются в зависимости от температуры согласно [4], облучается импульсом трапецевидной формы длительностью на полувысоте около 0,8 мс, потоком частиц 7.5×10^{26} D/(м²с) с энергией 5 эВ, тепловая нагрузка варьировалась от 0,4 до 1,4 МДж/м² и была ниже порога плавления вольфрама, для упрощения расчетов. Время выдержки образца при комнатной температуре после облучения и остывания составляло 10⁴ с. Для диффузии D использовалась модель Фраунфельдера. Коэффициент рекомбинации был взят по модели Пика и Зонненберга, в которой теплота растворения равнялась 1,04 эВ, а энергия активации хемосорбции варьировалась в диапазоне (0 - 1) эВ.

Реалистичная динамика температуры важна для точного моделирования диффузионных процессов. Нами была предварительно проведена калориметрия, показывающая количество теплоты, поглощённой образцом, и изменение температуры обратной стороны образца в фазе охлаждения с разрешением в 1 сек. Полученные результаты удалось внести в код и получить реалистичную динамику температуры.

Образец, облученный импульсным потоком плазмы с тепловой нагрузкой 0,7 МДж/м², был наиболее хорошо изучен, поэтому большую часть расчетного анализа мы проводили именно для этого случая. Выбор концентрации дефектов был основан на данных NRA. Проведено моделирование с использованием различной концентрацией в диапазоне 10⁻⁵ – 10⁻² ат.% и энергией ловушек 1,0 эВ и 1,5 эВ, равномерно распределенных по всей глубине образца. При использовании данного распределения наилучшее согласие с экспериментом получено в случае 1,5 эВ, что характерно для вакансий в W и при концентрации ловушек 10⁻⁵ ат.%. На рисунке 1 (слева) продемонстрированы результаты экспериментально и расчетного ТДС анализа для образца, облученного импульсным потоком D плазмы с тепловой нагрузкой 0,7 МДж/м². Экспериментальный спектр имеет два пика, что может свидетельствовать о более сложном распределении ловушек, чем мы предполагаем в нашей работе. Эта неравномерность может быть связана с рекристаллизацией поверхности во время облучения и, соответственно, с отжигом дефектов.

Свободным параметром в расчетах является коэффициент рекомбинации. При низкотемпературном облучении влияние данного параметра может быть несущественным, но при высоких температурах, согласно модели Пика и Зонненберга, эффект может быть велик. На рисунке 1 (справа) представлены экспериментальные и расчетные (для случаев энергии активации хемосорбции 0 эВ и 0,93 эВ) зависимости накопления D в W во время импульсных плазменных нагрузок. Можно увидеть гораздо лучшее согласование с экспериментом в случае, где использовался ненулевой поверхностный барьер.

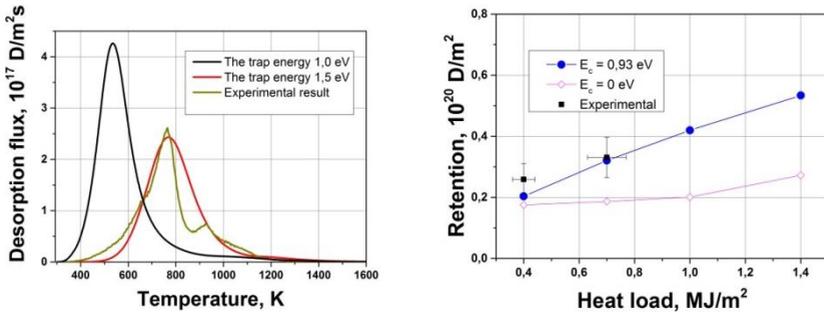


Рисунок 1. Слева - сравнение экспериментальных и расчетных данных ТДС для тепловой нагрузки $0,7 \text{ МДж}/\text{м}^2$ (энергии ловушек 1,0 эВ и 1,5 эВ). Справа - расчетное и экспериментальное накопление D в W после воздействия одним импульсом D плазмы.

Таким образом, были найдены параметры расчетов, которые удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Полученные параметры модели были применены для моделирования импульса в токамаке ИТЕР. В расчетной модели был взят W толщиной 6 мм, который облучался при следующих параметрах плазмы: тепловой поток $0,5 \times 10^7 \text{ Вт}/\text{м}^2$ и поток частиц $1 \times 10^{22} \text{ D}/\text{м}^2\text{с}$ в стационарном режиме, в импульсном режиме тепловой поток $1,8 \times 10^9 \text{ Вт}/\text{м}^2$ и поток частиц $7,5 \times 10^{26} \text{ D}/\text{м}^2\text{с}$. Охлаждение, поддерживающее обратную сторону W при температуре 393 К, было принято во внимание в данной работе. Частота импульсных событий бралась 0,1 Гц и 1 Гц. Созданные условия позволили получить температуру на поверхности 600 К во время стационарного облучения и повышение до 3600 К во время импульсных плазменных нагрузок.

Результаты моделирования накопления D в зависимости от частоты импульсных событий за 100-секундный цикл работы токамака ИТЭР представлен на рисунке 2.

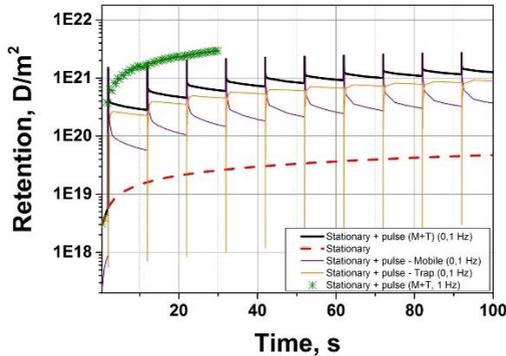


Рисунок 2. Результаты моделирование импульса токамака ИТЭР при варьировании частоты импульсных плазменных событий (0 Гц, 0,1 Гц, 1 Гц)

Наблюдается сильное влияние импульсных событий и их частоты на накопление D, которое приводит к его увеличению на полтора порядка в случае частоты ЭЛМов 0,1 Гц и еще на порядок при частоте 1 Гц.

Литература:

- [1] D.V. Kovalenko, et al. Behavior of divertor and first wall armour materials at plasma heat fluxes relevant to ITER ELMs and disruptions. // (2017) Nuclear Materials and Energy, 12, pp. 156-163.
- [2] O.V. Ogorodnikova, et. al. D and He retention in W with and without He-induced W “fuzz” after irradiation with pulsed high-temperature D-plasma. Journal of nuclear materials
- [3] А.Г. Посакалов. Изменение структуры приповерхностного слоя вольфрама и накопление дейтерия при импульсных плазменных нагрузках. "ВАНТ. Термоядерный синтез" (Том 41 Выпуск 1 2018 г.);
- [4] ITER Vacuum Handbook

М.М. ЦВЕНТУХ

Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва

РАЗВИТИЕ СКВОЗНОЙ МОДЕЛИ ВЗРЫВОЭМИССИОННОГО ИМПУЛЬСА НА ОСНОВЕ ПЕРЕХОДА ЧЕРЕЗ КРИТИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА

Развита сквозная модель взрывоэмиссионного импульса ячейки катодного пятна вакуумной дуги, позволяющая описать согласованное формирование плазмы и импульса тока [1]. Сквозная модель включает инициирование импульса за счет электрического взрыва микронной жидкометаллической струи, переход через критическое состояние вещества, и погасание через ускорение плазмы и спад плотности.

Получены временные зависимости основных параметров плазмы. Получены выражения для импульса плазмы, отнесенного к протекшему заряду, μ , составляющего десятки г см/(с Кл), омического электрического поля, j/σ , составляющего десятки кВ/см, а также полного тока, составляющего единицы А. Данные результаты подтверждают модель первичного ускорения плазмы ячеек катодного пятна градиентом давления, а также модель омической природы катодного падения потенциала.

Данная модель позволяет на основе параметров вещества в критическом состоянии проводить оценку параметров плазмы взрывоэмиссионного импульса. Было установлено, что экспериментально измеренные скорости ионов для различных материалов пропорциональны $(T_{cr}/M_i)^{1/2}$ со коэффициентом, меняющимся в диапазоне $\sim 11-13$. Это согласуется с новейшими экспериментами по горению вакуумной дуги на композиционных катодах с развитым микро и нанорельефом [2].

Также полученные величины средней плотности плазмы и дрейфовой (токовой) скорости электронов позволяют описывать динамику плотной слабозамагниченной плазмы катодного пятна в магнитном поле [3].

Полученная в рамках сквозной модели величина омического электрического поля

$$\langle E \rangle = \langle \frac{j}{\sigma} \rangle \sim \frac{\langle j \rangle}{\sigma(T_{cr})} = \frac{j_{\max}}{\sigma(T_{cr})} \sqrt{\frac{n_{pl}}{n_0}}$$

составляющая десятки кВ/см позволяет оценить характерный размер плазмы, требуемый для формирования наблюдающегося катодного падения потенциала $U_c \sim 20$ В

$$L_{pl} = \frac{U_c}{\langle E \rangle} = \frac{U_c}{\langle j / \sigma \rangle} \sim U_c \frac{\sigma(T_{cr})}{j_{max}} \sqrt{\frac{n_0}{n_{pl}}}$$

на уровне нескольких мкм, что согласуется с известными результатами моделей и экспериментов [4]. Это подтверждает омическую природу катодного падения в пятне вакуумной дуги.

Кроме того, нами установлено, что полученная величина омического электрического поля – десятки кВ/см, формирующегося в плотной взрывоэмиссионной плазме, соответствует экспериментальным значениям порогового электрического поля для горения катодного пятна вакуумной дуги на слоях нановолокон вольфрама [5].

Данные результаты позволяют получить оценку полного тока, протекающего через взрывающуюся жидкометаллическую струю, растущего при распространении взрыва от перешейка до основания струи из геометрических соображений

$$I_{tot} \sim I \frac{L_{pl}}{r_{0min}} = I \frac{U_c}{r_{0min}} \frac{\sigma(T_{cr})}{j_{max}} \sqrt{\frac{n_0}{n_{pl}}}$$

где $I \sim 1$ мА – начальный (ионный) ток, r_{0min} – минимальный радиус жидкометаллического перешейка (единицы – десятки нм), составляющего единицы А, что согласуется с известными данными по пороговым токам вакуумной дуги.

Подобная «стержневая» геометрия, полученная нами из простых оценок, согласуется с новейшими детальными исследованиями гидродинамики обрыва струй, см. [6].

Для горения дуги на поверхностях со слоями вольфрамовых волокон была найдена связь зарядового состояния и критических параметров нановолокон.

Средний заряд ионов в плазме можно определить из выражения [7]

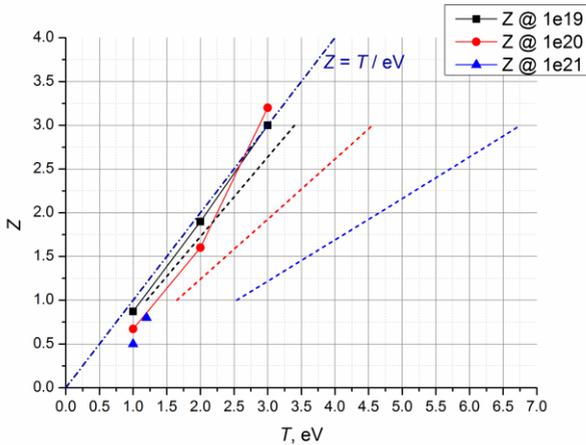
$$Z = \frac{AT^{3/2}}{n} \exp\left(-\frac{I(Z,n,T)}{T}\right)$$

где Z – средний заряд ионов, $A = 6 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3} \text{ эВ}^{-3/2}$, T – температура, n – плотность тяжелой компоненты плазмы, $I(Z,n,T)$ – средний потенциал ионизации, $I = I_0 - \Delta I$. Зависимость среднего потенциала ионизации от заряда для вольфрама может быть оценена как $I_0 \approx I_1 * Z \approx 8 \text{ эВ} * Z$. Также в области плотной неидеальной плазмы взрывоэмиссионных ячеек катодного пятна

следует учесть снижение потенциала ионизации за счет кулоновского взаимодействия, которое, с учетом слабой неидеальности, может быть представлено как $\Delta I = Ze^2/L_D$, где $L_D = (T/4\pi Z^2 e^2 n)^{1/2}$ – радиус Дебая. Таким образом, выражение для среднего потенциала ионизации примет вид

$$I(Z, n, T) = Z \left(I_1 - \frac{e^2}{L_D} \right) = I_1 Z - Z^2 e^2 \sqrt{\frac{4\pi e^2 n}{T}} = 8 \text{ eV} * Z - 1.9 \text{e-}10 \text{ eV}^{1/2} \text{ cm}^{3/2} * Z^2 \sqrt{\frac{n}{T}}$$

Характерные параметры плазмы взрывоэмиссионных ячеек – температура порядка эВ, плотность за наносекунды падает от $\sim 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ до $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Измеренные величины, находящиеся на границе применимости оптических диагностик, составляют несколько единиц на 10^{20} cm^{-3} , расчеты для сквозной модели взрыва дают среднюю плотность также на уровне 10^{20} cm^{-3} .



Средний заряд от температуры, пунктирные линии – без учета неидеальности [8]

Особенность материала поверхности из W-fuzz в том, что средняя плотность может быть существенно меньше, чем плотность вольфрама, в том числе, снижаться до уровня ~ 0.01 от твердотельной плотности. Это уникальное свойство данной поверхности, которое может существенным образом отразиться на свойствах горения взрывоэмиссионных ячеек. При этом надо отметить, что основные свойства – локализованный

нестационарный характер функционирования ячеек наблюдается и при горении на W-fuzz.

Можно получить оценку (см. рис.), связывающую средний заряд и температуру плазмы в характерном диапазоне плотностей $10^{19} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$ (до 10^{21} см^{-3} при $T = 1 \text{ eV}$ и $Z = 1$):

$$T \sim Z \text{ eV},$$

которая справедлива для диапазона T до 3 эВ и среднего заряда Z до 3 [8]. Отметим, что максимальный средний заряд ионов в вакуумной дуге, как раз достигает 3 для металлов с большим атомным номером – W.

Таким образом, экспериментальные наблюдения по изменению спектра зарядового состояния вольфрамовой плазмы в зависимости от длительности горения разряда могут быть описаны ростом соответствующей критической температуры для электрического взрыва нановолокон.

Работа поддержана РФФИ грант № 19-08-01249-а.

1. M.M. Tsventoukh 2018 *Physics of Plasmas* **25** 053504
2. Siegfried Zöhrer, Mehran Golizadeh, Nikola Koutna, David Holec, Andre Anders and Robert Franz 2019 "Erosion and cathodic arc plasma of Nb-Al cathodes: composite vs. intermetallic" *Plasma Sources Sci. Technol.* in press <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab5e32>
3. M.M. Tsventoukh, D.L. Shmelev and S.A. Barengolts 2019 *Plasma Phys. Control. Fusion* **61** 062001
4. L. Yang et al 2018 "Spatial Imaging of the Electron Density ..." *Proc. 28th ISDEIV Greifswald, Germany 23-28 September 2018* p. 321, talk B3-O-03
5. Hwangbo D., Nishijima D., Kajita S., Doerner R. P., Barengolts S. A., Tsventoukh M. M., Tanaka H. and Ohno N. 2019 *IEEE Transactions on Plasma Science* **47** 3617-3625
6. Deblais et al 2018 "Viscous Effects on Inertial Drop Formation" *Phys. Rev. Lett.* **121** 254501
7. Y. B. Zeldovich and Y. P. Rayzer, *Physics of Shock Waves and High Temperature Hydrodynamic Phenomena*. New York: Academic, 1967
8. Barengolts et al 2019 "Dynamics of the changes in the parameters of the arc plasma during the destruction of a helium-induced tungsten fuzz by arc pulses" *Nuclear Fusion* (submitted)

Е.Д. ВОВЧЕНКО, Ю.М. ГАСПАРЯН, С.А. КРАТ, В.А. КУРНАЕВ,
А.А. ПИСАРЕВ, Т.В. СТЕПАНОВА

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

LIBS АНАЛИЗ ПРИСУТСТВИЯ Li В W ТАЙЛАХ ТОКАМАКА Т-10

Рассмотрен LIBS эксперимент по определению присутствия Li в приповерхностных слоях облицовочных W тайлов кольцевого и рельсового лимитеров после завершения экспериментальной кампании на Т-10, в конце которой исследовались режимы с испарением лития. Для анализа были выбраны образцы, вырезанные из тайла рельсового лимитера и парных e- и i-тайлов кольцевого лимитера, расположенных с внутренней стороны плазменного шнура и получивших минимальные тепловые нагрузки (рис.1). Предварительно для выбранных образцов было выполнено комплексное исследование элементного состава и свойств поверхности методами ТДС, СЭМ/ЭДА, рентгеноструктурного анализа и измерения твердости [1].

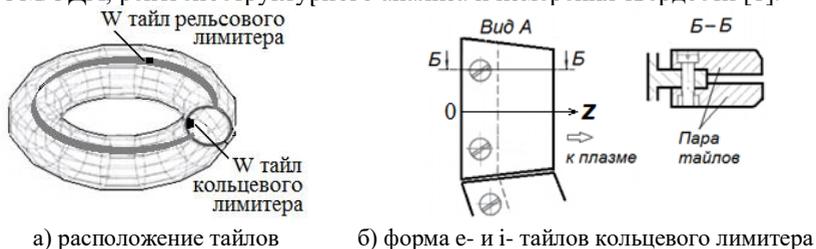
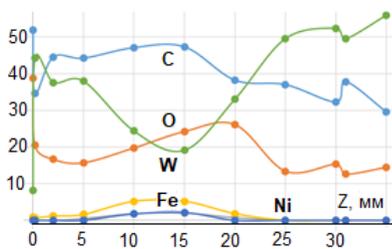
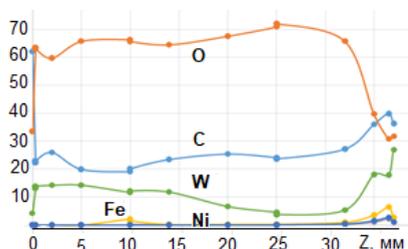


Рис. 1. W тайлы рельсового и кольцевого лимитеров на токамаке Т-10

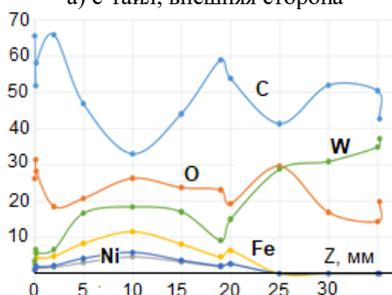
Визуальный осмотр показал, что поверхность W тайлов покрыта толстым слоем осажденной пленки с глубокими, узкими трещинами, областями оплавления и осажденными каплями. Твердость на поверхности имеет высокую степень неоднородности и изменяется от 200 до 2000 HV. Анализ СЭМ/ЭДА указывает на присутствие в осажденной пленке углерода, кислорода и небольшого количества элементов из химического состава нержавеющей стали. Рентгеноструктурный анализ тоже показал наличие соединений W_2C вблизи поверхности, а также следы WC , CO_2 , Li_2CO_3 , Li_2O . Результаты СЭМ/ЭДА анализа в виде процентного содержания элементов на поверхности e- и i- тайлов вдоль центральной линии 0Z (см. рис.1 б) показаны на рис. 2.



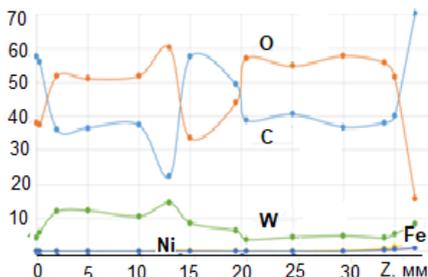
а) e-тайл, внешняя сторона



б) e-тайл со стороны зазора



в) i-тайл, внешняя сторона



г) i-тайл со стороны зазора

Рис. 2. Распределение элементов на поверхности e- и i- тайлов

К увеличению твердости по сравнению с «чистым» вольфрамом приводит упрочнение поверхности за счет образования карбида вольфрама. Уменьшение же твердости обусловлено формированием пленки из углерода и соединения Li_2CO_3 , которое, как предполагается, образуется при взаимодействии лития с воздухом. Однако присутствие Li на поверхности W пластин было установлено только по косвенным признакам, поскольку интегрированная в СЭМ система ЭДА на основе безазотного детектора IncaEnergy позволяла регистрировать элементы начиная с бора.

Для прямой идентификации Li методом LIBS использовались спектральные линии 671 и 610 нм, которые расположены достаточно далеко от ультрафиолетовой области и легко находятся на регистрируемых спектрах. В связи с этим, применяемая схема эксперимента LIBS была крайне проста. Лазерные мишени с образцами тайлов располагались в открытой камере при атмосферном давлении, а регистрация спектра осуществлялась без задержки по отношению к началу образования лазерной плазмы.

В исследованиях применена стандартная техника LIBS, доступная многим исследовательским лабораториям. Для получения лазерной плазмы использовалось лазерное излучение, сфокусированное на поверхность тестируемого образца кварцевой линзой ($f = 80$ мм) в пятно размером 0,3 мкм. При этом плотность мощности на мишени составляла 3×10^{10} Вт/см². В эксперименте применен импульсный YAG: Nd³⁺ лазер с длиной волны 1.064 мкм, работающий в режиме модулированной добротности ($E \approx 100$ мДж, $\tau \approx 10$ нс, $\theta \approx 2$ мрад). Для регистрации излучения лазерной плазмы использовался спектрометр AvaSpec-2048x14USB-2 с матричным ПЗС детектором и оптическим волокном на входе. Спектрометр подключен к компьютеру, что позволяло анализировать регистрируемые спектры в режиме онлайн. Рабочий диапазон спектрометра 200 – 800 нм. Оптическое разрешение 0,4 нм с входной щелью 10 мкм и решеткой 600 штрихов на миллиметр.

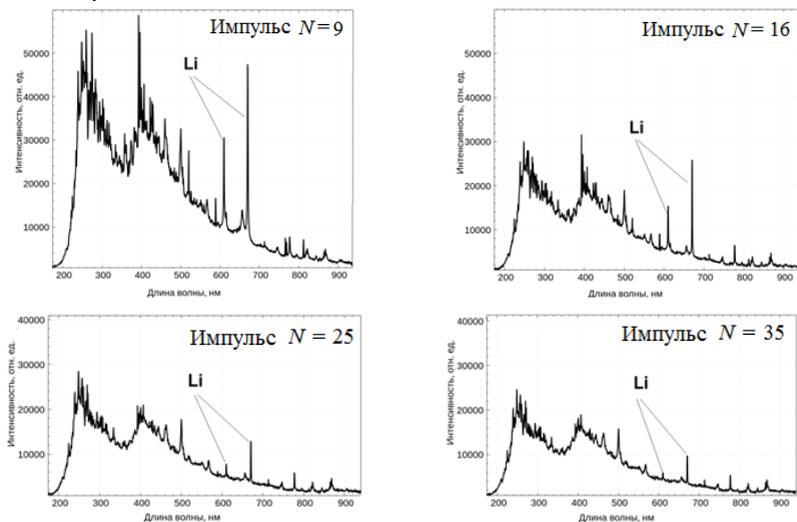


Рис. 3. LIBS спектры образца рельсового лимитера

LIBS спектры тайла рельсового лимитера и i-тайла кольцевого лимитера представлены соответственно на рис. 3 и рис. 4. Интенсивность спектральных линий лития монотонно уменьшается с ростом числа лазерных импульсов. Однако присутствие лития еще хорошо заметно после 35 импульсов для рельсового лимитера и после 6 импульсов для кольцевого лимитера, что дает оценку глубины проникновения Li в тайлы ~ 18 мкм и ~ 3

мкм соответственно. Как на внешней, так и на внутренней поверхностях *i*-тайла обнаружен Li, что подтверждает возможность присутствия Li_2CO_3 , определенное с помощью СЭМ/ЭДА.

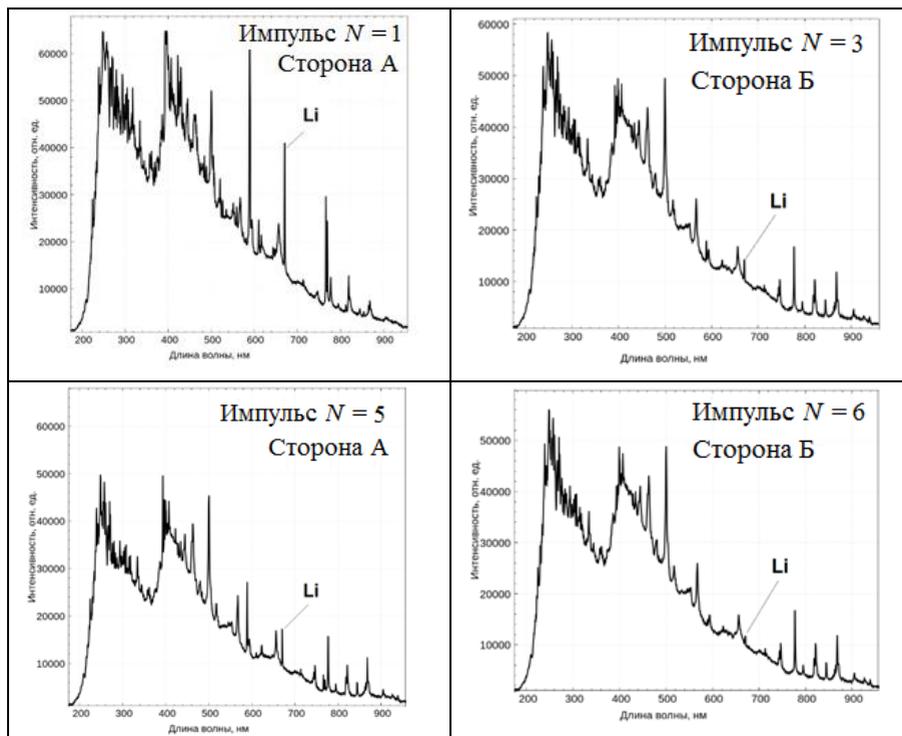


Рис. 4. LIBS спектры *i*-тайла кольцевого лимитера

Таким образом, достаточно простой LIBS-эксперименте позволяет надежно находить следы лития в образцах тайлов, даже после их длительного контакта с атмосферным воздухом.

Список литературы

[1] А.А. Писарев и др. Анализ вольфрамовых пластин лимитера токамака Т-10 после длительной компании / Труды XXII конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью». Москва, 23-24 января 2019 г. М.: НИЯУ МИФИ, 2019 г., с.104 – 107.

Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, А.С. КАПЛЕВСКИЙ, С.С. ДОВГАНЮК,
Н.Н. КАСИМОВА

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ЗАХВАТ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В ПОКРЫТИЯ БЕРИЛЛИЯ И АЛЮМИНИЯ, НАПЫЛЕННЫЕ В ПЛАЗМЕ

Первая стенка и дивертор ИТЭР изготавливаются из бериллия и вольфрама, соответственно. Осаждаясь на контактирующие с плазмой поверхности, расплывённые атомы будут формировать перенапыленные бериллиевые слои. Исследование влияния плёнок бериллия на захват и десорбцию изотопов водорода из вольфрама актуально с точки зрения безопасности, так как захват трития обращенными к плазме элементами стенки лимитирован. В работе изучается захват водорода при осаждении бериллиевых и алюминиевых слоев на вольфрам, их модификация и обезгаживание в процессе нагрева. Алюминий по своим химическим и физическим свойствам схож с бериллием [1]. Вместе с тем алюминий не токсичен, поэтому в работе изучается возможность использования алюминия в качестве замены бериллия в экспериментах по исследованию захвата водорода в бериллиевые слои. Также исследовалось влияние подложки на захват водорода в напыляемые алюминиевые слои. Для этого помимо вольфрама в качестве материала подложек использовались такие металлы как молибден и тантал.

На вольфрамовые, молибденовые и танталовые подложки в аргоновой плазме ($P = 1.5 \times 10^{-3}$ Торр, $P_{\text{ост}} = 5 \times 10^{-6}$ Торр, $T_{\text{образцов}} = 200-250$ °С) осаждались Al слои толщиной 200 нм. Методами растровой электронной микроскопии и энерго-дисперсионной спектроскопии (ЭДС) исследовались изменение структуры и состава слоёв при нагреве. Десорбция газа из образцов измерялась методом термодесорбционной спектроскопии.

Обнаружено, что во время напыления на вольфрам Be и Al слои из остаточного газа захватывают водород, соответственно, до соотношения H:Be = 0.22 и H:Al = 0.18. Водород десорбируется из вольфрама при 800-850K (рис. 1а), из алюминия при 650K (рис. 1а), а из бериллия при 900-1000K (рис. 1б). Однако из Be и Al слоев на вольфраме водород десорбируется при существенно большей температуре 1250-1400K (рис. 1в). Поэтому в условиях ИТЭР удаление трития из формируемых на поверхности дивертора Be слоев методами термического нагрева невозможно. Был сделан вывод о том, что водород находится в составе сплава вольфрама с бериллием и вольфрама с алюминием в приповерхностной области вольфрама. Данное

предположение подтверждается фазовыми диаграммами систем W-Be (рис. 2а) и W-Al (рис.2б), из которых видно, что Be и Al с вольфрамом в интервале температур 1400-1600К образуют сплавы различных составов.

Во время работы ИТЭР на поверхности вольфрамового дивертора будут осаждаться также перенасыщенные вольфрам-бериллиевые слои. Было решено исследовать захват водорода в двухкомпонентные W/Be слои на вольфраме. В нашем распоряжении не было таких образцов, однако, как было показано ранее, закономерности захвата водорода во время напыления пленок алюминия и бериллия на вольфрам и их обезгаживания схожи. Поэтому для проведения экспериментов были напылены W/Al слои на вольфрамовую подложку.

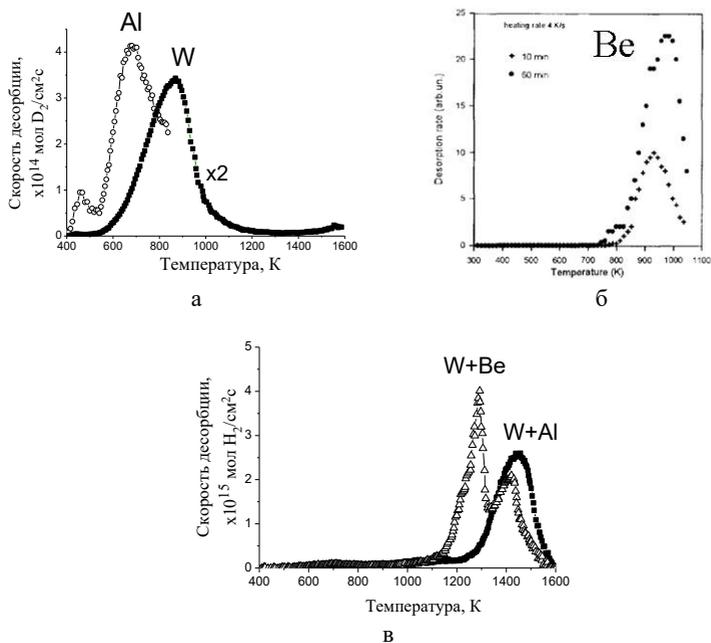


Рис. 1. ТДС спектры дейтерия из Al и W (а), Be [2] (б) и ТДС спектры водорода из вольфрама с пленками бериллия и алюминия (в).

На вольфрамовые подложки осаждали W/Al слои толщиной 200 нм следующих составов: «15 ат. % W +85 ат. % Al», «50 ат. % W +50 ат. % Al» и «85 ат. % W +15 ат. % Al». При ТДС анализе этих образцов также наблюдалась десорбция водорода при температуре 1250-1400К. Однако в

образцы пленок состава «50 ат. % W +50 ат. % Al» почти те же количества водорода вновь захватывались при охлаждении и выделялись примерно при тех же температурах при повторных циклах нагрева. Измерения методом ЭДС показали, что после нагрева до 1600К в покрытии оставался только вольфрам. Таким образом, приходится признать, что большие количества водорода, обнаруживаемые при повторных нагревах образцов, захватывались в оставшийся после удаления алюминия вольфрамовый слой при его остывании.

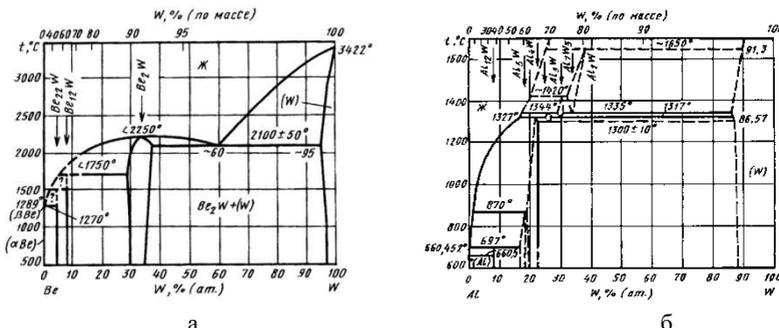


Рис. 2. Фазовые диаграммы системы W-Be (а) и W-Al (б).

Во время напыления Al слоя на молибден также происходил захват водорода из остаточного газа. Водород десорбируется из молибдена в интервале температур 400-900К (рис. 3а), а из алюминия при 650К (рис.3а). Однако из Al слоя на молибдене водород десорбируется при существенно большей температуре 1400-1450К (рис. 3).

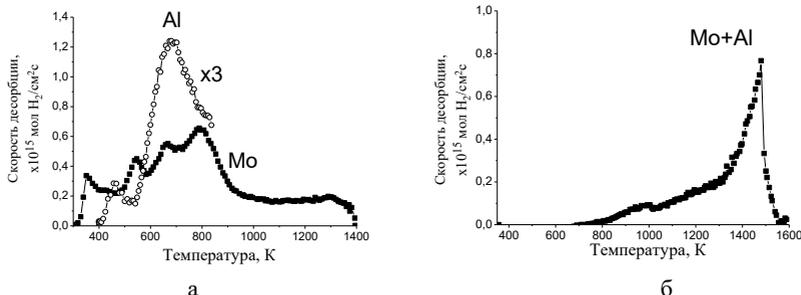


Рис. 3. ТДС спектры дейтерия из Al и водорода из W (а) и молибдена с пленкой алюминия.

Из фазовой диаграммы системы Mo-Al (рис. 4) видно, что и Mo с Al в интервале температур 1400-1600К образуют сплавы различных составов. Поэтому также был сделан вывод о том, что водород находится в составе сплава молибдена с алюминием.

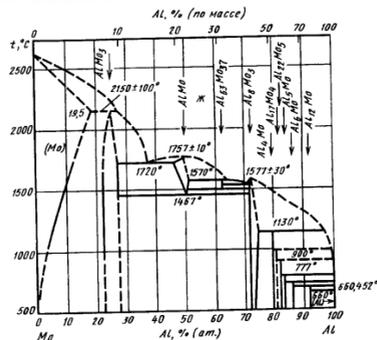


Рис. 4. Фазовая диаграмма системы Mo-Al.

Для того чтобы обобщить полученные результаты были проведены и обсуждаются результаты исследования захвата водорода при осаждении алюминиевых слоев на тантал. В работе также обсуждаются результаты исследования захвата водорода при напылении на использованные ранее подложки (W, Mo, Ta) двухкомпонентных слоев, а именно: слоев Mo/Al на молибдене, слоев Ta/Al на тантале и вольфраме образцы, слоев W/Al на тантале.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению № 05.605.21.0182 (RFMEFI60519X0182).

[1] L. Marot, C. Linsmeier, B. Eren et al. // Fus. Engineer. and Des. 2013. Vol. 88 P. 1718-1721.

[2] V.M. Sharapov et al. // Journal of Nuclear Materials. 1996. Vol. 233-237. P. 870-873.

A. PRISHVITCYN¹, R. DEJARNAC², J. HORACEK², M. JERAB²,
J. ADAMEK², J. CAVALIER², V. WEINZETTL², P. VONDRACEK²,
A. VERTKOV³

¹*NRNU MEPhI, Moscow, Russian Federation*

²*Institute of Plasma Physics of the Czech Academy of Sciences, Prague, Czech Republic*

³*JSC «Red Star», Moscow, Russian Federation*

СВЕЧЕНИЕ НЕЙТРАЛЬНОГО И ИОНИЗОВАННОГО ЛИТИЯ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ЛИТИЕВОЙ МИШЕНИ В ТОКАМАКЕ COMPASS

Для обычных твердых металлов с высоким Z (Fe, Mo, W), которые рассматриваются в качестве материалов, обращенных к плазме (PFC) для токамака ITER и токамаков следующего поколения, было показано существование предела ограничения по мощности тепловой нагрузки, которое приводит, например, к расплавлению, растрескиванию, изменению морфологии поверхности и рекристаллизации.

Возможное решение этой проблемы - использовать жидкие металлы в качестве PFC. Одним из таких материалов является капиллярно-пористая структура (CPS), в которой металлическая сетка пропитана жидким металлом, например, литием.

В ноябре-декабре 2019 года на токамаке COMPASS (Прага, Чехия) были проведены эксперименты по экспонированию жидкометаллических мишеней с Li и сплавом LiSn в диверторе. Специальный разработанный модуль CPS с радиусом пор 75 мкм был установлен в диверторе COMPASS и подвергся воздействию мощных ($q \sim 30$ МВт/м²), импульсов (200 мс) дейтериевой плазмы. Модуль находился в поле наблюдения инфракрасной камеры высокого разрешения (0,6 мм/пиксель и 4 к/с) и 8-канальной спектроскопической системы для контроля спектральных линий Li. Так же с помощью двух высокоскоростных камер (5 к/с) в видимом диапазоне отслеживались и в дальнейшем визуализировались испаренные и ионизированные металлические частицы.

В данной работе представлены первые результаты анализа данных с высокоскоростных камер для разряда #19806 в серии экспериментов с CPS мишенью, заполненной литием.

Д.И. ЕЛЕЦ¹, А.Г. РАЗДОБАРИН¹, А.М. ДМИТРИЕВ¹, Н.А. БАБИНОВ¹,
А.Н. БАЖЕНОВ¹, И.М. БУКРЕЕВ¹, И.А. ХОДУНОВ¹, А.Н. КОВАЛЬ¹,
Г.С. КУРСКИЕВ¹, А.Е. ЛИТВИНОВ¹, Е.Е. МУХИН¹, Д.С. САМСОНОВ¹,
В.А. СЕНИЧЕНКОВ¹, В.А. СОЛОВЕЙ¹, И.Б. ТЕРЕЩЕНКО¹,
С.Ю. ТОЛСТЯКОВ¹, Л.А. ВАРШАВЧИК¹, П.В. ЧЕРНАКОВ²,
Ал.П. ЧЕРНАКОВ^{1,2}, Ан.П. ЧЕРНАКОВ^{1,2}, Н.С. ЖИЛЬЦОВ¹

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе

² Спектрал-Тех, АО, Санкт-Петербург, Россия

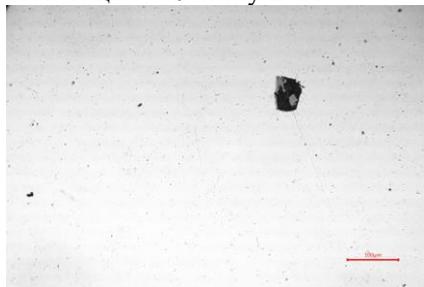
НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ДИАГНОСТИКИ НАКОПЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В ПЕРВОЙ СТЕНКЕ РЕАКТОРОВ ТОКАМАКОВ

Для строящихся и перспективных термоядерных реакторов в качестве топлива будет использоваться дейтерий и тритий. Проблема накопления изотопов водорода в конструкционных материалах реакторах хорошо известна. Особое внимание следует уделить именно радиоактивному тритию, нормы содержания которого регламентируются для безопасной работы на установках. Например, для международного термоядерного реактора ИТЕР санитарными нормами устанавливается предел содержания трития порядка 700 г с учётом погрешности диагностики его содержания 30%. Из-за высоких энергетических нагрузок процессе работы реактора неизбежно будет происходить переосаждение конструкционных материалов: бериллия, вольфрама и др. Неоднородная структура и высокая концентрация радиационных дефектов этих покрытий будет накапливать изотопы водорода. Все эти факторы влияют на формирование технических требований к системе анализа количества изотопов водорода, накопленного внутри реактора.

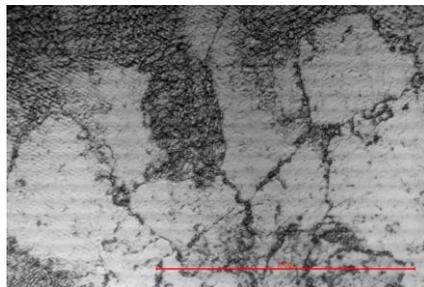
На сегодняшний день перспективным подходом к диагностике накопления изотопов водорода является метод лазерно-индуцированной абляции, совмещенной с масс-спектрометрией парциального содержания изотопов водорода в вакуумном объеме. Суть метода заключается в удалении лазером участка переосаждённой плёнки с дальнейшим анализом продуктов абляции с помощью квадрупольного масс-спектрометра или спектроскопией разряда Пеннинга. В рамках разработки данной методики необходимо оптимизировать режим абляции осажденных пленок в зависимости от их толщины и морфологии. Изменение плотности мощности прикладываемой к диагностируемому участку достигается подстройкой

фокусировки или площади лазерного пятна. Обсуждается подбор оптимального режима абляции с учётом требований к диагностике накопления трития для международного экспериментального термоядерного реактора ITER, а именно: тепловая и энергетическая нагрузка достаточная для абляции, не превышающая критической нагрузки, применимой к первой стенке токамака; время удаления плёнки меньше постоянной времени откачки вакуумной системы.

В процессе лазерной экспозиции материалов, которые применяются при строительстве термоядерных реакторов, происходит деградация поверхности. Это может приводить к образованию дефектов способствующих накоплению изотопов водорода и последующему охрупчиванию. На рисунке 1 показаны микрофотографии поверхности поликристаллического молибденового зеркала: исходной и после лазерной экспозиции $\sim 10^5$ импульсов.



а) Исходная



б) После лазерной экспозиции

Рис. 1 – Микрофотографии отражающей поверхности поликристаллического молибденового зеркала

Таким образом, необходима система обратной связи детектирующая разрушение облучаемой поверхности, для того чтобы абляция происходила только в пересаждаемых плёнках, содержащих изотопы водорода не причиняя ущерб поверхности первой стенки реактора. Одной из перспективных в этом качестве видится система регистрации рассеянного лазерного излучения. Также в работе показаны результаты по изучению накопления дейтерия в пленках, со-осажденных магнетронным методом и методом лазерной абляции.

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

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

УДЕРЖАНИЕ ДЕЙТЕРИЯ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ВОЛЬФРАМА, ПРЕДОБЛУЧЕННОМ ИОНАМИ ГЕЛИЯ

При горении термоядерной плазмы обращенные к плазме элементы (ОПМ) будут подвергаться воздействию интенсивных потоков частиц дейтерия, трития, гелия, а также нейтронов, возникающих в процессе реакции D – T синтеза. В связи с этим, одной из важных задач является минимизация накопления радиоактивного трития в ОПМ [1, 2], а также изучение влияния на накопление примеси гелия в плазме.

Благодаря своим физическим свойствам, таким как высокая температура плавления и теплопроводность, малый коэффициент физического распыления, вольфрам будет использован в качестве материала наиболее нагруженных частей дивертора в ИТЭР и рассматривается в качестве одного из приоритетных материалов для ОПМ будущих термоядерных реакторов.

В данной работе исследовались захват и газовыделение дейтерия и гелия в вольфраме при последовательном облучении соответствующими ионами. Эксперименты проводились на ионно-пучковой установке МЕДИОН с двумя независимыми ионными каналами. В качестве образцов использовались поликристаллические вольфрамовые фольги толщиной 50 мкм и чистотой 99,95% (производство Plansee, Германия), отоженные в вакууме при температуре 2000 К с выдержкой 30 минут для минимизации в них содержания дефектов. Для насыщения гелием поверхностного слоя образец вначале облучался масс-сепарированным пучком ионов He⁺ с энергией 3 кэВ дозами в диапазоне 10¹⁹-10²² He/м² при комнатной температуре. Далее образец облучался малой дозой (10¹⁹ D/м²) ионов D₃⁺ с энергией 2кэВ (0,67кэВ/D – ниже порога образования пар Френкеля в вольфраме). Аналогичное облучение использовалось в [3] для определения характеристик взаимодействия дейтерия с вакансиями. Затем проводился термодесорбционный анализ (ТДС) образца со скоростью нагрева 2 К/с спустя 120 минут после облучения ионами дейтерия. При этом облучение и ТДС проводились в одной камере без выноса образца на атмосферу при давлении в камере порядка 10⁻⁹ мбар. Максимальная температура нагрева в ходе ТДС составляла 1000 К, чтобы обеспечить полный выход дейтерия, но минимизировать изменение структуры дефектов.

На рис.1 показана зависимость удержания гелия от дозы облучения. Захват гелия в интервале доз 10¹⁹-2×10²¹ He/м² составляет 50-60% для всех

образцов, что соответствует почти полному захвату с поправкой на коэффициент отражения. После достижения дозы 2×10^{21} He/m² наблюдается насыщение накопления гелия и дальнейшего роста практически не происходит [4].

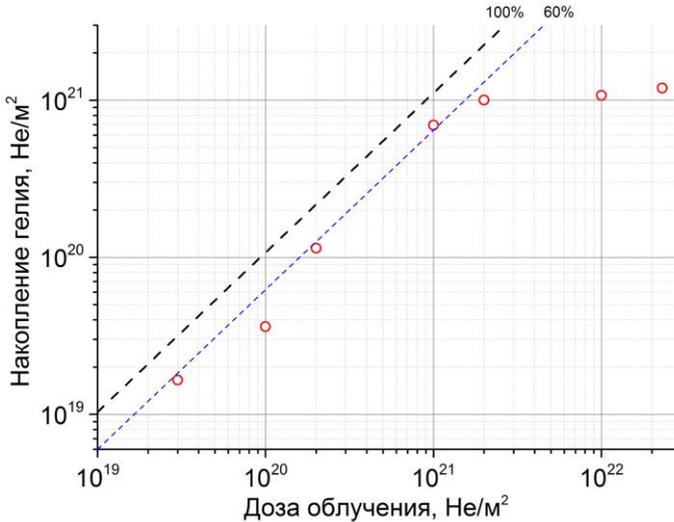


Рис. 1. Интегральное накопление гелия в рекристаллизованном вольфраме, облученном ионами гелия с энергией 3 кэВ [4]

Зависимость интегрального накопления дейтерия от дозы предварительного облучения вольфрама гелием представлена на рис.2 (образец во время серии экспериментов не менялся). В отсутствие предварительного облучения ионами гелия и, соответственно радиационных дефектов в поверхностном слое вольфрама, накопление дейтерия было на уровне (порядка 10^{16} D/m²). В дальнейшем, уже при минимальной дозе гелиевого облучения интегральное накопление дейтерия резко увеличивалось, достигая 15-20% от дозы облучения, т.е. захвату большей части внедренных ионов. Это коррелирует с высокой степенью захвата ионов гелия при этих дозах (рис.1).

При дозах выше 10^{21} He/m² интегральное накопление дейтерия начинает заметно спадать и при максимальной дозе выходило на уровень фона, т.е. удержание дейтерия практически не наблюдалось. Если сравнивать с рис.1, можно видеть насыщение в накоплении гелия при этих дозах. Интересно, что при повторном облучении дейтерием поврежденного максимальной

дозой гелия вольфрама после прогрева до 1000 К, когда часть гелия покидала образец, захват дейтерием снова наблюдался.

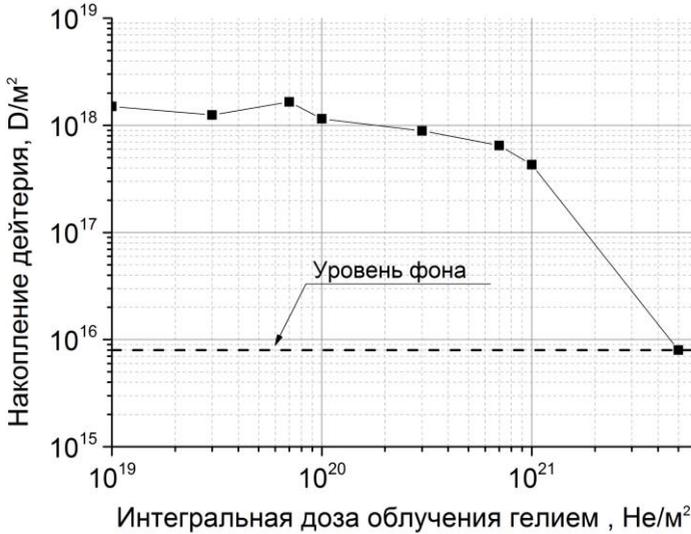


Рис.2. Зависимость интегрального захвата ионов дейтерия в вольфраме от дозы предварительного повреждения гелием.

На рис.3 представлено несколько характерных спектров термодесорбции дейтерия из вольфрама, поврежденного гелием. Все спектры из данной серии имели один пик, однако положения пика менялось. С увеличением дозы облучения гелия происходило увеличение температуры максимума термодесорбции дейтерия, от 450 К до 780 К. Таким образом, можно говорить о трансформации структуры дефектов в поверхностном слое. Ожидается, что с увеличением дозы гелия происходит рост гелий-вакансионных кластеров. Энергия связи с ними вполне может увеличиваться с увеличением их размера, что приводит к смещению пика термодесорбции.

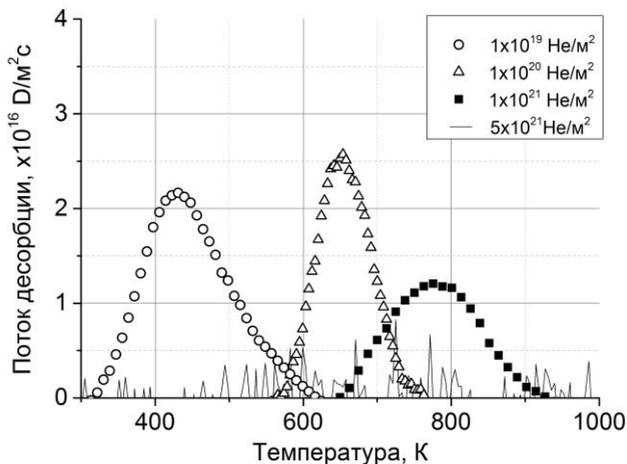


Рис.2. Спектры термодесорбции дейтерия из образца вольфрама, предварительно облученного ионами гелия с энергией 3 кэВ до доз 10^{19} - 5×10^{21} He/m²

При максимальной дозе уже ожидается образование заполненных гелием пузырьков. То, что дейтерий не может удерживаться в этих пузырьках, говорит о большом давлении и в них и отсутствии свободного места для дополнительных атомов дейтерия, а также невозможности замещения атомов гелия дейтерием в этих пузырьках.

Список литературы:

- [1] Federici G., et. al. // Nucl. Fusion, 2001, vol. 41, p. 1967.
- [2] Tobita K., et. al. // Fusion Eng. Des., 2006, vol. 81, p. 1151.
- [3] M. Zibrov, et. al. // J. Nucl. Mater. 2016. V. 477. P. 292–297.
- [4] S. Ryabtsev, et. al. // Physics of Atomic Nuclei. 2018. V.81. P. 1541-1546.

Л.А.ВАРШАВЧИК^{1,2}, Н.А.БАБИНОВ^{1,2}, П.А.ЗАТЫЛКИН^{1,2},
А.А.ЧИРОНОВА², А.П.ЧЕРНАКОВ², А.М.ДМИТРИЕВ¹, А.Г.
РАЗДОБАРИН¹, Д.С.САМСОНОВ¹, Е.Е.МУХИН¹
¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 119071, Санкт-Петербург
²Спектрал-Тех, АО, 194021, Санкт-Петербург

КОД КІТЕ: МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПЫЛЕНИЯ, ТРАНСПОРТА И ОСАЖДЕНИЯ ДЛЯ ЧИСТКИ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ИТЭР

Введение

Диагностические системы ИТЭР будут иметь существенное отличие от своих современных аналогов [1]. Для контроля, оценки и оптимизации характеристик плазмы предполагается наличие большого количества диагностик. Надежность оптических диагностик определяется длительностью работы внутривакуумных компонентов. Основным механизмом деградации оптических компонент является загрязнение продуктами эрозии первой стенки и других технических конструкций. В ИТЭРе ситуация усугубится большими потоками частиц на стенки токамака и длительностью плазменного разряда (скорость осаждения может составлять несколько нанометров за один разряд ИТЭР длительностью ~ 400 – 1000 с).

Распыленные материалы первой стенки переносятся из основного объема плазменного разряда в дивертор, где осаждение примесей на оптические элементы происходит наиболее интенсивно. Вследствие многократного отражения и перераспыления частицы примесей могут достигать труднодоступных частей диагностических каналов портов, экранированных от прямых потоков частиц из плазмы [2]. Поэтому, для обеспечения надежной работы оптических элементов диагностик диверторной области, важной задачей является разработка методов снижения скорости осаждения примесей и чистки оптических поверхностей.

В ИТЭРе для предотвращения деградации оптических компонентов диагностик предполагается периодическая чистка загрязняющих пленок [3 - 8]. В качестве основного механизма чистки рассматривается чистка ВЧ разрядом, этот метод позволяет чистить как металлические, так и диэлектрические загрязнения [9]. Одним из важных вопросов при чистке ВЧ разрядом является транспорт распыленных частиц после вылета с поверхности, так как повторное осаждение сильно влияет на эффективность и равномерность чистки.

Оптимизация параметров чистящего ВЧ разряда (частота, давление, тип газа, наличие магнитного поля) требует проведения численного

моделирования движения частиц примесей от основного объема плазмы к диагностическим портам и внутри диагностических каналов к оптическим элементам, а также транспорта примесей в процессе чистки. Попытки аналитической оценки скоростей эрозии и осаждения примесей в условиях термоядерных реакторов представлены в [10] и [11]. Однако, существенное расхождение оценок, приведенных в вышеупомянутых работах и в экспериментальных исследованиях, показало необходимость детального расчета процессов транспорта и перепыления примесных частиц на оптических элементах диагностических каналов ИТЭРа в сложной трехмерной геометрии. Для моделирования транспорта нейтральных частиц примеси в газе или слабоионизованной плазме был разработан Монте-Карло код КИТе.

Описание и задачи кода КИТе

В задаче контроля и оптимизации параметров ВЧ разряда для чистки оптических элементов диагностик можно выделить три основных части: транспорт примеси из основного объема плазмы в труднодоступные диагностические каналы, контроль эффективности чистки по спектроскопии распыленной примеси и отражению оптической поверхности. В докладе приводится описание разработанного кода КИТе и его приложение к перечисленным выше задачам.

В процессе транспорта энергия распыленных частиц изменяется в широком диапазоне значений, так что такие предельные случаи как модель холодного газа и диффузионный подход к описанию движения становятся неприменимы. КИТе включает в себя корректное описание взаимодействия нейтральных частиц с учетом теплового движения окружающего газа (или слабоионизованной плазмы) с возможностью использования произвольного потенциала взаимодействия частиц. В презентации приводится сравнение моделирования рассеяния моноэнергетического пучка частиц с использованием притягивающе-отталкивающего потенциала нейтрального взаимодействия и потенциала жестких сфер.

Высокая скорость работы кода обеспечивается за счет предварительного расчета большого количества данных и параллельных вычислений. При этом рассчитываются базы данных сечений и углов рассеяния частиц, частоты столкновений и вероятности скоростей частиц окружающего газа, участвующих в столкновениях. При моделировании движения примеси по диагностическим каналам сложной геометрии, где имеет место многочисленное отражение и распыление частиц о стенки канала, КИТе использует соответствующие многомерные базы данных взаимодействия частиц с поверхностью, рассчитанные программой TRIM.

Для моделирования системы контроля эффективности чистки оптических элементов ВЧ разрядом в КИТе введен расчет оптической эмиссии примеси в плазме. Для этого на каждом временном шаге моделирования после пересчета положения частиц производится расчет испускаемого излучения в каждом элементе пространства с соответствующими внешними данными о плазменных параметрах (электронной плотностью и температурой).

В КИТе включена возможность загрузки САД-моделей, что необходимо для работы в произвольной трехмерной геометрии. Наглядная визуализация процесса транспорта и статистических результатов облегчает последующий анализ данных. В докладе приведен пример моделирования транспорта алюминия в гелии в установке Magnum-PSI, демонстрирующий распыление материала поверхности потоком газа и многократное отражение частиц от стенок канала, что при низком давлении газа позволяет распыленным частицам проникать в удаленные и труднодоступные области.

Для моделирования транспорта частиц из основного объема плазмы в диагностические каналы необходимы данные о скоростных распределениях потоков в пристеночном слое плазмы. Распределения потоков бериллия у диверторных пластин ITER, рассчитанные помощью кода SOLPS-ITER, планируется использовать как входные данные для расчета транспорта бериллия от поверхности диверторных пластин к первому зеркалу или окну диагностики диверторного томсоновского рассеяния.

В настоящее время КИТе используется в задачах моделирования транспорта нейтральной примеси и расчета ее излучения в произвольных сложных геометриях. Однако для расчета эффективности чистки необходимы данные о падающих на очищаемые поверхности ионных потоках в ВЧ разряде. В настоящее время эти данные могут быть получены с использованием сторонних кодов для моделирования газового разряда. Однако расчет ВЧ-разряда в условиях ИТЭР (сильное магнитное поле, сложная трехмерная геометрия) имеет существенную специфику, и применение кодов, разработанных для моделирования разряда в технологических установках, ограничено. В связи с этим, производится дальнейшая разработка кода КИТе для обеспечения возможности моделирования ВЧ-разряда в условиях чистки оптических элементов ИТЭР.

Список литературы

- [1] ITER-JCT and Home Teams (presented by G Janeschitz) 1995 Plasma Phys. Control. Fusion 37 A19

- [2] S. KRAT et al. Beryllium film deposition in cavity samples in remote areas of the JET divertor during the 2011–2012 ITER-like wall campaign Nuclear Materials and Energy 12 (2017) 548–552
- [3] A. RAZDOBARIN et al., Nuclear Fusion, 2015, 55(9):093022
- [4] ВАРИШАВЧИК Л.А. и др. Плазменная чистка диагностических зеркал в международном термоядерном токамаке-реакторе ИТЭР В сборнике: Неделя науки СПбПУ материалы научной конференции с международным участием. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. 2017. С. 436-439.
- [5] DMITRIEV A.M. et al. RF plasma cleaning of water-cooled mirror equipped with notch filter based on shorted $\lambda/4$ line Fusion Engineering and Design. 2019. Т. 138.
- [6] БАБИНОВ Н.А. и др. Моделирование транспорта и пересадения распыленных частиц в чистящем ВЧЕ-разряде ИТЭР В сборнике: Взаимодействие плазмы с поверхностью Сборник научных трудов. 2019. С. 20-22.
- [7] ДМИТРИЕВ А.М. и др. Плазменная чистка диагностических зеркал с системой водяного охлаждения, выполненной на основе четвертьволнового фильтра В сборнике: Взаимодействие плазмы с поверхностью Сборник научных трудов. 2019. С. 51-54. A. MAFFINI et al., Nuclear Fusion, 2017, 57(4):046014
- [8] BROOKS, J. N., Allain, J. P. (2008). Particle deposition and optical response of ITER motional Stark effect diagnostic first mirrors. Nuclear Fusion, 48(4), 045003. doi:10.1088/0029-5515/48/4/045003
- [9] M.Z. TOKAR Assessment for erosion of and impurity deposition on first mirrors in a fusion reactor Nucl. Fusion 58 (2018) 096007
- [10] КОТОВ V. Engineering estimates of impurity fluxes on the ITER port plugs Nucl. Fusion. 56 (2016) 106027

В.П. БУДАЕВ^{1,2}, С.Д. ФЕДОРОВИЧ¹, А.В. ДЕДОВ¹, Ю.В. МАРТЫНЕНКО²,
А.В. КАРПОВ², М.К. ГУБКИН¹, П.Г. ФРИК¹, Д.Н. ГЕРАСИМОВ¹,
А.П. СЛИВА¹, Г. ВАН ООСТ^{1,3}, Е.В. СВИРИДОВ¹, А.В. ЛУБЕНЧЕНКО¹,
А.Ю. МАРЧЕНКОВ¹, М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ¹, А.В. ЗАХАРЕНКОВ¹,
И.В. ВОЙНКОВА¹, А.В. ЛАЗУКИН¹, З.А. ЗАКЛЕЦКИЙ¹, К.А. РОГОЗИН¹,
А.А. КОНЬКОВ¹, Г.Б. ВАСИЛЬЕВ¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва

³Гентский университет, Гент

ИСПЫТАНИЕ ПЛАЗМЕННЫМИ НАГРУЗКАМИ ВОЛЬФРАМОВЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА В УСТАНОВКЕ ПЛМ

Испытания вольфрама в современных токамаках и других термоядерных установках выявили значительные изменения структуры поверхности под действием мощных плазменных, пучковых и тепловых нагрузок [1]. Для сооружения ИТЭР, а также разработки российских проектов термоядерных реакторов ТИН и ДЕМО и крупномасштабного токамака, требуются полномасштабные испытания материалов дивертора и первой стенки. Необходимо обеспечить соответствующие условия плазменных и тепловых испытаний вольфрамовых конструкционных материалов и модулей облицовки будущего термоядерного реактора [1], в которых следует исследовать процессы изменения структуры поверхности, обращенной к плазме. Такие испытания проводятся на плазменной установке ПЛМ [2] - линейной плазменной ловушке с мультикасповой октупольной схемой магнитного удержания плазмы. Особенностью этой установки является стационарный режим многочасового удержания плазмы, что представляет преимущество для испытаний материалов дивертора и стенки термоядерного реактора. Параметры плазмы при испытаниях в ПЛМ соответствуют пристеночной плазме в токамаке: температура горячей фракции электронов до 50 эВ, холодной фракции электронов — от 2 эВ до 10 эВ, плотность плазмы более $2 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$, нагрузка на материальные тестовые модули стенки термоядерного реактора — более 1 МВт/м². Длительность разрядов при испытаниях достигает 200 минут и более. В установке ПЛМ проведены испытания вольфрамовых конструкционных компонентов из марки вольфрама ВМП, сертифицированного ИТЭР. Температура нагрева вольфрама достигала 1000 °С и более. На вольфрамовых пластинах после плазменных испытаний в ПЛМ наблюдается изменение структуры

поверхности — формируются стохастические высокопористые наноструктурированные слои толщиной более 1,5 микрон с размерами структурных элементов менее 50 нм. Такие слои способны обеспечить захват большого количества трития в термоядерном реакторе и изменить условия взаимодействия плазма-стенка [1].

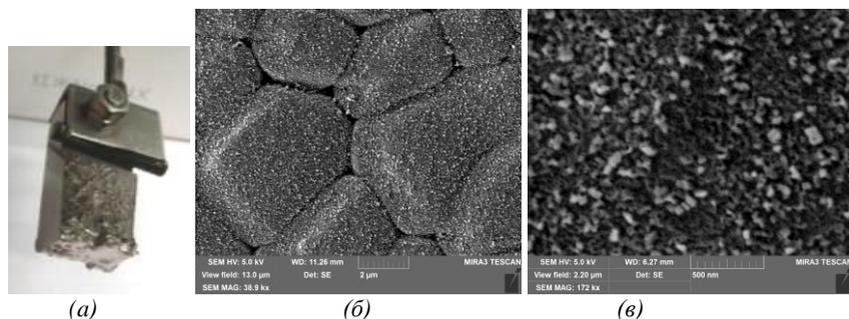


Рис. 1. (а) Вольфрамовый модуль диафрагмы токамака Т-10 после плазменного облучения в ПЛМ; (б), (в) - на поверхности сформировался наноструктурированный пух

Для сравнения роста наноструктурированной поверхности в различных плазменных условиях проведено исследование вольфрамового образца из кольцевой диафрагмы токамака Т-10 после кампании его эксплуатации под действием мощных плазменных нагрузок от $0,1 \text{ МВт/м}^2$ до 5 МВт/м^2 . Образец в токамаке подвергался значительному разрушению, сформировалась поверхность с наличием зон переплава, трещин разных размеров, зоны макро и микроэрозии с пересаживанием материала. Исследована микро и наноструктура неоднородностей такого образца. После исследований структуры такой образец из диафрагмы токамака Т-10 облучался гелиевой плазмой в установке ПЛМ дважды по технологии, применяемой для формирования наноструктурированной поверхности типа «пух» - температура поверхности образца достигала $800 \text{ }^\circ\text{C}$ и более, длительность облучения – 200 минут. Основное отличие режимов облучения в ПЛМ этого образца - величина и длительность циклических периодов отрицательного потенциала (ограничивающего поток электронов) на образце. Проведенные исследования поверхности образца после первого и второго облучения выявили, что поверхность образца сильно отличается от исходной. Интенсивный поток электронов на поверхность с циклическостью около 2 мс, по-видимому, стимулирует рост

пуха и наноразмерных частиц. Уменьшение электронного потока приводит к замедлению процесса роста пуха.

Проведено облучение водоохлаждаемого модуля из вольфрама марки ИТЭР, припаянного к медной подложке, рис. 2а. Режим плазменной нагрузки в течении 210 минут был типичный для технологии роста наноструктурного пуха в установке ПЛМ : температура образца ~ 830 °С, переменное напряжение на образце от -100 В до -30 В. На поверхности образца сформировался наноструктурированный пух, Рис.2б-г.

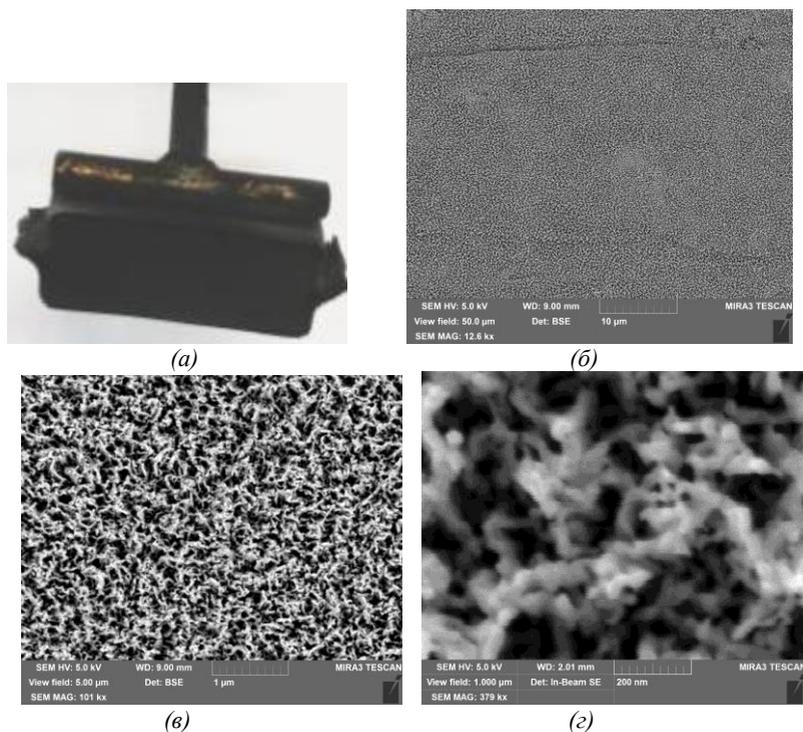
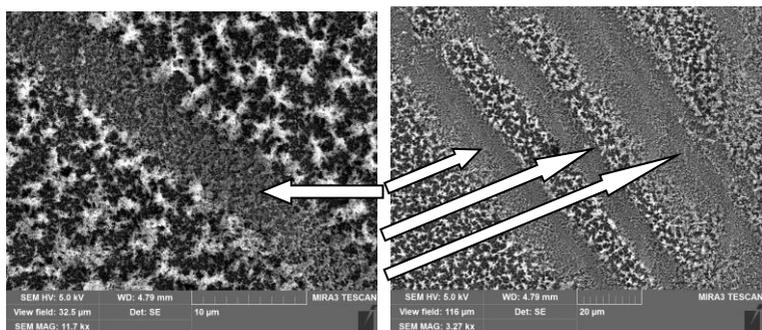


Рис.2 . Модуль вольфрамовый ИТЭР – (а) фото в видимом свете. (б)-(г) СЭМ микрофотографии наноструктурированного пуха на поверхности

Поверхность образца из вольфрамового пуха была испытана механической нагрузкой, рис. 3. Механическая нагрузка на поверхность не приводила к удалению слоя пуха; наблюдалось только сжатие этого слоя под действием

механического разрушения и соскоба. Таким образом, механическая стойкость вольфрамового слоя с пухом достаточно хорошая.



(а)

(б)

Рис. 3. СЭМ микрофотографии образца вольфрама с наноструктурированным пухом после механического испытания поверхности соскобом - полосы механического воздействия указаны стрелками

Работа на ПЛМ выполнена при поддержке гранта РФФ 17-19-01469, анализ структуры выполнен при поддержке гранта РФФИ 19-29-02020, изготовление АСНИ поддержано Мегагрантом РФ № 14.Z50.31.0042.

1. В.П. Будаев. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2015. Т. 38. № 4. С. 5.
2. В.П. Будаев и др. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2017. Т. 40. №3. 23.

М.Ю. ЖАРКОВ¹, А.В. ВЕРТКОВ¹, И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ^{1,2},
В.А. ВЕРШКОВ³, Г.Е. НОТКИН³, С.В. МИРНОВ⁴, В.Б. ЛАЗАРЕВ⁴,
И.Л. ТАЖИБАЕВА^{2,5}

¹АО «Красная звезда», Москва, РФ

²НИЯУ МИФИ, Москва, РФ

³НИЦ «Курчатовский институт», Москва, РФ

⁴АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Москва, РФ

⁵Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Республика Казахстан

ПРОТОТИПЫ ЛИТИЕВЫХ КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ ВНУТРИКАМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТОКАМАКА

Российская концепция на основе использования неподвижного или медленно протекающего лития, заключенного в капиллярно-пористую систему (КПС) [1] выглядит как наиболее перспективное и продвинутое экспериментально решение для защиты поверхности внутрикамерных элементов (ВЭ). Эта концепция интегрирует все преимущества лития с возможностью равномерного распределения его слоя на поверхности ВЭ независимо от ее ориентации в пространстве при высоком сопротивлении разбрызгиванию в магнитном поле. Отвод тепла обеспечивается за счет теплопроводности через структуру ВЭ к теплоносителю. Таким образом, способность ВЭ на основе КПС выдерживать тепловые потоки высокой удельной плотности сильно зависит от конструкции, конструкционных материалов и охлаждающей жидкости. Работоспособность варианта использования неподвижного лития в КПС в качестве ВЭ успешно подтверждена на отечественных (Т-10, Т-11М) и зарубежных (FTU, TJ-II, KTM) термоядерных установках.

Для обеспечения стационарной работы литиевых ВЭ токамака на основе КПС необходимо создание и испытание макетов и прототипов таких устройств в вариантах использования в качестве лимитера и диверторной мишени с внешними системами подпитки / смены лития и теплоотвода. Такие устройства должны быть отработаны и испытаны в стендовых условиях и на действующем токамаке Т-11М. На данный момент разрабатываются три таких устройства: квазистационарный литиевый лимитер токамака Т-11М, макет диверторной мишени токамака Т-15МД, макет литиевого дивертора токамака КТМ.

Литиевый лимитер квазистационарного типа с внешней подпиткой литием токамака Т-11М представляет собой конструкцию (рисунок 1), устанавливаемую на фланец экваториального патрубка 1 и включает в себя внутрикамерную часть 2 и систему подачи лития 3. Основным узел

устройства – приёмный элемент 4, представляет собой вертикальную трубчатую конструкцию – опорную трубу, на которую установлен пористый мат из КПС, пропитанный литием. На концах приёмного элемента имеются бак 5 и дозатор 6. В баке находится запас лития, для оперативной подпитки литием приёмного элемента в ходе разряда с помощью сил поверхностного натяжения. Дозатор предназначен для проливки приёмной поверхности литием во время технологических перерывов в работе токамака. Дозатор устанавливается на приёмную поверхность лимитера так, что образуется полость, куда поступает литий из внешних источников через питающий тракт 7, протекая сквозь КПС и собираясь в баке. Наличие отводного тракта трубки 8 даёт возможности пополнения бака напрямую от внешних источников и организации замкнутого контура проливки приёмной поверхности литием. Температурный режим обеспечивается с помощью нагревателя, устанавливаемого внутрь опорной трубы приёмного элемента. Внешняя подпитка литием обеспечивается жидкометаллической системой 3, которая подсоединяется к выводам внутрикамерной части литиевого лимитера и снабжает его контролируемым количеством лития.

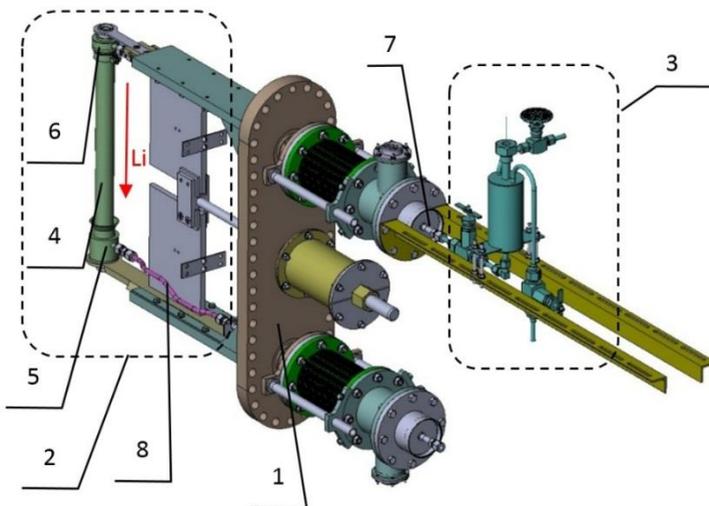


Рисунок 1 – Литиевый лимитер квазистационарного типа токамака Т-11М

Макет приемного элемента литиевого дивертора токамака Т-15МД (рисунок 2а), включающий поверхность для организации протока лития с

КПС 9, коллектор подачи лития 10, нижний бак лития (отводящий коллектор) 11, трубки подвода 12 и отведения лития 13, устанавливается на опорную раму 14. Поддержание температуры приемного элемента мишени в заданном диапазоне осуществляется с помощью электрических нагревателей, установленных с тыльной стороны макета. Контроль температуры элементов макета осуществляется с помощью термопреобразователей кабельного типа. Трубки подвода и отведения жидкого лития соединяют приемный элемент мишени с системой подачи и смены лития (рисунок 26). Основным режимом подачи и смены лития является организация замкнутого контура потока лития через КПС приемной поверхности. Циркуляция лития осуществляется с помощью электромагнитного насоса 15, заправка лития в систему осуществляется из сливного бака 16, литий подается в коллектор подачи лития 10 из напорного бака 17 через систему вентилялей 18.

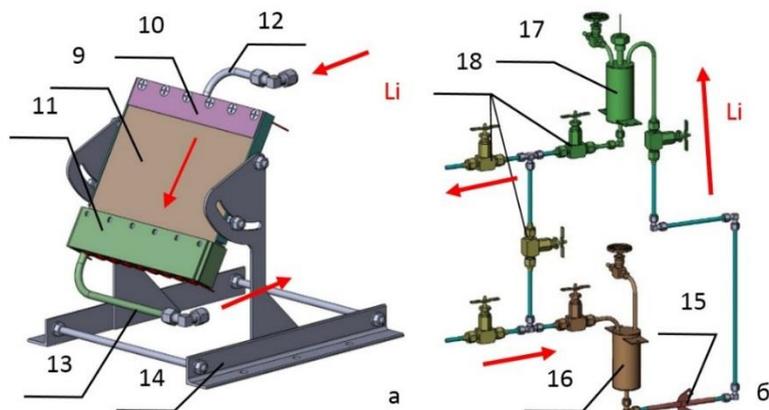


Рисунок 2 – Макет литиевого дивертора токамака Т-15МД
а – макет приёмного элемента; б – система подачи и смены лития

В качестве основного подхода к решению вопроса эффективного теплоотвода от тонкостенных энергонагруженных ВЭ рассматривается мелкодисперсный газо-водяной диспергированный поток (водяной спрей в потоке газа) [2]. Основным преимуществом такого теплоносителя является высокая эффективность теплоотвода за счёт теплоты фазового перехода вода—пар в мелкодисперсной жидкой фазе. Кроме того, такому теплоносителю не присуще возникновение кризисных явлений при теплоотдаче. Для отработки конструкции и режимов работы такой системы

охлаждения квазистационарных ВЭ разработано специальное экспериментальное устройство, моделирующее работу макета литиевого дивертора токамаков КТМ и Т-15МД. Устройство представляет собой полую цилиндрическую конструкцию (рисунок 3а), приёмную поверхность которой составляют медный толстостенный макет первой стенки 19 с припаянным к нему макетом КПС из молибденового листа 20. Канал охлаждения образует стальная проставка 21 и дно 22, приваренные к макету первой стенки. Для подачи диспергированного хладагента ко дну крепится форсунка 23. Предполагается, что устройство будет испытано на электронно-лучевой установке со сканирующим лучом, обеспечивающей тепловую нагрузку на приёмную поверхность не менее 5 МВт/м^2 . Схема испытаний представлена на рисунке 3б.

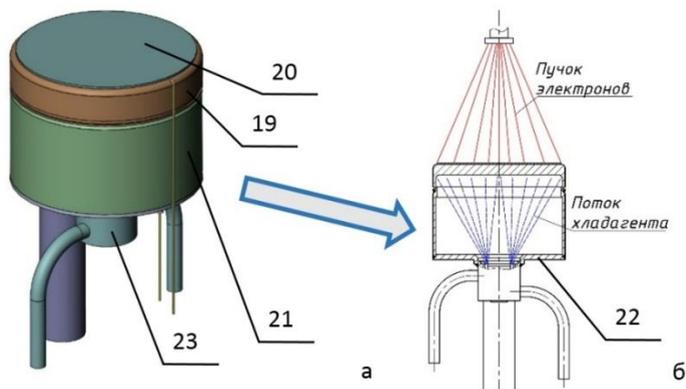


Рисунок 3 – Макет литиевого дивертора КТМ
а – 3D-модель; б – схема испытаний

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (уникальный идентификатор соглашения RFMEFI58519X0007).

Список литературы:

1. Evtikhin V.A. et al, J. of Advanced Materials, 2, No 2 (1995) p. 650-654/
2. Lyublinski I.E., Mirnov S.V., Komov A.T. et al. Innovative method of cooling and thermostabilization of tokamak elements with capillary-porous structures. — J. of Physics: Conf. Series, 2017, vol. 891(1), p. 012152.

A. LITNOVSKY¹, J. SCHMITZ^{1,2}, F. KLEIN¹, K. DE LANNOYE³,
A. KRETER¹, TH. MORGAN⁴, J.W.COENEN¹ AND CH. LINSMEIER¹

¹*Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Energie und Klimaforschung -
Plasmaphysik, 52425 Jülich, Germany*

²*Department of Applied Physics, Ghent University, 9000 Ghent, Belgium*

³*Vrije Universiteit Brussel, 1050 Elsene, Belgium*

⁴*DIFFER Dutch Institute For Fundamental Energy Research, De Zaale 20, 5612 AJ
Eindhoven, The Netherlands*

PLASMA PERFORMANCE OF SMART TUNGSTEN-BASED ALLOYS FOR A FUTURE FUSION POWER PLANT

Operation of a future fusion power plant imposes highest demands on both the robust operation and safety. The latter is of paramount importance for the feasibility of the entire power plant concept. Presently, due to a number of advantages, such as a high melting point, relatively low tritium retention, high thermal conductivity at elevated temperatures, low sputtering by fusion plasmas and a moderate activation, tungsten (W) is foreseen as the first wall plasma-facing material in a fusion power plant. However, in the course of a severe accident assuming a loss-of-coolant accident and an air ingress, tungsten reveals a crucial drawback. Current calculations for the DEMOnstration power plant (DEMO) show that during such an accident, the temperature of tungsten cladding will exceed 1000°C and remain at this level for weeks due to nuclear decay heating. At such temperatures, neutron-activated radioactive tungsten forms a volatile oxide, which can be mobilized to the atmosphere at the rate of 10-150 kg per hour.

Self-passivating, so-called “smart” alloys (SA) containing chromium and yttrium are under development to overcome this issue. During a regular plasma operation, lighter alloying elements will be preferentially sputtered by plasma particles, thus leaving almost a pure tungsten surface facing the plasma. In a course of an accident, alloying elements remaining in the bulk will create their own oxide layer protecting tungsten from oxidation and sublimation to the atmosphere.

In recent years, a sound progress has been attained in research and development of smart alloys. Bulk smart alloy samples with dimensions of up to 5 centimeter and thickness of up to 5 mm have been obtained using a mechanical alloying and field-assisted sintering technology. The oxidation resistance of modern bulk smart alloys is impressive. In the course of a continuous 10-day oxidation in wet atmosphere at 1000°C, the 10⁵ suppression of oxidation rate was detected compared to that of pure tungsten. The corresponding reduction of sublimation was 40-fold without any signs of a deterioration with time.

Plasma performance of smart alloys is crucially important for a feasibility of this concept. Sputtering resistance and fuel retention are the key parameters defining plasma performance. The dedicated experiments are being performed in linear plasma simulators PSI-2 at Forschungszentrum Jülich and Magnum-PSI at the Dutch Institute for Fundamental Energy Research. In all experiments, pure tungsten samples were exposed under the same conditions as smart alloys thus enabling a direct comparison of SA with pure tungsten. In case of PSI 2 experiments, smart alloys and tungsten samples were exposed on the same holder during the same experiment. In Magnum-PSI the smart alloys and tungsten samples were exposed one by one – thus identical exposures were performed for both materials. During all experiments, the samples were biased in order to reach an impact ion energy as expected for plasma – facing components in DEMO. Series of experiments were performed, featuring different accumulated fluence and different energy of impinging ions. It was found, that the ion energy is a crucial parameter of performance of smart alloys.

Most of experiments were performed at energies of impinging deuterium (D) ions below the sputtering threshold of tungsten. Energies of about 120 eV are expected at the first wall of DEMO during a regular plasma operation. A formation of W-rich layer was detected on the top of the remaining smart alloy. The volumetric loss of SA and pure W was the same. The mass loss of sputtered pure W was higher due to higher density. Both SA and pure W was exposed up to the fluence of 2×10^{27} ions/m² in these experiments. Such a fluence corresponded to about 20 days of continuous DEMO operation.

The situation changes significantly if the energy of impinging ions is around or above the sputtering threshold of pure tungsten. Exposures were made at ion energies of 220 eV, which corresponds to envisaged limiter phase of DEMO discharge. Here, SA was massively sputtered revealing a 2-fold volumetric loss of about 850 nm as compared to 450 nm of pure tungsten after exposure to deuterium fluence of up to 1.8×10^{25} ion/m².

Finally, an operation in seeded plasmas likely represents an issue for both envisaged plasma-facing materials. Series of exposures in argon (Ar)-seeded plasmas, argon-helium (He) seeded plasmas were performed in PSI 2. The concentrations of seeded impurities in plasma were 1% in case of pure argon seeding and 1% Ar + 5% He in case of helium-argon seeding. Energy of impinging ions was 120 eV. In all seeding experiments both materials demonstrated a homogenous sputtering primarily by seeding ions. No protection action of tungsten was expected and measured. At the same time, during exposure to Ar-seeded plasmas, the measured surface recession both for W and SA were about 7-fold higher than that measured for regular plasma operation with ion

energy of 120 eV – thus potentially imposing a danger for a lifetime of plasma-facing components of the first wall of DEMO.

In the course of plasma operation, plasma-facing components in DEMO are expected to operate at high temperature around 650°C. Deuterium retention was measured on most of exposed samples. In all described experiments, the sample temperature was kept in the range 600°C-680°C, addressing the conditions expected in DEMO. Likely due to such a high temperature, the deuterium retention is at the level of around 10^{18} D/m², which is at the detection limit of a measuring equipment.

A summary of the results will be presented along with analysis of the performance of smart alloys in a fusion power plant. Whereas no significant issues are expected for SA during the regular plasma operation, the performance during a limiter phase if any, and plasma seeding will likely represent a problem for plasma-facing first wall materials in DEMO. Here, better knowledge on edge plasma parameters expected in DEMO and on expected operation scenarios is of crucial importance.

Д.Н.ХИМЧЕНКО¹, В.П.БУДАЕВ^{2,3}

¹ Частное учреждение "Проектный центр ИТЭР", Москва.

² Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва.

³ Национальный исследовательский университет "Московский Энергетический Институт", Москва.

КАК УЧЕТ ВЗРЫВНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ НА ВОЛЬФРАМОВЫХ ДИВЕРТОРНЫХ ПЛАСТИНАХ И БЕРИЛЛИЕВОЙ СТЕНКЕ МОЖЕТ ПОВЛИЯТЬ НА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О БАЛАНСЕ ЭНЕРГИИ И ПРИМЕСНОМ СОСТАВЕ В ИТЭР.

Перегрев материалов, контактирующих с плазмой, является фундаментальной проблемой термоядерного реактора. Особенно опасны локальные проявления такого перегрева. Одними из таких эффектов являются т.н. «hot-spot», природа которых до конца непонятна. В эру графитовых лимитеров, это явление обозначалось как «Carbon bloom» [1]. В такой области, с размерами в несколько сантиметров, происходит подъем температуры до точки испарения материала, с выбросом в плазму большого количества примесей, приводящих к срыву плазмы. Для борьбы с проявлением "hot-spot" некоторые энергонапряженные токамаки (JET) создают системы обратной связи, гасящие плазменный разряд.

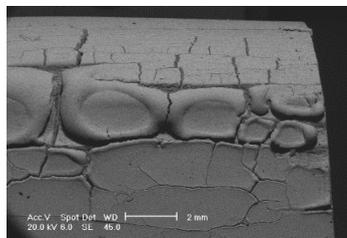
При моделировании баланса энергии и частиц в ИТЭРе, используется предположение об амбиполярности переноса плазмы на диверторные пластины и первую стенку [2]. Вместе с тем, использование этого предположения для оценок тепловой нагрузки на поверхность не всегда обосновано, а рассчитанный поток тепла на диверторные пластины может быть занижен. Неамбиполярность потока частиц в токамаках возникает при больших радиальных электрических полях в SOL, в режимах с выходом ускоренных электронов в SOL и далее на пластины нейтрализации, при термоэмиссии электронов, а также при возникновении дуг. Как показывают эксперименты [3], дугообразование [4] может кардинально изменять условия стока тепла в токамаке.

На токамаке Т-10 было обнаружено явление перегрева внутренней части кругового лимитера, изготовленного из пластин вольфрама марки ВМП-ИТЭР [5]. Во время дополнительного СВЧ нагрева плазменного шнура, вольфрамовые пластины нагревались до температуры плавления. Временная зависимость ИК излучения с поверхности тайлов показывала сначала медленный рост, а затем резкий подъем интенсивности теплового излучения.

Это может указывать на относительно медленный прогрев поверхности до определенной температуры, а затем быстрый разогрев, с момента возникновения дуг. Оценки потока энергии на край вольфрамовых пластин различными методами давали величину более 40 МВт/м^2 . На поверхности наблюдались трещины и кратеры различных размеров, наблюдались зоны с рекристаллизованной структурой. Ширина и глубина трещин доходили до 200 мкм и 500 мкм соответственно (рис.1). Анализ кратеров показал, что их можно разделить на два типа - глубокие, цилиндрического типа – с размерами от 10 до 100 мкм, от мощных дуг (рис.2) и блюдцеобразные кратеры с размерами 0.5–20 мкм, при искрообразовании (рис.3). Торцевые края вольфрамовых пластин были оплавлены, на поверхности вольфрама зарегистрированы зоны с каплями металла, отвердевшими при движении (рис.1а).

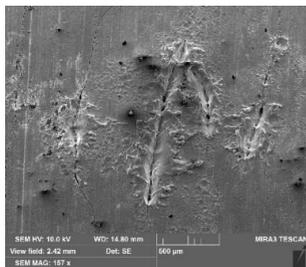


(a)

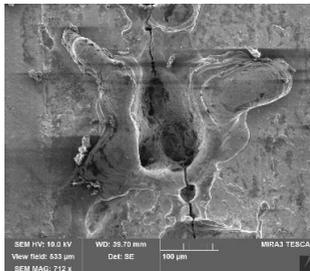


(б)

Рис.1. Пластины вольфрама ИТЭРовского типа после взаимодействия с плазмой токамака Т-10 – оптическое (а) и SEM (б) изображение.

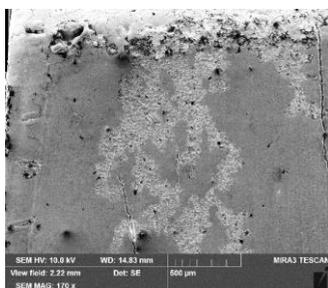


(a)

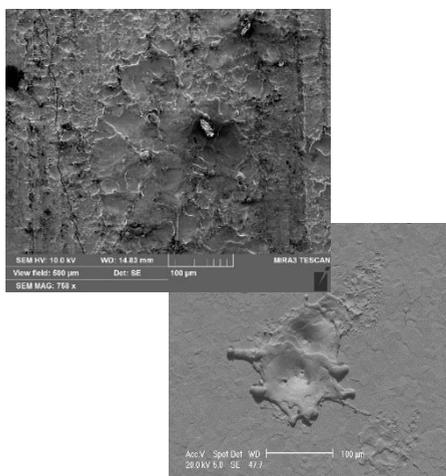


(б)

Рис.2. Мощное дугообразование на трещинах (а) и глубокий дуговой кратер (б) на ионной стороне тайла.



(a)



(б)

Рис.3. Искрообразование на электронной стороне вольфрамового лимитера (а) и блюдцеподобные искровые кратеры (б) на рекристаллизованном вольфраме.

В докладе обсуждаются процессы в приповерхностном плазменном слое (sheath), которые приводят к перегреву поверхности вольфрама, в частности, при дугообразовании и искрообразовании. Обосновывается вывод, что основным механизмом, ответственным за перегрев тайлов, является взрывная электронная эмиссия во время искрообразования [6]. Такой механизм (т.н. «эктонный механизм») может значительно увеличить электронную эмиссию, по сравнению с стандартной термоэмиссией, и привести к перегреву поверхности и ее плавлению. Множественные события искрообразования приводят к плотному потоку («дождю») расплавленных микрокапель металла с поверхности вольфрама в объем и образованию на поверхности тонкого слоя расплава. На такой поверхности возникают условия для генерации дуг и искр. При генерации эмиссионного электронного тока J расплавленный металл движется под действием лоренцевской силы $\sim J \times B$ в магнитном поле B . Основной причиной искрообразования могут быть турбулентные электрические поля в плазме над поверхностью и градиентные профили потенциала над неоднородной поверхностью.

Механизм взрывной электронной эмиссии может быть причиной подвода энергии и прогрева лимитера на большую глубину внутри SOL, по сравнению с λ_q . Плавление ($T_{\text{melt}} = 3695 \text{ K}$), и последующая рекристаллизация вольфрама, приводит к образованию трещин в этом слое, которые могут быть причиной дальнейшего углубления трещин. Такой механизм переноса энергии и нагрева металлических поверхностей особенно опасен для краев вольфрамовых и бериллиевых плиток облицовки ИТЭР (т.н. проблема “leading edge”), где параллельный поток тепла достигает очень большой величины (в диверторе ИТЭР – до 200 MWt/m^2). Эктонный механизм образования микрокапель может привести к усилению потока бериллия в SOL и центральную плазму. Также, увеличенный поток вольфрама в плазму дивертора может привести к экранировке диверторных пластин от потока тепла или, наоборот, к дополнительному разогреву возвращающимися на пластины многозарядными ионами вольфрама. Эмиссионный ток, распределенный по поверхности расплавленного металла приведет к возникновению силы $F = J \times B$, перемещающей расплав в определенном направлении. Поэтому важно изучить этот механизм экспериментально и смоделировать результаты неамбиполярного течения плазмы в расчетах выноса энергии в ИТЭР.

Работы по анализу экспериментальных данных выполнены при поддержке гранта РФФИ № 17-19-01469

- [1] M. Ulrickson, “A review of carbon blooms on JET and TFTR”, JNM, v.176–177, 03.12.1990, Pages 44-50
- [2] A.S. Kukushkin, H.D. Pacher, G.W. Pacher, G. Janeschitz, D. Coster, A. Loarte and D. Reit, “Scaling laws for edge plasma parameters in ITER from two-dimensional edge modelling” Nuclear Fusion, 2003, v.43, No.8
- [3] L. Khimchenko, V. Budaev. “The Impact of Nonambipolar Energy Flow on Plasma Facing Materials Erosion and Forecast for ITER”, IAEA Third Technical Meeting on Divertor Concepts, 4-7 November 2019, Vienna, Austria
- [4] A.V. Nedospasov— Soviet Physics Uspekhi, 1987, vol. 30(7), p. 620—627.
- [5] В.П. Будаев, Л.Н. Химченко, С.А. Грашин, А.В.Карпов. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2019, т.42, № 1, с.51
- [6] М.М. Tsventoukh “Plasma parameters of the cathode spot explosive electron emission cell obtained from the model of liquid-metal jet tearing and electrical explosion”, Physics of plasmas, 25, 053504 (2018)

В.П. БУДАЕВ^{1,2}, С.Д. ФЕДОРОВИЧ¹, А.В. ДЕДОВ¹, А.Т. КОМОВ¹,
А.В. КАРПОВ², М.К. ГУБКИН¹, Ю.В. МАРТЫНЕНКО², П.Г. ФРИК¹,
Е.В. СВИРИДОВ¹, Д.Н. ГЕРАСИМОВ¹, М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ¹, А.В.
ЛУБЕНЧЕНКО¹, А.Ю. МАРЧЕНКОВ¹, А.В. ЗАХАРЕНКОВ¹, А.В.
ЛАЗУКИН¹, З.А. ЗАКЛЕЦКИЙ¹, Г.Б. ВАСИЛЬЕВ¹, В. ЧАН КУАНГ¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва

ПЛАЗМЕННАЯ УСТАНОВКА ПЛМ-2 ДЛЯ ПОЛНОМАСШТАБНЫХ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА СТАЦИОНАРНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ НАГРУЗКАМИ

Для проектирования и строительства термоядерных реакторов, включая ИТЭР, термоядерный источник нейтронов ТИН и термоядерный реактор ДЕМО, требуются испытания материалов, макетов и прототипов первой стенки и дивертора [1,2]. Пристеночная и диверторная плазма в термоядерном реакторе будет характеризоваться высокой плотностью ($\geq 10^{20}$ м⁻³) и низкой электронной температурой ($T_e \leq 5$ эВ), приводящей к высокой тепловой нагрузке (≥ 15 МВт • м⁻²) и потокам частиц (до 10^{24} м⁻²с⁻¹ или $1,5 \times 10^5$ А • м⁻²) [1,2,3]. Предполагая ускорение ионов в приповерхностном плазменном слое, приходящие на материальную поверхность ионы будут иметь энергию ниже 50 эВ. При ЭЛМах нагрузки в несколько ГВт • м⁻² в течение 0,5-2 мс могут привести к эрозии, плавлению и испарению материалов обращенных к плазме. Доступные технологии для испытаний с помощью пучковых нагрузок недостаточны для этих целей, несмотря на то, что они обеспечивают мощный общий тепловой поток на материалы. Чрезвычайно важно обеспечить адекватные условия плазменной нагрузки на материалы при испытании материалов термоядерного реактора. Современные линейные плазменные устройства, такие как MAGNUM-PSI [4], PISCES [5], NAGDIS [6], используются для изучения взаимодействия плазмы с поверхностью. Достижимая плотность потока в этих устройствах в настоящее время составляет менее 5-10 Вт/м² в стационарном режиме, это в 2-3 раза ниже, чем ожидается в диверторе ИТЭР и будущем термоядерном реакторе, таком как ТИН. Создание плазменной установки ПЛМ-2 в НИУ «МЭИ» восполняет этот пробел, чтобы обеспечить испытания термоядерного материала в интересах российской программы УТС.

ПЛМ-2, не имеющая аналогов в России, создается на базе плазменной установки ПЛМ [7,8], рис.1, для испытания материалов термоядерного реактора и изучения взаимодействия плазмы с поверхностью в режиме,

который достигается, когда длина свободного пробега частиц, высвобождаемых с поверхности, путем отражения, термоэмиссии или эрозии, составляет меньше, чем размер плазмы, так что они захватываются в области взаимодействия плазмы с поверхностью. Длина свободного пробега ионизации сильно зависит от плотности плазмы перед поверхностью и составляет 0,5-4 мм для плотности плазмы $(1-4) \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Это меньше ширины плазменного пучка, которая составляет более 35 мм в ПЛМ-2. Следовательно, каждая частица, исходящая из тестовой мишени, будет испытывать в среднем более чем 10-кратный цикл событий эрозии / пересадки, прежде чем она сможет покинуть плазменный разряд. Поток частиц к поверхности настолько велик, что каждый поверхностный атом взаимодействует с приходящими из плазмы частицами на временах менее времени локальной релаксации поверхности, в результате чего поверхность переходит в неравновесное состояние. Низкоэнергичные ионы ($\leq 10 \text{ эВ}$), имеющие кинетическую энергию в диапазоне энергий межатомной связи, могут эффективно передавать свою энергию на поверхность, что является моделированием состояния в термоядерном реакторе. Установка ПЛМ-2 предназначена для генерации плазмы с параметрами, аналогичными ожидаемым в диверторе ИТЭР, термоядерных реакторах ТИН, ДЕМО и крупномасштабном токамаке. Основные критерии проектирования ПЛМ-2:

- плазма с диверторными параметрами, то есть плазма с высокой плотностью и низкой температурой. Плазмообразующий газ - водород / дейтерий и гелий при давлении около нескольких Па;

- давление нейтрального газа вокруг испытываемых модулей определяется рециклингом у поверхности;

- магнитная система с использованием обычных медных катушек и постоянных магнитов. На следующем этапе модернизации будет использован сверхпроводящий магнит с полем более 1-2 Тл;

- геометрия испытания модулей облицовки первой стенки и дивертора позволяет устанавливать их под небольшим углом относительно магнитного поля (2-3 градуса).

Проектные параметры установки ПЛМ-2:

продольное магнитное поле - 0,25 Тл, (до 2 Тл со сверхпроводящей секцией);

диаметр плазменного пучка - 3,5 / 10 см;

длительность плазменного разряда - стационарная, до 500 минут и более;

электронная плотность плазмы - до 10^{20} м^{-3} ;

энергия ионов в потоке к поверхности мишени 1-300 эВ;

поток ионов на мишень $\sim 10^{23} - 10^{25} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$;

стационарная тепловая нагрузка на материал - более 15 МВт м^{-2} ;
охлаждение стенок и тестовых модулей - стационарное, водное, двухфазное парогазовое, жидкометаллическое охлаждение;

ИЦР нагрев плазмы $0,5\text{-}27 \text{ МГц}$, использование геликоновых антенн;
лазерный модуль с мощными тепловыми нагрузками на материалы - до 2 ГВт / м^2 с частотой до 10 Гц (аналогичными нагрузкам при ЭЛМах и срывах) ;

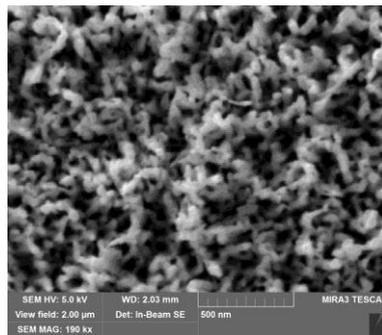
«детач» режим, аналог закрытого диверторного режима токамака;
жидкометаллические компоненты / КПС из лития, олова, литий-оловянного сплава;

технология контроля плазмы и турбулентного нагрева плазмы электродами под напряжением;

испытание материалов: вольфрам, молибден, стали, графит, литий, олово, тантал, никель, титан, иридий, платина, железо, медь, композитные сплавы.



(а)



(б)

Рис. 1. (а)-Установка ПЛМ, (б)-наноструктурная поверхность на вольфрамовом модуле дивертора ИТЭР после облучения в гелиевой плазме ПЛМ

Источник плазмы основан на катод, разработанном и в настоящее время эксплуатируемом в ПЛМ [6,7]. Планируется изготовление ВЧ генератора плазмы с использованием геликоновых антенн. Для диагностики плазмы и материала стенок во время и после облучения будет использован комплекс диагностики установки ПЛМ.

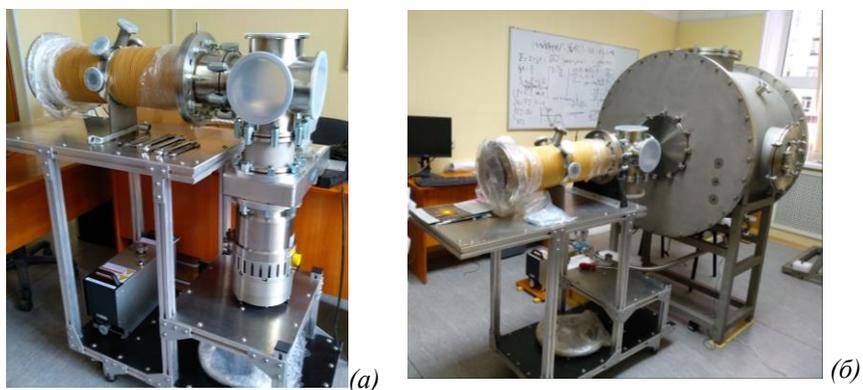


Рис. 2. Общий вид ПЛМ-2: (а) - камера мультикасповой ловушки с медными катушками и вакуумными насосами, (б) – с тестовой камерой

Проектные параметры плазменной установки ПЛМ-2 достигают параметров самой крупной установки MAGNUM-PSI [4], что вместе с передовыми технологиями охлаждения и теплообмена, развиваемыми в НИУ «МЭИ» [9], обеспечит создание научно-технического задела для разработки охлаждаемых модулей облицовки первой стенки и дивертора термоядерного токамака-реактора.

Работа на ПЛМ выполнена при поддержке гранта РФФ 17-19-01469, создание охлаждаемых систем поддержано грантом РФФИ 19-29-02020, изготовление АСНИ поддержано Мегагрантом РФ № 14.Z50.31.0042.

1. В.П. Будаев. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2015. Т. 38. № 4. С. 5.
2. V. P. Budaev. Physics of Atomic Nuclei. 2016. V. 79. 1137.
3. A. Pitts et al. J. Nucl. Mater. 2011. V. 415. S957.
4. H. J. N. Van Eck et al. Fusion Eng. Des. 2014. V. 89. 2150 .
5. D. M. Goebel, G. Campbell, R. W. Conn J. Nucl Mater. 1984 . V.121. 277.
6. N. Ohno et al, Nucl. Fusion. 2001. V. 41. 1055.
7. В.П. Будаев и др. ВАНТ. Сер.Термоядерный синтез. 2017. Т. 40. №3. 23.
8. V. P. Budaev et al. J. of Physics: Conference Series. 2017.V. 891.012304.
9. А.В. Дедов (ред.). Физико-технические проблемы управляемого термоядерного синтеза. LAP Lambert Academic Publishing, 2018, 127 с.

А.А.АЙРАПЕТОВ¹, Н.А.ПУНТАКОВ¹, Л.Б.БЕГРАМБЕКОВ¹,
С.С.ДОВГАНЮК¹, А.В.ГРУНИН¹, А.С.КАПЛЕВСКИЙ¹, А.В.ТЕНИШЕВ¹,
С.А.ГРАШИН², И.И.АРХИПОВ³

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва

³ИФХЭ РАН им. А.Н. Фрумкина, Москва

СВОЙСТВА ГРАФИТА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ КОНТАКТИРУЮЩИХ С ПЛАЗМОЙ ЭЛЕМЕНТОВ ТОКАМАКА Т-15МД

В качестве материала контактирующих с плазмой элементов токамака Т-15МД предполагается использовать графит. В работе проведено комплексное исследование выбранного с этой целью графита (далее: ГТ-15МД): измерены плотность, теплопроводность, коэффициенты распыления при различных условиях, определены величины захвата изотопов водорода и характер модификации структуры графита при облучении ионами водородной плазмы.

Для выполнения работы использовался ряд экспериментальных установок и приборов, в том числе МИКМА (Многофункциональный исследовательский комплекс масс-спектрометрического анализа [1]), СОПТМАТ (Стенд осаждения покрытий и тестирования материалов [2]), сканирующий электронный микроскоп Tescan Vega 3 с приставкой энергодисперсионного анализа, анализатор температуропроводности и теплопроводности Netzsch LFA-427 и другие.

Были получены следующие результаты:

1. Определена плотность ГТ-15МД ($1,82 \pm 0,02$ г/см³). Плотность ГТ-15МД попадает в диапазон плотностей графитов МПГ-6 [3], МПГ-7 [3] и МПГ-8[4].

2. Показано, что теплопроводность ГТ-15МД при комнатной температуре одинакова в трех взаимно-перпендикулярных направлениях (118 ± 6 Вт/м×К), что свидетельствует об изотропности графита, и совпадает с данными для МПГ-6, плотность которого $1,779 \pm 0,004$ г/см³ [5]. Зависимость теплопроводности в диапазоне температур 20-1400 °С в общем совпадает с данными для графитов марки МПГ-6: экспоненциальное падение с температурой. Теплопроводность составляет 103 ± 5 Вт/м×К при 200 °С, 60 ± 3 Вт/м×К при 1000 °С, 54 ± 3 Вт/м×К при 1400 °С.

3. Исследование графита на растровом электронном микроскопе с энергодисперсионным рентгеновским анализом не показало наличие примесей в графите (чувствительность составляла 0,05 весовых %).

Проанализирована структура графита, проведено его сравнение с графитом МПГ-8. Размер зерен ГТ-15МД составлял примерно 60 мкм (у МПГ-8 до 100 мкм). Поверхность слома ГТ-15МД и МПГ-8 выявила объёмные поры, средний размер которых составлял 10 мкм. В отдельных случаях, размер пор достигал 20 мкм у ГТ-15МД и 30 мкм у МПГ-8. Поры различных размеров распределены на поверхности слома равномерно, в области $50 \times 50 \text{ мкм}^2$ в среднем по 10-15 пор у ГТ-15МД и 15-20 у МПГ-8.

4. Определена эффективность различных режимов (температура/длительность) предварительного отжига графита Г-15МД. Измерения методом термодесорбции показали, что средняя концентрация водорода в ГТ-15МД составляет 2.7×10^{18} ат/г (0,005 ат.%). При прогреве графита при температуре 773К за 1 час удаляется около 40% водорода, за 2 часа – 75%. Для удаления более 90% водорода графит необходимо прогревать примерно 6 часов при 773К, 30 минут при 1023 К или 3 минуты при 1273 К.

5. Исследован захват ионов дейтериевой плазмы и водорода остаточного газа в графит ГТ-15МД при различных энергиях облучающих ионов. Спектры термодесорбции водорода, внедренного в ГТ-15МД, аналогичны спектрам термодесорбции МПГ-8. Захват дейтерия в ГТ-15МД выходит на насыщение при дозе облучения 4.4×10^{23} ат/м² при энергии ионов, как 100 эВ/ат (1×10^{21} ат/м²), так и 650 эВ/ат (3×10^{21} ат/м²) (Рис.1).

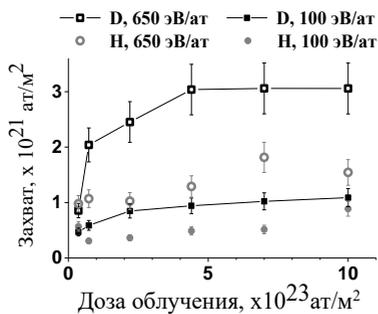


Рис. 1. Зависимость захвата дейтерия и водорода в ГТ-15МД от дозы облучения ионами дейтерия с энергиями 100 и 650 эВ/ат.

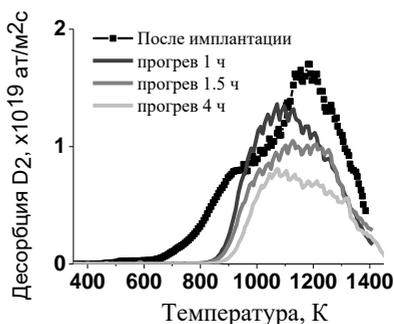


Рис. 2. ТДС спектры D_2 из ГТ-15МД после имплантации дейтерия и выдержки при температуре 773К различное время.

Количество захваченного дейтерия в ГТ-15МД примерно в 3 раза выше, чем в МПГ-8 [1]. Сравнение спектров ТДС обоих графитов показывает, что превышение захвата дейтерия в графит ГТ-15МД происходит как в

приповерхностных слоях, так и радиационных ловушках в зоне торможения ионов. Это обстоятельство, с учётом несколько большей пористости графита МПГ-8 по сравнению с графитом в ГТ-15МД, позволяет предположить меньшую степень кристаллизации последнего.

При энергии ионов 100 эВ/ат захват водорода (из остаточного газа) в ГТ-15МД выходит на насыщение ($6,8 \times 10^{20}$ ат/м²) при дозе облучения 7×10^{23} ат/м². При энергии ионов 650 эВ/ат рост захвата водорода продолжается вплоть до дозы 1×10^{20} ат/см² ($1,5 \times 10^{21}$ ат/м²).

Исследовано термическое обезгаживание графита Т-15МД, облученного ионами дейтериевой плазмы с энергией 650 эВ/ат до насыщения (количество захваченного дейтерия 3×10^{21} ат/м²). Показано, что при отжиге графита при температуре 773 К из него за 1 час десорбируется около 30%, а за 4 часа – более 50% захваченного дейтерия (Рис.2).

Исследована зависимость захвата в графит ионов дейтериевой плазмы с энергией 100 эВ/ат и водорода остаточного газа от температуры облучения. Показано, что повышение температуры облучения с 630 К до 1023 К приводит к шестикратному уменьшению захвата дейтерия и двукратному уменьшению захвата водорода.

7. Измерены коэффициенты распыления графита ГТ-15МД. Коэффициенты распыления при облучении ионами с энергией 180 эВ/атом и 350 эВ/атом, плотности потока $2,6 \times 10^{20}$ ион/м²с и температуре 330 К близки с коэффициентами распыления графита МПГ-8 (Рис.3). При больших энергиях коэффициент распыления уменьшается. При увеличении потока до $3,8 \times 10^{20}$ ион/м²с при 350 эВ/атом или при 180 эВ/атом при увеличении температуры до 750 К коэффициент распыления ГТ-15МД увеличивается и составляет $0,17 \pm 0,01$ и $0,15 \pm 0,01$. При этом, стоит отметить, что развитие пористости поверхности ГТ-15МД при облучении ионами с плотностью потока $2,6 \times 10^{20}$ ион/м²с при температурах 330-350 К происходит заметно медленнее, чем поверхности графита МПГ-8.

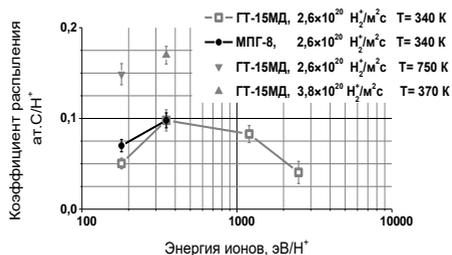


Рис.3. Коэффициенты распыления графитов ГТ 15МД и МПГ 8 при различных условиях облучения ионами водорода.

8. Изучена модификация поверхности при высокотемпературном облучении интенсивными ионными потоками.

Исследования проводились на установке СОПТМАТ в диапазоне температур 1900–2000 °С, плотность потока ионов водорода составляла $9,3 \pm 0,9 \times 10^{21}$ ат./м²с. Облучение при таких параметрах приводило к развитию поверхностной пористости, достигающей 40%, когда доза облучения достигала $5,8 \times 10^{24}$ ат./м² при температуре 1900 °С и 60% - при температуре 2000 °С. Высокая скорость диффузии в глубину графита вакансий, образующихся в зоне торможения ионов, приводила к развитию пористости в приповерхностном слое. Плотность графита в приповерхностном слое в среднем составляла 80% от первоначальной при температуре 2000 °С и дозе $2,9 \times 10^{24}$ ат./м², при этом пористый слой распространялся на глубину 1,5 мм. Распыление графита при этих условиях определялось механизмом радиационно-ускоренной сублимации (Radiation Enhanced Sublimation – RES). С ростом глубины пористого слоя, скорость поступления атомов углерода из глубины графита на поверхность и скорость их распыления уменьшались. В результате, толщина пористого слоя и коэффициент распыления графита стабилизировались. Однако, даже в режиме стабилизации коэффициент распыления графита в разы превышал его значение при распылении в условиях умеренных температур.

На основании проведенных измерений, можно сделать вывод, что данный графит, в целом, не сильно отличается от графита МПГ-8, широко использовавшегося в термоядерных установках. Вместе с тем, следует отметить, что в условиях работы в режимах с длинными импульсами может потребоваться его защита от облучения интенсивными ионными потоками, во избежание сравнительно быстрой эрозии. Роль защитного *in situ* восстанавливаемого покрытия может выполнять покрытие кристаллического карбида бора.

Список литературы

1. Айрапетов А.А., и др., Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2018, № 6, с.48-53.
2. Begrambekov, L.V. et.al. 2019 JPCS, 1328 (1), № 012031.
3. Бутырин Г. М., ХИМИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА, 2015, № 5, с. 40–53
4. Сковорода А., и др. ВАНТ: Термоядерный синтез. 2008. № 3. с. 15-34
5. Станкус С.В., и др. // ТВТ. 2013. Т. 51. № 2. С. 205.

В.А. КУРНАЕВ¹, А.В. МАРКИН², Ю.М. ГАСПАРЯН¹, Е.Е. МУХИН³,
Д.Г. БУЛГАДАРЯН¹, Е.Д. ВОВЧЕНКО¹, А.Г. РАЗДОБАРИН³,
В.С. НОРАКИДЗЕ¹, Д.И. ЕЛЕЦ³, Л.А. СНИГИРЕВ³
+ КОЛЛЕКТИВЫ МИФИ, ИФХЭ ИМ ФРУМКИНА, ФТИ ИМ ИОФФЕ
¹НИЯУ МИФИ, Россия, 115409, Москва
²ИФХЭХ им. Фрумкина, РАН, 119071, Москва
³ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 119071, Санкт-Петербург

ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА СОДЕРЖАНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В МАТЕРИАЛАХ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТОКАМАКОВ

Введение

Взаимодействие плазмы с поверхностью становится все более важным и сложным в процессе перехода от нынешних токамаков к ИТЭР и далее к демонстрационным термоядерным электростанциям. Обычная работа токамака приводит к удержанию значительной доли топлива в пленочных осадениях. Это требует ограничения на время непрерывной эксплуатации, мониторинга запасов трития и периодического технического обслуживания, чтобы минимизировать загрязнение окружающей среды и последствия возможных аварий. Даже если проблема безопасности будет решена, экономичность термоядерного реактора в конечном итоге зависит от баланса между потреблением трития во время работы и расходом в реакции термоядерного синтеза. Допустимая скорость удержания трития при работе ИТЭР в настоящее время ограничена на уровне ~ 0,5 грамм трития за выстрел [1], то есть накопление в вакуумном объеме может достигать 640 г за 2 месяца эксплуатации [2].

Измерение удержания топлива является одним из критических моментов, которые могут серьезно повлиять на работу устройства, если не будут разработаны эффективные процессы удаления трития непосредственно в процессе эксплуатации. Для большинства устройств, где удержание связано исключительно с использованием углерода, доля долгосрочного удержания трития, выведенная из интегрального баланса частиц, в несколько раз больше, чем из компонентов, обращенных к плазме [3]. Переход от углеродных стенок к полностью металлическим устройствам с первой стенкой из бериллия и вольфрамовым дивертором уменьшают задержку топлива и изменяют местоположение тритий-содержащих пленочных осадений от удаленных областей к поверхностям, подверженным воздействию плазмы. Свойства металлических материалов первой стенки и особенно бериллия [4], представляют большой интерес, поскольку последний гораздо более склонен к плавлению, эрозии и удержанию трития,

чем вольфрам. Тритий может накапливаться в совместных отложениях на первой стенке, а также в чешуйках в труднодоступных суб-диверторных и внутренних диверторных структурах. Удержание трития в со-осаждениях бериллия на порядок выше, чем в со-осаждениях вольфрама [5], и намного выше, чем в объемном вольфраме, лежащем в основе осажденных пленок в диверторе, где осажденные слои встречаются чаще всего. Повторно осажденный бериллий должен в основном накапливаться на входе в дивертор, достигая 0,1 - 0,4 г на импульс полной мощности (~ 100 кг отложений в течение срока службы ИТЭР [6]). Поверхностная плотность трития будет меняться со временем из-за отжига при периодическом нагреве во время выстрелов. В работе [6] рекомендуется сконцентрировать усилия на пяти задачах, связанных с удержанием топлива и перемещения материалов в ИТЭР:

- Накопление пыли внутри токамака.
- Моделирование миграции разрушенного материала.
- Мониторинг первой эрозии стен.
- Отбор проб пыли под дивертором (как минимум).
- Методика выявления пыли и отложений на горячих поверхностях.

Все эти задачи являются дополнительными методами оценки долгосрочного удержания. Лабораторный анализ извлеченных образцов позволит измерять содержание трития в щелевых зазорах первой стенки или в пространстве под дивертором, но может быть выполнено лишь для ограниченных областей и должно усредняться по циклам работы, в течение которых режимы обработки осаждений на стенках претерпевают значительные изменения. Комбинация экспериментальных методов, дополненная моделированием миграции эродированного материала, должна контролировать частоту проведения технического обслуживания. Любое моделирование перемещения материала должно поддерживаться локальным анализом поверхности.

В экспериментах по миграции бериллия на JET нейтральные Be и BeD ионизировались в краевой плазме и транспортировались в пристеночных слоях в направлении внутреннего дивертора, где наблюдалась значительная скорость их осаждения [7] и содержание H / D / T на ней, по-видимому, является одним из критических параметров, измеряемых в ИТЭР.

В первых работах по лазерно-индуцированной десорбционной спектроскопии (LIDS) использовался основанный на лазерной искре аналог непрерывной термической линейной десорбции [8] и мгновенного нагрева [9]. В настоящее время он предназначен для использования в периоды между выстрелами, когда H / D / T выделяется посредством лазерного нагрева

первой стенки, а затем обнаруживается с помощью газоанализатора. Более сложный подход использует лазерно-индуцированную спектроскопию пробоя (LIBS). Другой лазерной диагностикой является активная лазерная пирометрия в сочетании с фиксированной термографией, применяемой для неразрушающего анализа со-осажденных слоев. Все эти лазерные методы диагностики [6] могут предоставить информацию о локальной толщине осаждения и содержании H / D / T. Необходимость исследования и других областей первой стенки кроме внутренней мишени дивертора, может потребовать применения нескольких диагностических подходов. Детальный анализ чувствительности и применимости различных подходов представлен в работе [10].

Планы работ по развитию диагностики накопления трития

В этой презентации представлены планы работ объединенной команды МИФИ, ИФХЭ им Фрумкин и ФТИ им Иоффе по развитию диагностики накопления трития в России. В ходе работы над проектом экспериментальные исследования будут сконцентрированы на десорбции D2/H2 из перепыленных материалов первой стенки токамака Глобус-М2 – углерода и перспективных конструкционных материалов – вольфрама, молибдена и бериллия. Учитывая высокую токсичность бериллия, в данной работе планируется изучать материалы близкие по своим физико-химическим свойствам – алюминий и никель. Часть работ будет также проведена с литием, который также рассматривается как перспективный обращенный к плазме материал. Для получения образцов осаждений, макеты элементов первой стенки будут экспонироваться в диверторной области и патрубках токамака Глобус-М2. Образцы, моделирующие со-осаждение металла и изотопов водорода в токамаке, будут получены методом реактивного распыления в атмосфере, содержащей D2/H2. Уникальная установка МР-2, созданная в НИЯУ МИФИ, позволяет проводить магнетронное напыление образцов и исследование содержания изотопов водорода методом термодесорбционной спектроскопии (ТДС) без развакуумирования установки. Установка "Большой Масс-монохроматор МИФИ" позволяет без развакуумирования наносить тонкие слои материала испарением, контролировать толщину и состав пленки диагностикой отраженных ионов малых энергий (LEIS). Обе установки (МР-2 и БММ МИФИ) позволяют направлять на образец лазерное излучение, наблюдать оптические спектры излучения и измерять поток десорбированных газов. Возможность напыления покрытий и их анализа без контакта с атмосферой позволяет исследовать влияние примесей, а также работать с такими химически активными элементами, как литий.

Для исследования структуры, морфологии, состава, и границ разделов осадений на макете первой стенки планируется задействовать ряд диагностических методик, и в их числе рентгеновскую дифракцию, электронную растровую (РЭМ) и просвечивающую (ПЭМ) микроскопию, рентгеноспектральный микроанализ (РСМА), рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию (РФЭС). Для моделирования захвата и десорбции водорода в пленках будут использоваться разработанные ранее коды и аналитические методы на основе решения уравнения диффузии. Для моделирования нагрева и абляции материала разрабатывается компьютерный код на основе решения уравнения теплопроводности с движущейся границей. Оба кода будут интегрированы для решения полной задачи определения потока частиц с поверхности. На завершающей стадии разработанные методики будут испытаны в условиях действующего токамака. Коллектив имеет уникальную возможность проводить эксперименты на двух токамаках Глобус-М2 (ФТИ) и МИФИСТ (МИФИ).

Список литературы

- [1] ROTH, J., et al., J. Nucl. Mater. 390–391 (2009) 1–9.
- [2] SHIMADA, M., et al., J. Nucl. Mat. 438 (2013) S996-S1000.
- [3] LOARER, T., et al., Nucl. Fusion 47 (2007) 1112-1120.
- [4] DOERNER, R.P., et al., Nucl. Fusion. 49 (2009) 035002.
- [5] BREZINSEK S. Nucl. Fusion 53 (2013) 083023
- [6] REICHLER R. et al. Proceedings of 25th IAEA Fusion Energy Conference - IAEA CN-221
- [7] BREZINSEK S., et. al Nucl. Fusion 55 (2015) 063021
- [8] BOIVIN, R., et al., J. Appl. Phys. 73 (1993) 1936-1951.
- [9] YU, J.H., et al., J. Nucl. Mat. 438 (2013) S1150–S1154.
- [10] MUKHIN E.E. et al., Nucl. Fusion 56 (2016) 036017

А.М.ДМИТРИЕВ^{1,2}, Н.А.БАБИНОВ^{1,2}, И.М.БУКРЕЕВ¹, А.ВАРШАВЧИК¹,
Д.И.ЕЛЕЦ¹, П.А.ЗАТЫЛКИН¹, Е.Е.МУХИН¹, А.Г.РАЗДОБАРИН¹,
Д.С.САМСОНОВ¹, Л.А.СНИГИРЕВ¹, С.Ю.ТОЛСТЯКОВ¹,
Ал.П.ЧЕРНАКОВ^{1,2}, Ан.П.ЧЕРНАКОВ^{1,2}, П.В.ЧЕРНАКОВ²,
А.Е.ГОРОДЕЦКИЙ³, В.Л.БУХОВЕЦ³, А.В.МАРКИН³,
Р.Х.ЗАЛАВУТДИНОВ³, П.А.ШИГИН⁴, И.Б.КУПРИЯНОВ⁵,
В.Л.ПОДКОВЫРОВ⁶, Д.В.КОВАЛЕНКО⁶

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

²ЗАО Спектрал-Тех, Санкт-Петербург

³ИФХЭХ им. Фрумкина, Москва

⁴Международная Организация ИТЭР, Кадараши, Франция

⁵АО «ВНИИНМ», Москва

⁶АО «ГНЦ ТРИНИТИ», Троицк

СТАТУС РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ ПЛАЗМЕННОЙ ОЧИСТКИ ПЕРВОГО ЗЕРКАЛА В ФТИ им. А.Ф. ИОФФЕ

Введение

Более двадцати оптических диагностик токамака ИТЭР имеют внутривакуумные оптические компоненты, расположенные в непосредственной близости от плазмы токамака [1]. Поверхности таких компонентов (зеркал или окон) будут подвержены осаждению пленок, состоящих из материалов первой стенки (преимущественно Ве с примесями O, N, D, W). В ряде работ было показано, что осаждение таких пленок негативно влияет на оптические характеристики металлических зеркал [2–3]. Для восстановления оптических характеристик внутривакуумных компонентов потребуется проведение мероприятий по очистке их поверхности. На данный момент в качестве основного подхода рассматривается система очистки, основанная на высокочастотном емкостном (ВЧЕ) разряде, в котором очищаемый оптический элемент играет роль одного из электродов [4–11]. Ионы, ускоренные в приэлектродном слое ВЧЕ разряда, бомбардируют поверхность зеркала, приводя к физическому распылению или химическому травлению осадений. Одним из основных требований к системе очистки зеркал является высокая скорость удаления осадений при минимальном воздействии на оптическую поверхность зеркала. Исследования ВЧЕ разряда как инструмента для очистки зеркал в ИТЭР в настоящее время сфокусированы на подборе оптимальных параметров разряда в зависимости от характеристик сценария чистки (наличия магнитного поля, давления и сорта рабочего газа, частоты и величины подаваемой мощности и т.д.).

Обращенные к плазме первые диагностические зеркала ИТЭР будут подвержены нагреву до высоких температур за счет интенсивного нейтронного и гамма излучения термоядерной плазмы [12]. Для предотвращения деформации поверхности первых зеркал, обусловленных температурными градиентами, планируется оборудовать их системой водяного охлаждения [13]. Для совмещения системы охлаждения зеркала с системой ВЧ чистки предложено выполнять трубки водяного охлаждения по принципу коаксиального четвертьволнового короткозамкнутого фильтра, имеющего бесконечный импеданс и не влияющего на S-параметры зеркала, как элемента ВЧ тракта [14].

Ввиду высокой токсичности бериллия в качестве покрытия, моделирующего бериллийсодержащие осаждения, в экспериментах по отработке методики процесса очистки обычно используется пленки Al/Al₂O₃. Для оптимизации режимов чистки, а также для исследования взаимодействия поверхности внутривакуумных оптических компонентов с металлическими осаждениями, целесообразно проводить эксперименты с бериллиевыми пленками, поскольку бериллий и его оксид обладают отличными от Al/Al₂O₃ коэффициентами распыления и химическими свойствами. Предыдущие исследования показали, что одним из определяющих факторов при выборе материала первого зеркал и первого окна является стойкость к напылению металлических пленок с последующей очисткой в ВЧЕ разряде. В связи с этим для окончательного решения по выбору материала первого окна необходимо провести исследование стойкости окон к многократным циклам напыления/чистки бериллия.

Прогресс в разработке системы плазменной очистки оптики

В докладе приведены результаты разработки плазменной системы чистки первого зеркала и окна. В ходе работ экспериментальное исследование было сконцентрировано на изучении свойств пульсирующего ВЧ емкостного разряда и на взаимодействии металлических пленок с поверхностью диэлектрических окон.

Пульсирующий ВЧ индукционный разряд широко применяется для осаждения и травления тонких пленок в микроэлектронной промышленности [15]. Использование пульсирующего источника ВЧ мощности позволяет добиться увеличения скорости и однородности распыления. Модуляция ВЧ мощности в ВЧ емкостном разряде позволяет независимо управлять энергией и потоком ионов на поверхность электрода [16]. В рамках работ по исследованию ВЧ емкостного разряда, как инструмента системы очистки внутривакуумной оптики, было проведено

исследование параметров ионных потоков на нагруженный электрод при модуляции подаваемой ВЧ мощности. Частота модуляции варьировалась в пределах 1-10 кГц. Была исследована зависимость параметров разряда от скажности импульсов. На основании полученных результатов была оценена скорость удаления металлических пленок с поверхности ВЧ электрода.

В работе представлены результаты пилотных экспериментов на установке КСПУ-Ве по осаждению и распылению бериллийсодержащих пленок с поверхности макетов первого окна. При исследовании макетов было установлено, что в выбранной геометрии за один импульс установки КСПУ на поверхности образцов-макетов первого окна системы сбора диверторного томсоновского рассеяния (ДТР) осаждается пленка толщиной ~ 7 нм, содержание бериллия в которой в среднем составляет 70 %. В экспериментах по плазменной очистке макета первого окна системы сбора ДТР от бериллий-содержащих напылений продемонстрирована возможность очистки поверхности первого диагностического окна, запыленного продуктами эрозии бериллия. Скорость распыления, полученная в экспериментах, составляла 0,5-0,8 нм/мин.

На основании данных полученных в тестовых экспериментах была разработана конструкция узла двух первых зеркал диагностики Инфракрасной термографии диверторных пластин, находящейся в экваториальном порту №17 токамака ИТЭР. При разработке конструкции учитывались требования ИТЭР для внутривакуумного и электрического оборудования. Сборка каждого зеркала включает в себя систему охлаждения, выполненную по схеме четвертьволнового короткозамкнутого фильтра, системы предварительного согласования и измерения ВЧ мощности, выполненных в виде планарной схемы. Обе зеркальные сборки закреплены на раме, имеющей интерфейс крепления к касете DSM (diagnostic shield module). В разработанной конструкции предусмотрено место под установку затвора с пьезоэлектрическим приводом, необходимого для защиты зеркал во время процедуры обслуживания первой стенки токамака. Результаты первичных испытаний узла первых двух зеркал приведены в докладе.

Благодарность: Данная работа частично поддержана центральной командой ИТЭР в рамках контрактов Ю/17/СТ/4300001626 (разделы 2, 3) и Ю/17/СФТ/7-308/СДР (раздел 4). Решения и мнения, представленные в данном докладе, не обязательно выражают интересы организации ИТЭР.

Список литературы

- [11] A. Litnovsky et al., Fusion Eng. Des. **86** (2011) 1780
- [12] M. Joanny et al., IEEE Trans. Plasma Sci. **40** (2012) 692
- [13] M. Rubel et al., Phys. Scr. **T145** (2011) 014070
- [14] A.M.Dmitriev et al., Phys. Scr. **T170** (2017) 014072
- [15] E.E. Mukhin et al., Nucl. Fusion **52** (2012) 013017
- [16] A. Razdobarin et al., Nuclear Fusion, **55**(9) (2015) 093022
- [17] Л.А. Варшавчик и др. В сборнике: Неделя науки СПбПУ материалы научной конференции с международным участием. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. 2017. С. 436-439.
- [18] A.M. Dmitriev et al. Fusion Engineering and Design. **138** (2019) .
- [19] Н.А. Бабинов и др. В сборнике: Взаимодействие плазмы с поверхностью Сборник научных трудов. 2019. С. 20-22.
- [20] А.М. Дмитриев и др. В сборнике: Взаимодействие плазмы с поверхностью Сборник научных трудов. 2019. С. 51-54.
- [21] A. Kobelev et al., Physics of Plasmas **26** (2019) 013504
- [22] S. Salasca, et al., IEEE Trans. Plasma Sci. **40** (3) (2012) 665.
- [23] F. Leipold et al., Rev. Sci. Instrum. **87** (2016) 11D439
- [24] G.L. Matthaei, L. Young, E.M.T. Jones, Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures, McGraw-Hill, New York, 1965.

ВЛИЯНИЕ АТОМОВ ГЕЛИЯ НА ПОВЕДЕНИЕ ПАР ФРЕНКЕЛЯ ПРИ МАЛЫХ РАССТОЯНИЯХ РАЗЛЕТА

Введение. Радиационное повреждение металлов является фактором первостепенной важности при разработке и эксплуатации ядерных и термоядерных реакторов. Особенностью ТЯР является наличие в материалах ТЯР чрезвычайно большой концентрации изотопов водорода (термоядерное топливо) и гелия (продукт термоядерной реакции и распада трития). Атомы гелия и водорода внедряются в материал, и, взаимодействуя с радиационными дефектами, изменяют характер повреждения [1-6]. В представленной работе проведено исследование ряда процессов, характерных для приповерхностной области вольфрама, приводящих к повышению её повреждаемости за счет блокировки процессов рекомбинации дефектов атомами гелия. Рассмотрены три случая: рекомбинация пары в массиве, рекомбинация пары около поверхности и рекомбинация пары около поверхности в присутствии атомов двух атомов гелия. В каждом случае рассмотрено несколько десятков начальных конфигураций атомов, в которых расстояние между вакансией и междоузельным атомом вольфрама мало и достаточно для спонтанной рекомбинации, что соответствует допороговым смещениям. Расчеты выполнены методом DFT. Расчетная супер-ячейка содержит 128 атомов W (768 электронов) с периодическими оптимизируемыми граничными условиями.

Рекомбинация пары Френкеля в массиве вольфрама. Начальной конфигурацией, которая наиболее благоприятна для блокировки рекомбинации, является близкое расположение пары He2 к вакансии и максимальное удаление междоузельного атома W от вакансии. Расчеты показали, что даже в этом случае (при данном размере суперячейки) рекомбинация проходит до конца в результате цепочки замещений. Первоначально пара He2 захватывается вакансией, но затем вытесняется из неё ближайшим атомом W в результате цепочки замещений атомов W, провоцируемыми междоузельным атомом W. В случае одного атома He, рекомбинация происходит легче. Рекомбинация в объеме W проходит из всех доступных положений междоузельного атома I_w . Из этих результатов следует, что объем спонтанной рекомбинации генетически связанных

вакансий и собственных междоузельных атомов W превышает объём расчетной супер-ячейки, а наличие примесей в виде He2 (тем более He1) в таком объеме в массиве вольфрама не препятствует спонтанной рекомбинации. Действительно, в работе [7] в рамках другого метода получена оценка $\Omega_{rec} \approx 200\omega_0$ (ω_0 – атомный объём для вольфрама), что вдвое превышает объем супер-ячейки.

Рекомбинация пары Френкеля вблизи поверхности (100). В этом варианте атомов гелия нет. Междоузельный атом образует краудион, как и в объеме металла. При релаксации междоузельного атома I_W возникает конкуренция двух стоков: вакансии и поверхности. Конечный вариант зависит от начального расположения атома I_W и расположения вакансии и линии образующегося краудиона. В первом приближении, если I_W образуется под вакансией (или в одном слое с вакансией), то создается краудион, один из атомов которого рекомбинирует с вакансией. На рис. 1а показано стрелками смещения атомов W принадлежащих краудиону, при которых атом, ближайший к вакансии, уходит из цепочки и переходит в вакансию. Если же I_W располагается выше вакансии, то создает краудион, который выходит по цепочке замещений на поверхность, создавая адсорбированный атом W (рис. 1б). Вакансия при этом выживает.

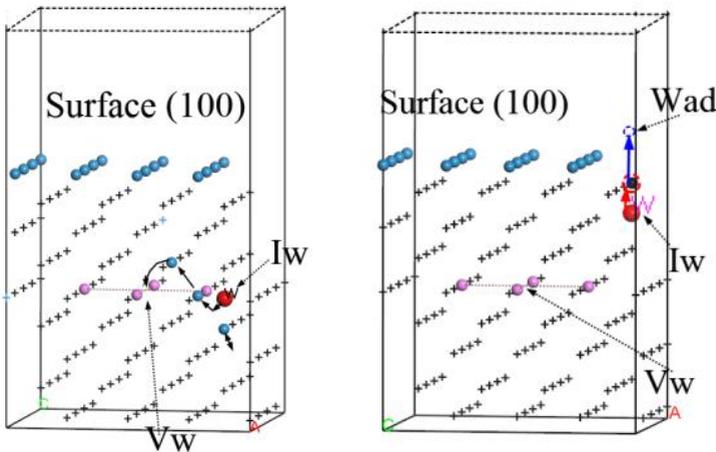


Рис. 1. Релаксация в процессе оптимизация конфигурации вольфрама после образования пары Френкеля вблизи поверхности (100). Гелиевых атомов нет. а – вариант с рекомбинацией вакансии и атома W за счет последовательных замещений; б – вариант, при котором атом W создает краудион, который выходит по цепочке замещений на поверхность, создавая адсорбированный атом W.

Таким образом, в приповерхностных слоях объем спонтанной рекомбинации пар Френкеля уменьшается, по сравнению с массивом вольфрама, даже без наличия примесных атомов гелия, то есть выживание вакансий вблизи поверхности более вероятно.

Блокировка рекомбинации пары Френкеля вблизи поверхности (100) в присутствии пары атомов He2. На рис. 2 представлена начальная конфигурация вакансии и атома вольфрама, соответствующая рис. 1а, но вблизи вакансии введены два атома гелия. Эти два атома гелия практически сразу захватываются в вакансию после начала расчета. Комплекс (Vw+He2), находящийся вблизи поверхности, оказывается более устойчивым к рекомбинации пары Френкеля, по сравнению с обычной вакансией в том же положении (рис.2а), при релаксации. Атом I_w создает краудион, выходящий на поверхность. В результате рекомбинации нет, а один атом W по цепочке замещений выходит на поверхность (рис. 2). Таким образом, объем спонтанной рекомбинации пар Френкеля в приповерхностных слоях при наличии примесных атомов гелия, заполняющих вакансию, уменьшается в еще большей степени.

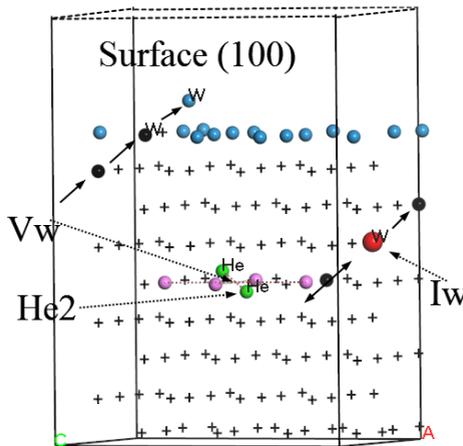


Рис. 2. Блокировка рекомбинации пары Френкеля в объеме вольфрама, граничащем с поверхностью (100), при наличии пары атомов He2 вблизи вакансии. Конечная стадия оптимизации. Стрелками указаны перемещения атомов W по линии краудиона. Виден выход краудиона с другой стороны из-за периодичности граничных условий суперячейки.

В варианте начальной конфигурации, соответствующей рис. 1b, при введении двух атомов гелия вблизи вакансии (рис. 3a) образуется краудион, который выходит на поверхность под меньшим углом, чем в рис. 1b. При этом один атом W выталкивается краудионом на поверхность, образуя адсорбированный атом, но в другой ячейке. Рекомбинации генетически связанной пары не происходит. Более того, вблизи поверхности образуется, ещё одна вакансия. Наличие комплекса (V+He2) и приповерхностной вакансии и адсорбированных атомов W хорошо видно из рис.3b, на котором изображена изоповерхность электронной плотности для конечной стадии оптимизации структуры (рис.3a). Электронная плотность внутри замкнутых полостей меньше, чем снаружи.

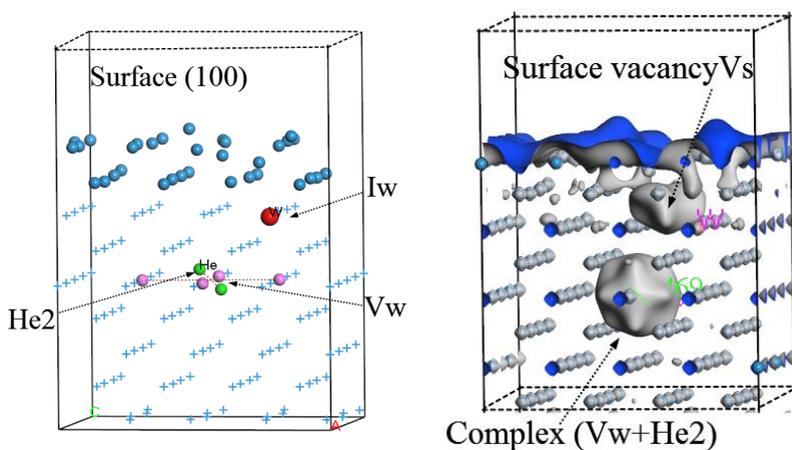


Рис.3. а - блокировка рекомбинации пары Френкеля в объеме вольфрама, граничащем с поверхностью (100), при наличии пары атомов He2 вблизи вакансии, выход краудиона на поверхность с образованием приповерхностной вакансии и адсорбированных атомов. Конечная стадия оптимизации. b – визуализация распределения электронной плотности для рис.3a

Выводы: В приповерхностных слоях вольфрама при наличии примеси гелия объем спонтанной рекомбинации генетически связанных вакансий и собственных междоузельных атомов W значительно уменьшается, т.е. вероятным становится выживание пар, которые в отсутствии гелия спонтанно рекомбинировали на большем расстоянии. Это облегчает допороговое образование дефектов. Более того, присутствие гелия вблизи

первичной пары может провоцировать образование дополнительной вакансии после выхода междоузельного атома вольфрама на поверхность.

Список литературы

1. K. Nordlund, St.J. Zinkle and others// J. Nuc. Mat. 2018, Vol. 512, P. 450-479
2. W. Zhang, F. Luo and others// J. Nucl. Mat. 2016, Vol. 479, P. 302-306
3. N. Fernandez, Y. Ferro and D. Kato// Acta Mat. 2015, Vol. 94 P. 307–318
4. G. D. Temmerman and others // Plasma Phys. Cont. Fus., 2018. Vol. 60, no. 4, P. 044018
5. G.-H. Lu, and others // Nucl. Fusion, 2014. Vol. 54, no. 8, P. 086001
6. K. Schmid and others // Phys. Scr. 2017, Vol.170, P. 014037
7. M. P. Biget, R. Rizk, A. Bessis// Solid State Com. 1975. Vol. 16, Is.7, P. 949-952

С.А. КРАТ, Ю.М. ГАСПАРЯН, Я.А. ВАСИНА, А.С. ПРИШВИЦЫН, А.А. ПИСАРЕВ,

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СООСАЖДЕНИЯ ВОДОРОДА С МЕТАЛЛАМИ

Накопление изотопов водорода, включая радиоактивный тритий, в термоядерных установках – важный вопрос с точки зрения радиационной безопасности установок. Совместное осаждение с частицами материала стенки установки (соосаждение) – один из основных каналов накопления изотопов водорода в термоядерных установках, способный приводить к образованию толстых водород-насыщенных слоёв в труднодоступных областях установки, таких как линии откачки, обратные стороны обращённых к плазме элементов. Так как содержание водорода в таких слоях может очень сильно от параметров осаждения, таких как температура поверхности, на которую происходит осаждение, скорость осаждения, потоки и энергии частиц водорода, эмпирический подход к предсказанию содержания водорода в плёнках малоперспективен. По этой причине важной является задача разработки теоретической модели соосаждения.

Предложена физическая модель, описывающая процесс совместного осаждения металла с водородом. Предложенная модель основана на решении уравнения диффузии газа в поле ловушек (дефектов решётки) с движущейся границей полубесконечного слоя. Разработанная модель позволяет предсказать содержание водорода в осаждённых из плазмы слоях в зависимости от условий осаждения, а именно температуры осаждения, потока и энергии имплантируемых во время осаждения частиц газа, скорости роста плёнки, концентраций и энергий связи ловушек в растущем слое, коэффициента диффузии. Разработанная модель не учитывает процессы гидридообразования, предполагает, что осаждение происходит в квазистационарном режиме, что существует термодинамическое равновесие между водородом, растворённым в металле, и водородом, захваченным ловушками в металле, и что концентрация растворённого водорода много меньше концентрации ловушек в слое. При выполнении данных условий, концентрация водорода, растворённого в металле, C_S может быть описана как

$$C_S = \begin{cases} \frac{I_0 h}{D b^2} \left(\frac{b x}{h} + e^{-b} - e^{b(\frac{x}{h}-1)} \right) + C_0, x < h \\ \frac{I_0 h}{D b^2} (b + e^{-b} - 1) + C_0, x > h \end{cases}$$

где I_0 - поток атомов и ионов водорода, имплантируемых в растущий слой в процессе соосаждения, h - глубина имплантации, D - коэффициент диффузии водорода в растущем слое, x - глубина, считая от поверхности слоя, C_0 - концентрация водорода на поверхности растущего слоя, b - параметр скорости роста плёнки, описываемый как

$$b = \frac{v h}{D} \left(\frac{\sum_i n_t^i}{n_q^{eff}} + 1 \right)$$

где v - скорость роста слоя, $n_q^{eff} = \mu n_{Me} e^{-\frac{E_{b,eff}}{kT}}$, где μ - параметр, близкий к единице, n_{Me} - концентрация атомов металла в растущем слое, $E_{b,eff}$ - эффективная энергия связи водорода с ловушками. Концентрация C_0 описывается как

$$\frac{\sqrt{\frac{bD}{K_r h} \left(4 \frac{I_0 h}{D b^2} (1 - e^{-b}) + \frac{bD}{K_r h} \right) - \left(\frac{bD}{K_r h} \right)}}{2}$$

где K_r - коэффициент рекомбинации водорода на поверхности слоя.

Концентрация газа в плёнке, включая газ в ловушках и в растворе может быть описана как

$$C_{gas} = \sum_i \frac{n_t^i C_S}{n_q^i + C_S} + C_S$$

Разработанная модель была верифицирована по данным о содержании дейтерия в соосаждённых слоях для случая медленного осаждения в предположении быстрой рекомбинации и зависимости содержания газа в плёнке от температуры осаждения для вольфрама, молибдена, алюминия. Результаты верификации можно представить на рисунке 1.

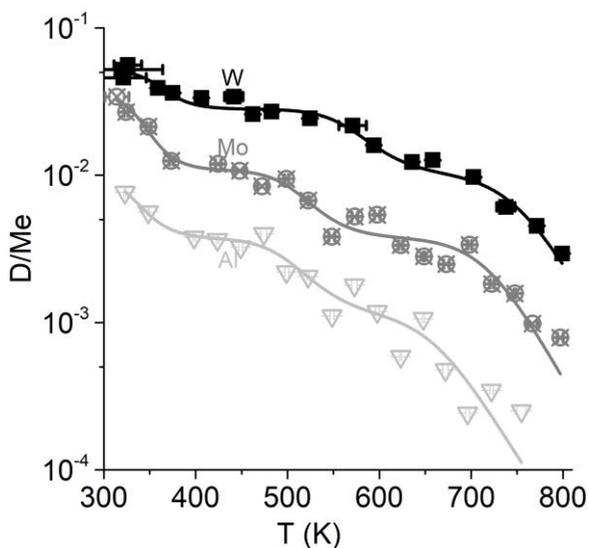


Рисунок 1. Зависимости содержания дейтерия в соосаждённых вольфрамовых (закрашенные чёрные квадраты), молибденовых (перечёркнутые тёмно-серые круги) и алюминиевых (перевёрнуты светло серые треугольники) слоёв. Кривые – предсказания теоретической модели, точки – экспериментальные данные.

А.Е. ГОРОДЕЦКИЙ¹, В.Л. БУХОВЕЦ¹, А.В. МАРКИН¹,
В.И. ЗОЛОТАРЕВСКИЙ¹, Т.В. РЫБКИНА¹
В.Л. ВОЙТИЦКИЙ¹, Р.Х. ЗАЛАВУТДИНОВ¹, А.П. ЗАХАРОВ¹,
А.М. ДМИТРИЕВ², А.Г. РАЗДОБАРИН², Е.Е. МУХИН²

¹*Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН,
Москва*

²*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
С.-Петербург*

ПОДАВЛЕНИЕ БЛИСТЕРООБРАЗОВАНИЯ В Мо ЗЕРКАЛАХ ПОСЛЕ ПОЛИРОВКИ АЛМАЗНЫМИ СОСТАВАМИ

Исследовано влияние чистящей D₂-N₂ плазмы тлеющего разряда на блистерообразование в монокристаллических зеркалах из молибдена (111) и (110). Поверхность каждого зеркала готовилась механической полировкой алмазными пастами или алмазным абразивом. Полировка зеркал приводила к формированию слоя материала толщиной до 3–5 мкм, отличного по структуре от остального объема металла. По мере удаления от поверхности зеркала происходил переход от аморфного слоя Билби к фрагментированному слою с нанометровыми размерами кристаллитов и далее к постепенной трансформации в структуру неразрушенного монокристалла.

Ранее в опытах с экспозицией в плазме смеси D₂–(0–4 мол.%)N₂ молибденовых фольг с текстурой {100}<110> было показано, что добавление азота к дейтерию интенсифицирует процессы накопления дейтерия и блистерообразования при энергии внедряемых ионов ниже 100 эВ (рис. 1а). При этом в тонком (5–10 нм) поверхностном слое формировался нитрид молибдена. Зарождение блистеров происходило на расстоянии 1–3 мкм от поверхности (на три порядка больше, чем длина пробега внедряемых ионов) [1].

Аналогичное явление наблюдали при экспозиции в плазме поликристаллического Мо зеркала [2]. Если же перед экспозицией образцов в плазме произвести предварительную полировку фольги или зеркала алмазным порошком или пастой, то процесс блистерообразования при тех же условиях облучения был подавлен (рис. 1б и 2).

В экспериментах с алмазной полировкой монокристаллических молибденовых зеркал после плазменной чистки и последующего длительной экспозиции в плазме смеси D₂– (4 мол.%) N₂ (флюенс 1.3×10²⁴ ион/м²) в поверхностном слое толщиной 3–8 нм методом РФЭС также был зафиксирован нитрид молибдена (рис. 3, спектр 4).

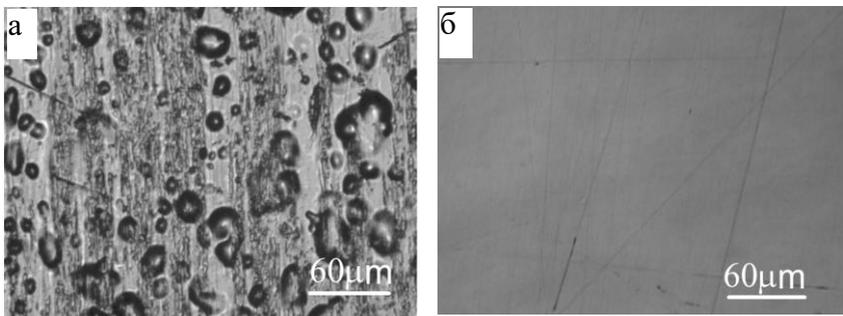


Рисунок 1. Оптическое изображение поверхности исходной (а) и полированной (б) молибденовых фольг после экспозиции в плазме смеси D_2 –(2 мол.%) N_2 (флюенс 2×10^{23} ион/ m^2)

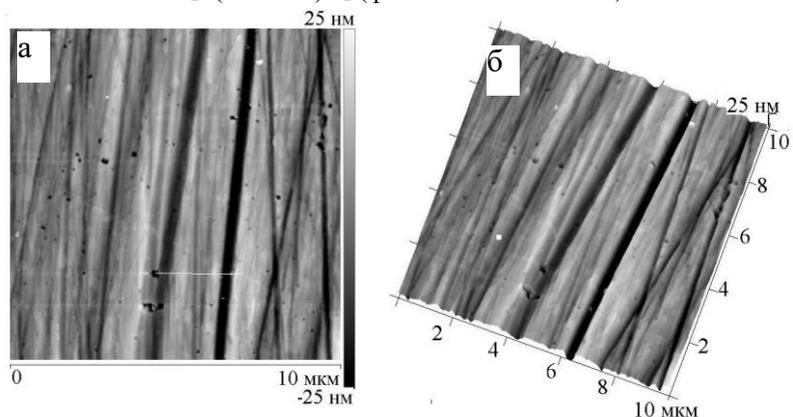


Рисунок 2. Топографическое (а) и изометрическое (б) изображения в атомно-силовом микроскопе поверхности зеркала $Mo(111)$, приготовленного полировкой алмазной пастой, после флюенса $F = 1.3 \times 10^{24}$ ион/ m^2 . Максимальный разброс неровностей от -20 до $+20$ нм, среднеквадратичная шероховатость – 3.9 нм)

В работе [3], при экспозиции на установке PSI-2 в сильноточной плазме D_2 – $0.05N$ ($T = 500$ и 700 К) предварительно рекристаллизованного вольфрама в поверхностном слое металла накапливался азот. Обогащенный азотом слой являлся барьером для десорбции дейтерия и способствовал

повышенному накоплению дейтерия в вольфраме и образованию блистеров.

Таким образом, в зависимости от глубины залегания внедренного дейтерия и структуры поверхностного слоя металла добавляемый в плазму азот может способствовать либо появлению блистеров, либо замедлять блистерообразование. Можно полагать, что при образовании нитрида молибдена в предварительно сильно разрушенном механической полировкой слое Билби, нитрид не образует барьерного слоя для выхода дейтерия и не способствует появлению блистеров.

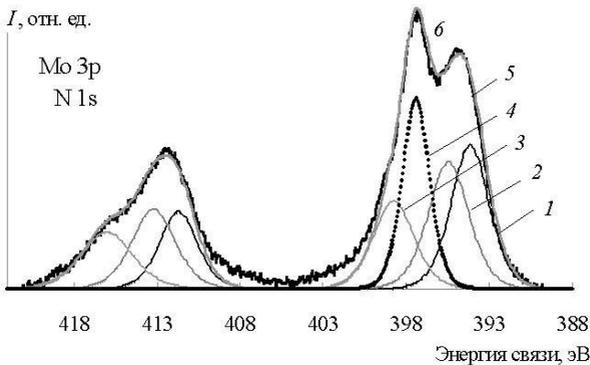


Рисунок 3. РФЭ спектр $Mo3p_{3/2}$ и $Mo3p_{1/2}$: после облучения $Mo(111)$ в плазме смесью $D_2-(2 \text{ мол.}\%)N_2$ ($F = 1.3 \times 10^{24}$ ион/ m^2). Разложение на основные пики от следующих валентных состояний: 1 – Mo^0 ; 2 – Mo^{4+} ; 3 – Mo^{6+} ; 4 – N в соединении с молибденом; 5 – сумма спектров 1–4; 6 – экспериментальный РФЭ спектр

Механическая полировка зеркал сопровождается формированием слоя материала толщиной до 3–5 мкм, отличного по структуре от остального объема металла. Этот слой можно модифицировать либо высокотемпературным отжигом, либо удалить электрополировкой.

Возникает вопрос – необходимо ли его рекристаллизовать, либо удалить для повышения отражательной способности зеркала на 1–3%? Возможно, разупорядоченные слои молибденового зеркала, понижающие отраженный световой поток на 1–3%, облегчают радиационно-индуцированные процессы рекомбинации внедренного атомарного дейтерия и транспорт молекулярного дейтерия в направлении к поверхности, подавляя процесс зарождения и роста наиболее опасных радиационных дефектов – блистеров.

Работа выполнена по бюджетному плану 2019 года при частичной поддержке программы фундаментальных исследований Президиума РАН (№ 14П).

Список литературы

1. *Городецкий А.Е., Буховец В.Л., Залавутдинов Р.Х., Маркин и др.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2018. №11. С. 1.
2. *Городецкий А.Е., Залавутдинов Р.Х., Буховец В.Л., Маркин А.В., и др.* // Поверхность. Рентген., синхротр. Нейтрон. и исслед. 2016. №12. С. 1.
3. *Kreter A., Nishijima D., Doerner R.P. et al.* // Nucl. Fusion 2019. V.59. 086029 (12pp).

В.Л. БУХОВЕЦ¹, А.В. МАРКИН¹, А.Е. ГОРОДЕЦКИЙ¹,
В.Л. ВОЙТИЦКИЙ¹, Р.Х. ЗАЛАВУТДИНОВ¹,
Е.Е. МУХИН², А.Г. РАЗДОБАРИН²

¹Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН

²Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН

ИЗМЕНЕНИЕ СВЕТОПРОПУСКАНИЯ ФИАНИТА ПРИ ЭКСПОЗИЦИИ В ПЛАЗМЕ ДЕЙТЕРИЯ И ГЕЛИЯ

Фианит, стабилизированный диоксид циркония (СДЦ), широко используется при изготовлении различных оптических приборов, имеет коэффициент пропускания около 75% в диапазоне длин волн 400–5000 нм и рассматривается как один из возможных материалов «первого» (обращенного к плазме) окна, защищающего зеркало системы сбора диагностики томсоновского рассеяния лазерного излучения в диверторе (ДТР) от осаждения продуктов эрозии контактирующих с плазмой материалов в международном термоядерном экспериментальном реакторе (ИТЭР) [1, 2]. Ранее, для удаления пылевых и пленочных осадений с поверхности оптических элементов систем диагностики ИТЭР предлагали использовать специально организованные чистящие разряды [3].

Целью нашей работы было исследование стойкости СДЦ в условиях чистящего разряда, в котором, при периодических чистках, будет распыляться не только загрязняющая окно пленка, но и сам материал защитного окна.

Образцы СДЦ были поставлены Физико-техническим институтом им. А.Ф. Иоффе РАН и представляли собой плоскопараллельные полированные пластины размером 10x10x1 мм³. Дифракция рентгеновских лучей на отражение показала, что образцы имели кубическую структуру. Элементный состав, по данным рентгеноспектрального микроанализа, был определен в атомных долях как $O_{0,6604}Zr_{0,2585}Y_{0,0811}$, что близко к стехиометрическим отношениям в ZrO_2 и Y_2O_3 при отношении $Y/Zr = 18$ мол. %.

Эксперименты по влиянию чистящего разряда на СДЦ проводили в скрещенных разрядах постоянного тока 30 мА в кварцевой трубке диаметра 1,9 см и асимметричном высокочастотном (ВЧ) разряде частотой 13,56 МГц и мощностью 50 Вт в D_2 и He при давлении 15 Па. ВЧ разряд создавал смещение над поверхностью образцов –300 В, то есть, энергия ионов не превышала 300 эВ. Плотность ионного тока при ВЧ смещении непосредственно не измеряли. Эту величину определили в дополнительных экспериментах по распылению Al, которая оказалась равной 18,6 А/м² или $11,6 \times 10^{19}$ ион/м²с. При такой плотности тока начальная скорость распыления

СДЦ в D_2 и He составляла около 40 нм/час, однако через 1,5 часа уменьшалась до 28 и 1,3 нм/час в He и D_2 соответственно.

Образцы приобретали желтовато-коричневый оттенок. На оптических спектрах наблюдалось уменьшение пропускания в диапазоне 400-600 нм, причем, для облученных в D_2 плазме образцов, потемнение было более значительным. Отжиг образцов в воздухе в течение 0,5 часа при 250 °С восстанавливал оптический спектр пропускания до исходного.

Экспозиция образцов в плазме положительного столба тлеющего разряда постоянного тока в D_2 , при величине плавающего потенциала 17 эВ и плотности ионного тока 1,2 А/м², в течение одного часа также приводила к появлению окраски. Температура стенки не превышала 70 °С. При повышении температуры до 250–300 °С на поверхности образцов появлялись желто-коричневые участки, тогда как спектр светлых участков не отличался от исходного. Последующий отжиг тех и других образцов в воздухе в течение 0,5 часа при 250 °С восстанавливал пропускание до исходного.

Нагрев образцов СДЦ в положительном столбе разряда в D_2 при температурах 600 и 1000 °С также вызывал появление окраски, однако она не исчезала при последующем отжиге в воздухе при 250 °С. Увеличение пропускания при отжиге в воздухе наблюдалось лишь при температурах 800–1000 °С.

Следует обратить внимание, что во всех случаях экспозиции в D_2 плазме в течение одного часа и более, в положительном столбе при плавающем потенциале без нагрева и с нагревом, а также при ВЧ смещении –300 В, спектры пропускания образцов совпадали; на длине волны 500 нм пропускание снижалось с 75 до 70%. Исключение составляли температуры 250–300 °С, при которых на поверхности наблюдалась неоднородная окраска.

По изложенным результатам можно заключить, что использование чистящего разряда не влияет на коэффициент пропускания света при длинах волн в окрестности 1000 нм, то есть, СДЦ может быть материалом окна для ближнего инфракрасного излучения. На длине волны 500 нм пропускание уменьшается на 5% при времени экспозиции от 1 до 8 часов воздействия чистящего разряда. Этот спектр может быть стабилизирован отжигом СДЦ в D_2 плазме при температурах выше 600 °С. Вместе с тем, за рамками данной работы остались такие существенные факторы как радиационные повреждения материала и многократное осаждение и распыление бериллия, которые совместно с влиянием чистящего разряда могут радикально изменить окончательные результаты и выводы о пригодности СДЦ в качестве защитного окна.

Список литературы

1. Mukhin E.E. et al. Integration of Thomson scattering and laser-induced fluorescence in ITER divertor // Nucl. Fusion 2019.V 59. 086052
2. Razdobarin A.G. et al. “Dielectric windows as front-end diagnostic elements in ITER” Synopsis of 27th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2018), CN-258, 22–27 October 2018, Gandhinagar, India.
3. Moser L. et al. Plasma cleaning of ITER first mirrors // Physica Scripta. 2017. V. 2017. No T170. P. 1-7.

V.KH. ALIMOV^{1,2,3}, Y. HATANO⁴, R.KH. ZALAVUTDINOV¹

¹A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Moscow, Russia

²National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

³National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

⁴Hydrogen Isotope Research Center, University of Toyama, Toyama, Japan

MODELING OF HYDROGEN ISOTOPE TRAPPING IN SELF-DAMAGED TUNGSTEN

As a material for plasma-facing components in future fusion reactors, tungsten (W) will be subjected to intensive fluxes of energetic deuterium (D) and tritium (T) as well as 14 MeV neutrons (n). One of the ways to investigate the influence of n-induced defects on the hydrogen isotope inventory is to simulate displacement damage in tungsten using irradiation with energetic ions.

In the last decade, a number of studies have been carried out [1-5] in which the concentration of deuterium [1-4] and tritium [5] in the damage zone of tungsten samples, previously damaged by 20 MeV W ions to damage levels of 0.23 and 0.41 displacements per atom (dpa), was determined.

At relatively low temperatures of hydrogen loading, traps are fully occupied by H. However, if the temperature is sufficiently high to attain trapping-detraping equilibrium, the probability of trap occupancy by hydrogen sensitively depends on the concentration of H atoms in a solid solution state. Note that speaking of hydrogen (H) we also mean hydrogen isotopes such as deuterium and tritium. The fraction of traps, θ_t , occupied with hydrogen at temperature T is expressed as

$$\theta_t/(1 - \theta_t) = \theta_L \exp(E_{\text{bin}}/k_{\text{Bol}}T), \quad (1)$$

where θ_L is the fraction of interstitial sites occupied with hydrogen (solid solution state), E_{bin} is the binding energy (the enthalpy difference between H atom in a solid solution state and in a trapped state), and k_{Bol} is the Boltzmann constant [6]. This means θ_t varies with the H concentration in the solid solution state, C_{SS} , being proportional to θ_L . Note that

$$C_{\text{SS}} = C_L \theta_L, \quad (2)$$

where C_L is the concentration of interstitial sites.

Under exposure to H₂ gas, C_{SS} is determined by Sieverts' law:

$$C_{\text{SS}} = S_0 \exp(-E_S/k_{\text{Bol}}T) P^{1/2}, \quad (3)$$

where S_0 is the solubility constant, E_S is the heat of solution, and P is the H₂ pressure.

Under exposure to H plasma, C_{SS} is determined by the balance between penetrating flux Γ_{in} and recycling flux Γ_{rec} of hydrogen. In the first approximation, $\Gamma_{\text{in}} = \Gamma_{\text{rec}} = k_r C_{\text{SS-S}}^2$ in a steady state where $C_{\text{SS-S}}$ is the concentration of solute H beneath the surface and k_r is the recombination rate coefficient. Hence, $C_{\text{SS-S}} = (\Gamma_{\text{in}}/k_r)^{0.5}$.

$$(4)$$

Normalizing the concentration of hydrogen and the concentration of traps with the atomic density of tungsten, equation (1) can be modified as

$$\theta_t = \frac{C_{SS} \exp\left(\frac{E_{bin}}{k_{Bolt} T}\right)}{1 + C_{SS} \exp\left(\frac{E_{bin}}{k_{Bolt} T}\right)}. \quad (5)$$

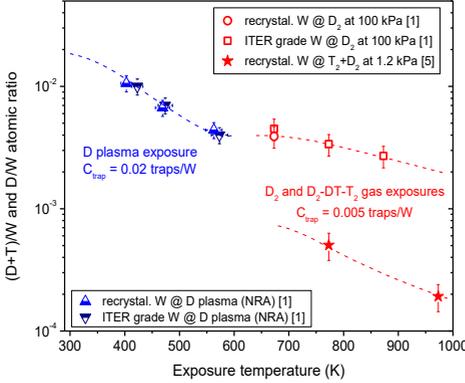


Figure 1. The hydrogen isotope concentration in the damage zone of self-damaged W samples exposed (i) to D₂ gas at a pressure of 100 kPa [1], (ii) to D₂-DT-T₂ gas mixture with a tritium content of 6% at a total gas pressure of 1.2 kPa [5], and (iii) to low-energy (≤ 380 eV), low-flux D plasma [1], as a function of the gas/plasma exposure temperature.

Under the assumption that one trap captures one hydrogen atom, the concentration of trapped hydrogen, C_H (in units of the H/W atomic ratio) can be expressed as $C_H = \theta_t C_{trap}$, where C_{trap} is the concentration of traps.

Measured values of the D concentration in the damaged W samples exposed to D₂ gas at 100 kPa and temperatures ≥ 673 K are well described by equation (5) using the binding energy of deuterium in the ion-induced traps $E_{bin} = 1.40$ eV and the concentration of traps $C_{trap} = 0.005$ traps/W (Fig. 1).

In case of the low-flux D plasma exposure [1], an implantation flux of D particles (the penetrating flux Γ_{in}) was estimated to be 2×10^{18} D/m²s [5].

According to Pick and Sonnenberg [7], the recombination rate coefficient $k_r = \chi \mu / S^2$, where the solubility $S = S_0 \exp(-E_S / k_{Bolt} T)$, $\mu = 1 / \sqrt{2\pi m k_{Bolt} T}$ (m is the mass of hydrogen isotope molecule, for deuterium $m = 6.689 \times 10^{-27}$ kg, and $k_{Bolt} = 1.3806 \times 10^{-23}$ J K⁻¹), and the sticking probability $\chi = \chi_0 \exp(-2E_{dis} / k_{Bolt} T)$ (E_{dis} is the activation energy for hydrogen dissociation).

To fit the calculated values to the experimental data obtained after irradiation with low-energy, low-flux D plasma [1] (Fig. 1), the following parameters were used: in the temperature range from 300 to 600 K the binding energy E_{bin} varied from 1.278 to 1.303 eV (Fig. 2), the concentration of traps $C_{trap} = 0.02$ traps/W, the pre-exponential sticking coefficient $\chi_0 = 5 \times 10^{-9}$, and the activation energy for hydrogen dissociation $E_{dis} = 2.5$ eV.

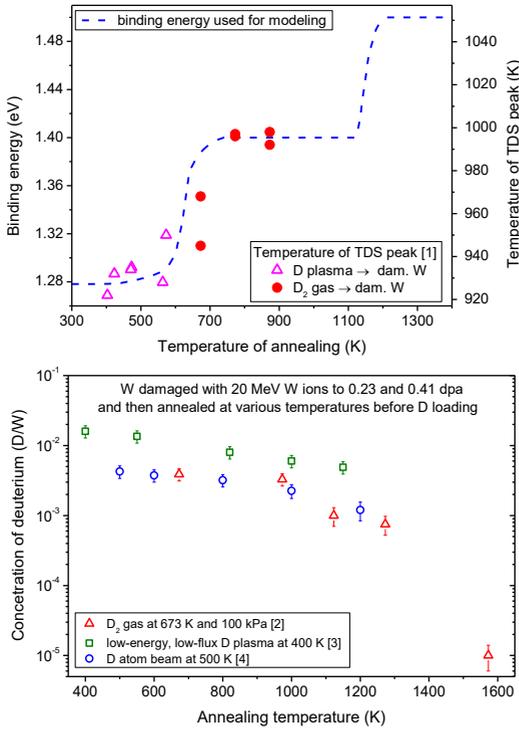


Figure 2. Dependence of the binding energy of deuterium atoms with trapping sites, E_{bin} , for the self-damaged W samples as a function of annealing temperature. A sharp increase in the binding energy in the temperature range from 1123 to 1200 K is explained by the formation of cavities at stage V of defect recovery and an increase in the binding energy for D atom trapped at the inner wall of a void.

Figure 3. Concentration of deuterium (in units of the D/W atomic ratio) trapped in the damage zone of self-damaged W annealed in vacuum at various temperatures for 1 h [3, 4] and 6 h [2] followed by exposure (i) to D₂ gas at a pressure of 100 kPa and a temperature of 673 K for 10 h [2], (ii) to low-energy (15 eV) and low-flux (5×10^{19} D/m²s) D plasma at 400 K to a fluence of 1×10^{25} D/m² [3], and (iii) to low energy (0.2 eV) neutral D atoms at flux of 2.6×10^{19} D/m²s for 144 h at 500 K [4].

After exposure of the W-ion-damaged W samples to both the low-energy, low-flux D plasma at the sample temperatures ranging from 403 to 573 K and D₂ gas at 673 and 773 K, single thermal desorption peaks were observed in a rather narrow temperature range from 922 to 998 K (Fig. 2). This fact with some caution suggests that the binding energy of deuterium in the ion-induced traps, which were subjected to temperature effects when exposed to low-energy, low-flux D plasma and D₂ gas, increases from 1.278 to 1.40 eV with increasing the sample temperature from 300 to 973 K. A sharp increase in the binding energy in the temperature range from 1123 to 1200 K is explained by the formation of voids due to the thermal coarsening of vacancy clusters.

In the case of annealing of the displacement-damaged W samples with subsequent exposure to D₂ at 673 K and 100 kPa [2], the concentration of traps, C_{trap} , was determined using equation (5), the solubility parameters, and the binding energies E_{bin} shown in Fig. 3. The concentration of traps in annealed self-damaged W samples, estimated by D₂ gas exposure, is shown in Fig. 4, as a function of annealing temperature.

Using the concentration of traps $C_{\text{trap}} = 0.005$ of traps/W at the annealing temperature of 800 K as the reference one and using equation (5), we determined the concentration of deuterium in the solid state, C_{SS} , for the case of exposure to D atoms at 500 K [4], at which the concentration of traps in the case of D atom exposure would be equal to the reference value. After that, we use this concentration C_{SS} to calculate the concentration of traps for other annealing temperatures selected in [4] (Fig. 4). Thus, it was estimated that in the case of exposure of the displacement-damaged W samples to low energy (0.2 eV) neutral D atoms at flux of 2.6×10^{19} D/m²s at 500 K the concentration of D atoms in the solid solution state $C_{\text{SS}} = 3.7 \times 10^{18}$ D/m³.

A similar processing of experimental data was carried out for the case of exposure of displacement-damaged and annealed W samples to the D plasma at 400 K with a flux of 5×10^{19} D/m²s [3]. In this case, the concentration of deuterium in the solid solution state was chosen equal to $C_{\text{SS}} = 1 \times 10^{21}$ D/m³.

The data on the concentration of traps obtained from the above-mentioned processing of experimental data [2-4] are presented in Fig. 4.

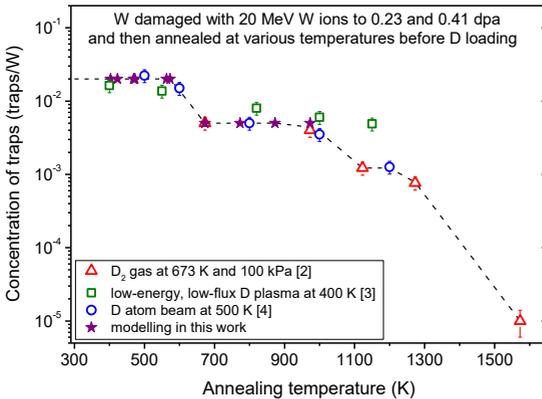


Figure 4. Concentration of traps in self-damaged W irradiated at room temperature with 20 MeV W ions to 0.23 dpa [2, 4] and 0.41 dpa [3] at the damage peak and then annealed in vacuum at various temperatures for 1 h [3, 4] and 6 h [2], as calculated using equation (5) and the D concentration data shown in Fig. 3. The concentration of traps used in modeling the accumulation of deuterium in this work is also shown in the Figure. The concentration of traps was determined under the assumption that one trap can capture one atom of the hydrogen isotope.

References

- [1] V.Kh. Alimov, et al., J. Nucl. Mater. 438 (2013) S959-S962.
- [2] Y. Hatano, et al., Nucl. Fusion 53 (2013) 073006.
- [3] E. Markina, et al., J. Nucl. Mater. 463 (2015) 329-332.
- [4] A. Založnik, et al., Phys. Scr. T 167 (2016) 014031.
- [5] V.Kh. Alimov, et al. (submitted to J. Nucl. Mater).
- [6] R. Gibala, A.J. Kumnick, in: R. Gibala, R.F. Hehemann (Eds.), Hydrogen Embrittlement and Stress Corrosion Cracking, 1984, pp. 61-77.
- [7] M.A. Pick, K. Sonnenberg, J. Nucl. Mater. 131 (1985) 208-220.

А.В. ГОЛУБЕВА¹, Б.И. ХРИПУНОВ¹, Н.П. БОБЫРЬ¹, Н.Н.

КОЛОБЫЛИНА¹, А.А. МЕДНИКОВ¹, В.Х. АЛИМОВ¹, В.М. ЧЕРНОВ²

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

² *АО Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. Академика А.А. Бочвара, Москва*

СЕЛЕКТИВНОЕ РАСПЫЛЕНИЕ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ

Ферритно-мартенситные стали с быстрым спадом наведённой активности (reduced activation ferrite-martensitic steels, RAFMS) – перспективные конструкционные материалы термоядерной энергетики. С некоторых пор рассматривают также возможность их применения в качестве обращённых к плазме материалов в не слишком энергонапряжённых областях термоядерной установки [1]. Базовый материал RAFMS – железо. В этих сталях присутствуют также 8-12 вес.% Cr и 1-2 вес. % W. Концентрации прочих элементов составляют доли вес. %. При ионном облучении RAFMS возможна ситуация, когда железо и хром распыляются, а вольфрам – нет. Это явление носит название селективного распыления. Таким образом в ходе распыления поверхность RAFMS может быть обогащена вольфрамом, что будет защищать её от дальнейшего распыления.

В данной работе образцы RAFMS Русфер и Еврофер облучались дейтериевой плазмой, преимущественно состоящей из ионов D⁺, с энергией 100 эВ/ион в диапазоне доз облучения 10²⁴÷10²⁶ D/м² при потоке 3·10²¹ D/м²с и температуре ~440 К. Коэффициент распыления определялся по потере массы образца. При указанных условиях коэффициенты распыления двух сталей близки и уменьшаются с ростом дозы облучения. В ходе распыления на поверхностях сталей Русфер и Еврофер образуются конусообразные структуры. С ростом дозы облучения эти структуры увеличивающиеся по высоте и объединяющиеся. Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия показывает обогащение этих структур вольфрамом и снижение в них концентраций хрома и железа. Тем самым в эксперименте наблюдалось селективное распыление компонентов RAFMS. По результатам спектроскопии резерфордовского обратного рассеяния (RBS) концентрация вольфрама на поверхности RAFMS растёт с ростом дозы облучения и при дозе 7·10²⁵ D/м² увеличивается в 10 раз по сравнению с начальной концентрацией и достигает 4÷6 ат. %. Обогащение поверхности вольфрамом, вероятно, является причиной снижения коэффициента

распыления с ростом дозы облучения. Данный эффект для стали Русфер наблюдался впервые.

Работа выполнена при поддержке НИЦ "Курчатовский институт" (приказ от 14.08.2019 №1805).

Список литературы

1. H. Bolt , V. Barabash ,G. Federici, J. Linke, A. Loarte, J. Roth, K. Sato, Part 1, “Plasma facing and high heat flux materials – needs for ITER and beyond”, J. Nucl. Mater., 2002, 307–311, 43–52

И.С. ПИМЕНОВ, С.В. НЕУДАЧИН, А.А. БОРЩЕГОВСКИЙ
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

СПОНТАННОЕ ПАДЕНИЕ Li-СОДЕРЖАЩЕЙ ЧЕШУЙКИ КАК ТРИГГЕР НЕЛОКАЛЬНОГО ПониЖЕНИЯ ПОТОКОВ ТЕПЛА И ЧАСТИЦ ПРИ КО+КО И КО+КОНТР ГЕНЕРАЦИИ ТОКА ЭЦ-ВОЛНАМИ В ТОКАМАКЕ Т-10

Различные триггеры ВТБ-событий (резкое уменьшение потоков тепла и частиц в области 40-60% от малого радиуса, было впервые обнаружено в разрядах токамака JT-60U [1] при обратном магнитном шире (RS)) были найдены ранее на токамаках JT-60U [1-4], Т-10 [5-7], а также на стеллараторе LHD [8]. В импульсах с обратным широм (RS) на JT-60U при НИ (нейтральная инжекция), возникали ВТБ события, триггерами которых являлись как приближение q_{\min} к низко-рациональным значениям или внешняя и внутренняя МГД-активность [1-3,6]. Также внешняя МГД-активность была триггером ВТБ событий на JT-60U в режимах с НИ при нормальном шире магнитного поля [4,6]. На Т-10, триггером ВТБ событий служило приближение плоского профиля q к 1 в центральной части плазменного шнура после полного [5] или частичного [6] выключения нецентрального ЭЦРН. Ещё одним примером возникновения ВТБ-события на Т-10 является случай без очевидной эволюции профиля q , в котором триггером было выключение сильного газонапуска в омическом режиме [7]. На LHD резкое уменьшение потока тепла при ЭЦРН было обнаружено после инжекции в плазму маленькой пеллеты C_8H_8 [8]. Возникновение ВТБ-события на LHD было очень чувствительно к изменениям параметров плазмы.

Рост T_e в центральной части плазмы на Т-10 с ЭЦРН был ранее обнаружен после инжекции средних размеров дейтериевой пеллеты, ионизирующейся во внешней половине объёма плазмы [9]. Похожее явление наблюдалось и при попадании карбоновой чешуйки в плазму на токамаке TFTR [10] в разрядах с нагревом нейтральным пучком. Несмотря на это, локальность или нелокальность скачка потока тепла электронов не была проанализирована в [9-10]. В работе [11] опубликован новый триггер нелокального понижения потока тепла и частиц в токамаках, которым является самопроизвольный влёт Li-содержащей чешуйки в режиме с одновременной ко+контр инжекцией ЭЦ-излучения. Данный режим является особенным [12] и именно лишь в нём наблюдалась спонтанные полунелокальные L-H и H-L переходы.

Подобное взаимодействие стенка-плазма наблюдалось и в других режимах T-10 ($R=150$ см, $a_{\text{лимитер}}=30$ см, W лимитер с литиевым покрытием). В частности, ниже приведён эксперимент с одновременной ко+ко генерацией тока двумя гиротронами (1.4 МВт). Новый пример взаимодействия стенка-плазма, проявляется в виде самопроизвольного попадания в плазму Li-содержащих чешуек с W-лимитера при различных мощностях ЭЦРН и различных направлениях генерации тока. В свою очередь попадание в плазму различного рода чешуек вызвано потоками тепла и частиц из плазмы на стенку, что есть пример взаимодействия плазмы с поверхностью. После ионизации Li-содержащей чешуйки на периферии плазмы, электронный тепловой поток резко уменьшается в области $0.2 < r/a < \approx 0.8-1$.

На Рис.1 представлена временная зависимость T_e (14 см), энергосодержания плазмы W_{pl} , центральной хордовой плотности электронов $N_{e \text{ line av}}(0)$ (измеренная с помощью микроволнового интерферометра) и спектроскопический сигнал однократно-ионизованного лития Li+1 в импульсе #72947 с падением литиевой чешуйки ($N_{e \text{ line av}}(0) = 2.1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, $I_p=240$ кА, $V_t=2.42$ Т, $q_L=3.5$). Оба гиротрона включились в момент времени $t=550$ мс, суммарная мощность СВЧ-излучения составляла $P_{hf}=1.4$ МВт. Разряд достигает квазистационарной стадии на 610 мс. В импульсе #72947 в момент времени $t=640$ мс на краю плазмы происходит ионизация литийсодержащей чешуйки, при этом значение $N_{e \text{ line av}}(0)$ начинает увеличиваться. Спектральная линия однократно-ионизованного лития сильно увеличивается в течение 2 мс.

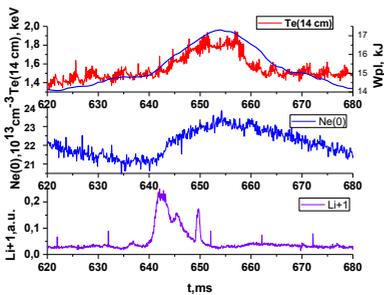


Рис.1. Временной ход $T_e(14 \text{ см})$, W_{pl} , $N_{e \text{ line av}}(0)$ и спектральной линии Li+1 для импульса #72947

Рисунок 2 показывает временную зависимость T_e в широкой области шнура. Рост T_e появляется в момент $t=640$ мс внутри широкой пространственной области, ограниченной радиусом плазмы $r \approx 20$ см. Спектральные оптические линии D_{β} (отражающая взаимодействие плазма-стенка) и атомарного вольфрама (распылённого с лимитера) начинают уменьшаться в это время.

На Рис.2 показана временная зависимость электронной температуры T_e на различных радиусах от времени на стороне слабого магнитного поля. Поскольку градиент T_e практически не изменяется во время ВТБ-события,

простое выражение позволяет нам вычислить скачок электронного потока тепла [1-4]:

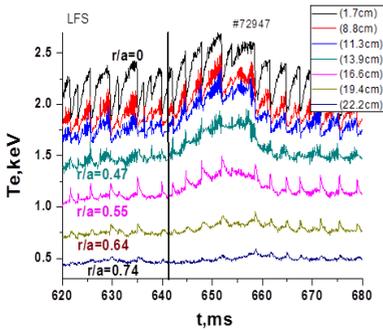


Рис.2. Временная эволюция T_e на различных радиусах для импульса #71834

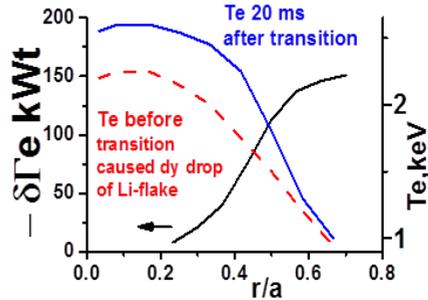


Рис.3. Профиль скачка электронного потока тепла (чёрная линия)

Полученный профиль n_e важен в нашем частном случае. Профиль $\delta\Gamma_e(r)$ полученный с помощью Ур.1 изображён на Рис.3 совместно с изменением профиля электронной температуры. Мы не ожидаем значительного уменьшения значения $-\delta\Gamma_e(r)$ на периферии, т.к. T_e мало, а плотность растёт. Фаза пониженного транспорта длится 20 мс (T_e и плотность начинают уменьшаться после $t=655$ мс, смотри Рис.1,2) и это время равно значению энергетического времени жизни плазмы. Измерения энергосодержания плазмы W_{dia} усреднены во времени (Рис.1). Значение W_{dia} увеличивается после ВТБ-события с dW_{dia}/dt равным ≈ 0.17 МВт, при этом величина τ_E вырастает на $\approx 12\%$. И наоборот, W_{dia} начинает уменьшаться с dW_{dia}/dt равной ≈ -0.17 МВт после разрушения улучшенного удержания на $t=655$ мс. Накопление примесей отсутствует.

В данной аннотации описан новый пример взаимодействия плазмы с поверхностью на токамаке Т-10 с вольфрам-литиевой диафрагмой при ко+ко генерации тока ЭЦ-волнами на второй гармонике Х-моды в центральной части плазменного шнура. Ионизация Li-содержащей чешуйки на границе шнура вызывает рост электронной температуры и плотности (типичный случай для различных импульсов с 1.4 МВт мощностью ЭЦРН) во внутренней части плазмы. Электронный тепловой поток резко Ому уменьшается в области $0.2 < r/a < \approx 0.8-1$, как и при инъекции C_8H_8 пеллеты на

LHD [8]. Величина энергетического времени жизни резко возрастает на ~12%. Иногда при ионизации чешуйки наблюдается и некоторый рост линий кислорода и углерода, что, по-видимому, означает присутствие в составе чешуйки не только чистого лития но и Li_2CO_3 или Li_2O , обнаруженных на лимитере [13]. После переходной фазы, ВТБ появляется в области, сосредоточенной между пространственными позициями коэффициента запаса устойчивости $q=1$ и $q\approx 1.4$ и, что типично, существует в течение времени, сравнимого с временем жизни плазмы. На установке T-10 впервые обнаружен нелокальный спад потоков тепла и частиц, триггером которого является падение Li-содержащей чешуйки, и по нашим сведениям, ранее не наблюдавшееся на установках типа токамак и стелларатор.

Мы выражаем благодарность членам команды T-10, принимавших участие в эксперименте, описанном в настоящей аннотации. Работа была выполнена в рамках контракта с корпорацией РОСАТОМ.

Литература

- [1] Neudatchin S V, Takizuka T, Shirai H, et al., 1999 *Pl.Ph.Contr.Fus.* **41** L39
- [2] Neudatchin S. V., Takizuka T., et al., *Pl.Ph.Contr.Fus.* **44** A383 (2002)
- [3] Neudatchin S V, Takizuka T, Hayashi H, et al, 2004 *Nucl. Fusion* **44** 945
- [4] Neudatchin S.V., Takizuka T., et al 2003 *J. Pl.Fus.Res.* **79** 1218
- [5] Neudatchin S V., Inagaki S, et al. 2004 *J. Pl. and Fus. Res. Ser.* **6** 134
- [6] Neudatchin S V, Takizuka T, et al 2006 *Fusion Energy (Proc 21th IAEA Fusion Energy Conf. Chengdo 2006) EXP1/08*
- [7] Neudatchin S.V., Shelukhin D.A, et al, 2017 *J. Ph.: Conf. Ser.* **907** 012015
- [8] Tamura N. et al, *Phys. of Plasmas* 2005 12 110705
- [9] Kapralov V.G. et al, *Tech.Phys. Lett.* 1995. Vol. **21**. P. 57.
- [10] M.W. Kissick et al 1996 *Nucl. Fusion* **36** 1691.
- [11] S V Neudatchin, I S Pimenov. et al 2019 *J. Phys.: Conf. Ser.* **1383** 012005
- [12] Borshegovskiy A.A., Neudatchin S.V., Pimenov I.S. et al, 2019 *EPJ Web of Conf.* **203**, 02004
- [13] Krupin V. A. et al 2020 *Plasma Phys. Control. Fusion* 62 025019

В.П. БУДАЕВ^{1,2}, С.Д. ФЕДОРОВИЧ¹, И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ³, А.В. ВЕРТКОВ³, А.В. КАРПОВ², М.К. ГУБКИН¹, ВАН ООСТ Г.^{1,4}, Ю.В. МАРТЫНЕНКО², П.Г. ФРИК¹, Е.В. СВИРИДОВ¹, Д.Н. ГЕРАСИМОВ¹, А.В. ЛУБЕНЧЕНКО¹, А.В. ЗАХАРЕНКОВ¹, А.Ю. МАРЧЕНКОВ¹, М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ¹, И.В. ВОЙНКОВА¹, А.В. ЛАЗУКИН¹, А.А. КОНЬКОВ¹, К.А. РОГОЗИН¹, Г.Б. ВАСИЛЬЕВ¹, З.А. ЗАКЛЕЦКИЙ¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва

³АО Красная звезда, Москва

⁴Гентский университет, Гент

ИССЛЕДОВАНИЕ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЛИТИЕВОЙ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОЙ СИСТЕМЫ СТАЦИОНАРНОЙ ПЛАЗМОЙ В УСТАНОВКЕ ПЛМ

Жидкометаллические литиевые капиллярно-пористые системы (КПС) [1—3] рассматриваются как наиболее перспективные для решения проблемы обращённых к плазме компонентов камеры термоядерного источника нейтронов (ТИН) и реактора ДЕМО. Основными преимуществами КПС по сравнению с твёрдыми материалами являются их устойчивость к деградации свойств и способность к самовосстановлению поверхности на основе капиллярных сил в условиях нормального разряда, а также ЭЛМов и срывов в токамаке. Верхний предел тепловых нагрузок для КПС с литием в стационарном режиме эксплуатации близок к 20 МВт/м². В плазменной установке ПЛМ [4] были проведены плазменные испытания КПС с литием. Эти КПС изготовлены по образцу литиевых КПС, используемых в экспериментах на токамаках Т-10, Т-11М. В экспериментах испытана литиевая КПС в виде мата между молибденовых сеточек и закреплённая в молибденовом модуле диаметром 35 мм, Рис. 1а.

Литиевая КПС испытана в установке ПЛМ в течение 3 часов в гелиевом разряде с параметрами плазмы: плотность около 1×10^{12} см⁻³, температура электронов 2-5 эВ с фракцией горячих электронов до 50 эВ. Модуль был помещён в плазменный разряд вблизи анода, Рис. 1б. Плазменная нагрузка на поверхность КПС была на уровне 1 МВт/м². Нагрев КПС обеспечивался подачей отрицательного напряжения на модуль КПС относительно стенки камеры в диапазоне от -40 Вольт до +10 Вольт, при котором на поверхность поступал поток горячих электронов из плазмы, вызывающий нагрев поверхности. В течение экспозиции оптические и пирометрические наблюдения регистрировали нагрев КПС в диапазоне от 100 °С до 580 °С.

Оптическое наблюдение разряда вблизи поверхности литиевой КПС регистрировало изменение цвета разряда от синего до красного, Рис. 2а-г, что свидетельствовало об интенсивном потоке лития с поверхности КПС в плазму. Оптические спектры излучения из плазмы содержали линии однократно ионизованных ионов лития при испытаниях литиевой КПС.

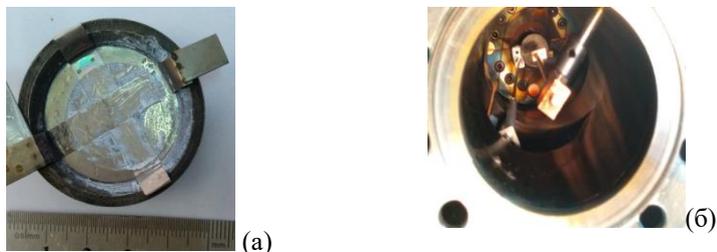


Рис. 1. Литиевая КПС в молибденовом модуле (а) в установке ПЛМ (б)

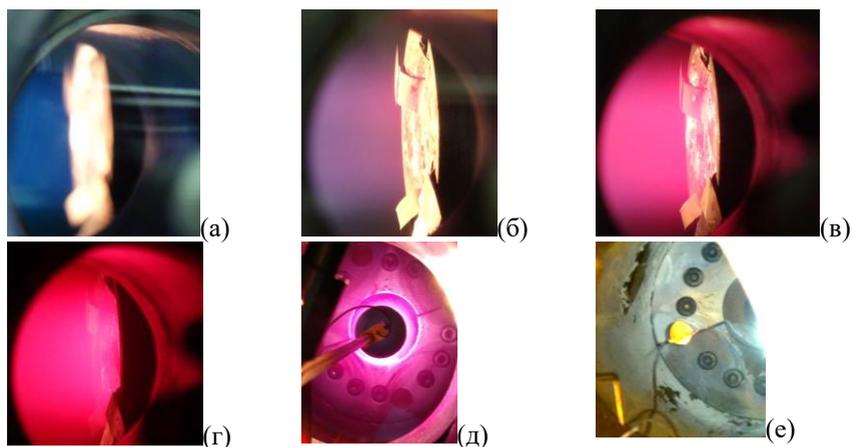


Рис. 2. Оптическое излучение плазмы при разных температурах поверхности мишени: (а) -100 °С; (б) - 190 °С; (в) - 400 °С; (г) -580 °С; (д) – осаждение лития в виде капель на диафрагме и стенке; (е)- литиевые пленки на стенке камеры с признаками отслоения и дефрагментации

На спектре, Рис. 3, линии Li I и Li II свидетельствуют о поступлении лития в плазму. На спектре отсутствуют линии молибдена.

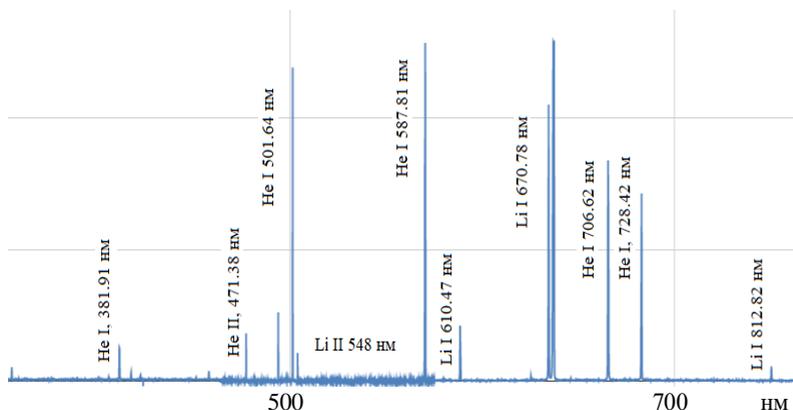


Рис. 3. Оптический спектр излучения плазмы в ПЛМ с литиевой КПС

Зарегистрировано переосаждение испаренного с поверхности КПС лития на стенки камеры ПЛМ в виде капель, Рис. 2д. После испытаний при открытии камеры на атмосферу через ~100 часов этот переосажденный литий на стенках сформировал пленку из литиевых оксидно-углеродных композитов белого цвета, Рис. 2е, которые дефрагментируются со временем под тепловой нагрузкой.

За время плазменной экспозиции ~200 минут литий из КПС в значительном количестве испарился в плазму и поступил через плазму на стенки диафрагмы и камеры. При этом не наблюдалось катастрофического изменения параметров плазменного разряда ПЛМ.

Инспекция модулей КПС после испытаний не выявила повреждений молибденовых сеток, Рис. 4. Это свидетельствует о стойкости материалов и, возможно, об эффекте экранирования поверхности КПС слоем испаренного в плазму лития путем переизлучения.

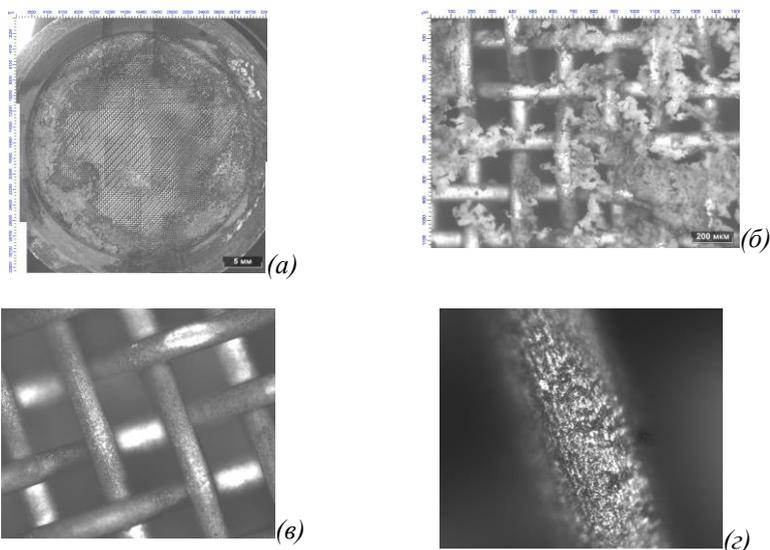


Рис.4. Поверхность литиевой КПС после облучения 200 минут плазмой в ПЛМ: (а) – общий вид; (б) – сетка молибденовая с остатками литиевого материала; (в) – сетка молибденовая после испарения лития из КПС; (г) – поверхность проволоки сетки литиевой КПС

Проведенный эксперимент является основанием для дальнейшего проведения широкомасштабных исследований стойкости КПС при стационарных мощных плазменных нагрузках и оценки перспективы использования КПС в термоядерных установках и реакторах.

Работа на ПЛМ выполнена при поддержке гранта РФФ 17-19-01469, тепловые испытания поддержаны грантом РФФИ 19-29-02020, изготовление АСНИ поддержано Мегагрантом РФ № 14.Z50.31.0042.

1. S.V. Mironov et al. J. Nucl. Mater. 2013. V. 438. P. 224.
2. S.V. Mironov et al. Fus. Eng. and Des. 2012, V. 87, P. 1747.
3. И.Е. Люблинский, А.В. Вертков, В.В. Семенов. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2015. Т. 38. № 1. с. 7.
4. В.П. Будаев. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2015. Т. 38. № 4. С. 5.
5. В.П. Будаев и др. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2017. Т. 40. №3. 23.

С.Д. ФЕДОРОВИЧ¹, А.В. КАРПОВ², В.П. БУДАЕВ^{1,2}, С.А. ГРАШИН²,
М.К. ГУБКИН¹, А.П. СЛИВА¹, Ю.В. МАРТЫНЕНКО²,
А.Ю. МАРЧЕНКОВ¹, М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ¹, З.А. ЗАКЛЕЦКИЙ¹, В. ЧАН
КУАНГ¹, Г.Б. ВАСИЛЬЕВ¹, К.А. РОГОЗИН¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ ЗАЩИТНОЙ ГРАФИТОВОЙ ОБЛИЦОВКИ КАМЕРЫ ТОКАМАКА Т-15МД СТАЦИОНАРНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ НАГРУЗКАМИ В УСТАНОВКЕ ПЛМ И МОЩНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ

Тепловые нагрузки на лимитеры и пластины дивертора в крупномасштабном токамаке могут достигать $\sim 2\text{--}5$ МВт/м² и более, приводя к повышению температуры пластин облицовки камеры токамака в среднем до ~ 1000 °С и более; в срывах и ЭЛМах импульсные кратковременные нагрузки на диверторные пластины будут достигать величины субгигаваттного масштаба – более 0,2 ГВт/м² (см. [1] и ссылки там), что будет вызывать периодические повышения температуры материала до более высокого значения. При использовании графита в качестве материала облицовки компонент вакуумной камеры в токамаке Т-15МД такие мощные нагрузки могут привести к перегреву поверхности, эрозии, растрескиванию и даже разрушению (см. [1,2]). При циклических мощных тепловых нагрузках при воздействии ЭЛМов температура поверхности графитовых пластин может приближаться к температуре сублимации. Поэтому необходимо оценить последствия возможных эффектов интенсивной эрозии поверхностных слоев графитовых материалов, использованных для облицовки компонентов камеры токамака Т-15МД. Определение всех характеристик стойкости графита при мощных стационарных плазменно-тепловых нагрузках важно также для принятия решений по выбору конструкции первой стенки в термоядерных установках следующего поколения, планируемых к сооружению в России (ТИН, ДЕМО). Строгая классификация процессов разрушения графита при мощных плазменно-тепловых нагрузках в термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы (токамаках, стеллараторах и линейных установках) до настоящего времени окончательно не выработана. Это связано с относительно небольшим объёмом данных, полученным в экспериментах на термоядерных установках при мощных нагрузках более 2 МВт/м².

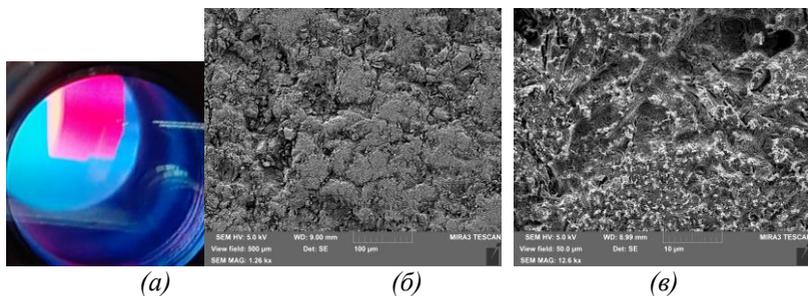


Рис.1. а - Испытание графита в плазме ПЛМ, б, в - СЭМ микрофотографии поверхности после 200 минут плазменного облучения

Для моделирования стационарных плазменных нагрузок на графитовый материал в данной работе использована плазменная установка ПЛМ [3] с параметрами плазмы, релевантными периферийной плазме токамака Т-15МД. Для тепловых испытаний графита, моделирующих нагрузки при ЭЛМах в Т-15МД, в работе использована электронно-лучевая установка, обеспечивающая мощные пучковые нагрузки до ~ 380 МВт/м².

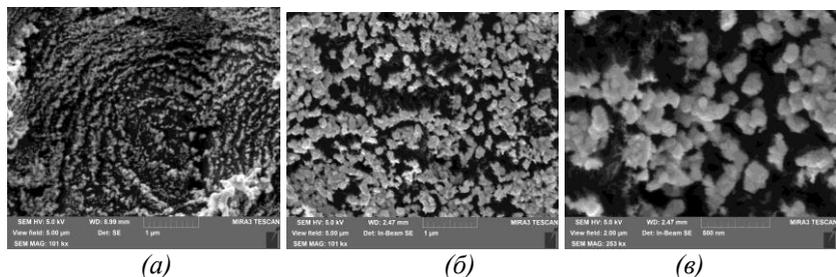


Рис.2. Поверхность после плазменных испытаний в ПЛМ: СЭМ микрофотографии в области обработки плотной плазмой и вне зоны интенсивной обработки

В плазменной установке ПЛМ проведено облучение графитовой облицовки камеры токамака Т-15МД стационарными плазменными нагрузками в течение более 200 минут, Рис.1, моделирующими условия в периферийной и диверторной плазме токамака. При испытаниях плазменными нагрузками 2 МВт/м² температура поверхности графитовых образцов достигала 1288 °С. Такая нагрузка не приводит к растрескиванию, изменению рельефа и распылению графита. Проведен анализ морфологии и

структуры поверхности с помощью методов сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Эрозия поверхности была незначительная. Длительные плазменные нагрузки приводят к эрозии и переосаждению материала и, в результате, к росту на поверхности слоя пористых углеродных структур с иерархической гранулярностью – кораллообразных, Рис.2. Такие пористые слои с фрактальной структурой наблюдались ранее в экспериментах на токамаках [4,5]. Скорость роста структур не превышает 1—2 мкм/час при максимальной температуре нагрева образцов и уменьшается в ~10 раз при 800 °С.

Проведены исследования графитовых образцов в электронно-лучевой установке пучком ускоренных 60 кэВ электронов потоками 12 МВт/м², 24 МВт/м², 387 МВт/м², что моделирует действие на графитовую облицовку камеры переходных процессов, ожидаемых в токамаке Т-15МД, в том числе ЭЛИМов. Максимальные значения температуры поверхности образцов достигали величины от 1600 °С до 2600 °С.

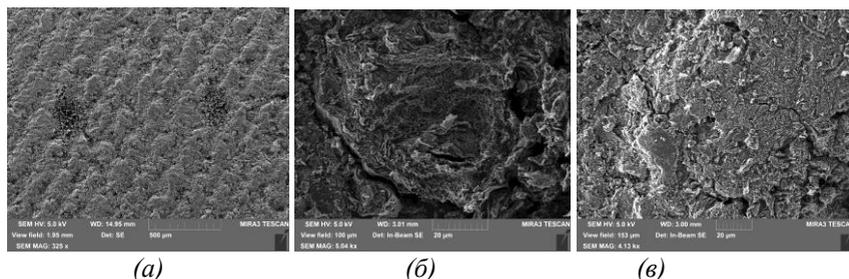


Рис.3. Испытание графита в электронно-лучевой установке пучком ускоренных 60 кэВ электронов потоками 387 МВт/м²: СЭМ микрофотографии поверхности. а- две зоны действия пучка, б - в зоне действия пучка, в- за его пределами

Проведен анализ растрескивания тайлов токамака Т-15МД, определен характер модификации поверхности и эрозийных свойств графита. Облучение образцов электронными пучками с потоками энергии меньше 12 МВт/м² не приводит к изменению поверхности графита. Разогрев поверхности образца до температур выше 2500 °С приводит к растрескиванию поверхности по межзерненным границам. В экспериментах с электронно-лучевой нагрузкой 24 МВт/м² температура поверхности графитового образца достигала 2600 °С и зарегистрировано селективное испарение материала с поверхности – начало локальных процессов

сублимации. Поток энергии 24 МВт/м^2 при облучении электронными потоками является пороговым, выше которого зарегистрированы разрушения поверхности графитовых тайлов.

Высокие градиенты температуры привели к растрескиванию материала по границам зерен (Рис.3б) в областях обработки пучком и на поверхности на расстоянии до 100 мкм от края кратера. Ширина трещин достигает 10 мкм в пятне обработки и ~ 5 мкм за его пределами. Длина трещин - до 150 мкм. При 387 МВт/м^2 скорость удаления материала с поверхности образца - 175 мкм/с .

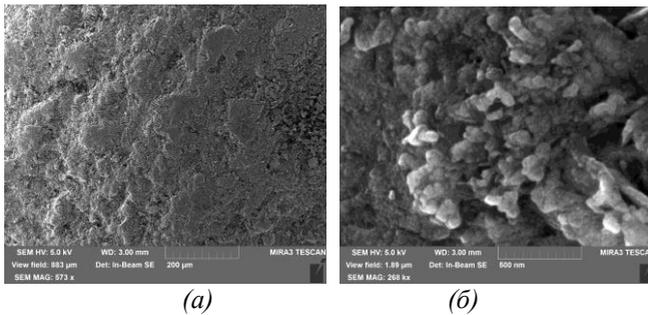


Рис.4. Испытание графита в электронно-лучевой установке потоками 387 МВт/м^2 . СЭМ микрофотографии переосажденных пористых слоев

На основании проведенных экспериментальных работ сделан вывод о возможности использования исследованного графита для эксплуатации в токамаке Т-15МД.

Работа выполнена в рамках договора №09-03/223/74 между НИЦ «Курчатовский институт» и НИУ «МЭИ», эксперименты на ПЛМ поддержаны грантом РФФ 17-19-01469, испытание электронными пучками поддержано грантом РФФИ 19-29-02020, изготовление АСНИ поддержано Мегагрантом РФ № 14.Z50.31.0042.

1. В.П. Будаев. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2015. Т. 38. № 4. С. 5.
2. A. Zhitlukhin et al. J. Nucl. Mater. 2007. 363-365. 301.
3. В.П. Будаев и др. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2017. Т. 40. 3. 23.
4. В.П. Будаев и др. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2008. Т. 31. 3.16.
5. V.P. Budaev et al. JETP Letters, 2012. 95 (2). 78.

С.Д. ФЕДОРОВИЧ¹, В.П. БУДАЕВ^{1,2}, Ю.В. МАРТЫНЕНКО²,
А.В. КАРПОВ², М.К. ГУБКИН¹, А.Ю. МАРЧЕНКОВ¹, Д.Н. ГЕРАСИМОВ¹,
М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ¹, А.В. ЛАЗУКИН¹, З.А. ЗАКЛЕЦКИЙ¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва

РОСТ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ВЫСОКОПОРИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ОБРАЗЦАХ СТАЛИ ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ В УСТАНОВКЕ ПЛИМ

Плазменное облучение металлов (вольфрама, молибдена, титана и др.) в гелиевом разряде приводит к росту наноструктурированной поверхности [1, 2]. Для выявления универсальных механизмов роста наноструктурированной поверхности проводятся испытания с различными металлами, в том числе железа в составе стали.

Тестовые пластины из стали марки 08X18H10 (AISI 304) были облучены плазмой в стационарных гелиевых разрядах в установке ПЛИМ [3] длительностью 200 минут. Температура образца при облучении составляла 853°C, поток энергии гелиевой плазмы на образец составлял 179 кВт/м². Визуальный контроль после облучения выявил неравномерное потемнение поверхности образца. Поверхностные сформированные слои обладают механической стойкостью. Исследования, проведенные методом растровой электронной микроскопии, выявили рост конусных структур на поверхности образца (рис.1). Концентрация их на поверхности определяет цвет области образца: чем больше конусов, тем темнее область.

Высота конусов составляет ~10 мкм, диаметр основания ~ 3 мкм. Конусы с высотой менее 2 мкм, как правило, имеют нерегулярную форму. Все крупноразмерные конусы подобны друг другу и имеют одинаковый угол раствора конуса равный 18-20 градусов.

На рис.2 представлено изображение области с плотным расположением конусов на поверхности. При росте конусов происходит слияние оснований и образование «хребта» с множеством вершин. При плотном расположении конусы агломерируются в структуры, рис. 2б.

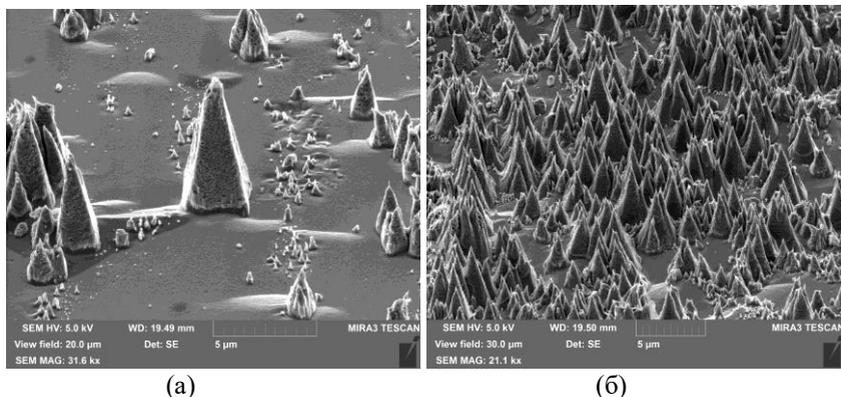


Рис.1. СЭМ микрофотографии конусов на поверхности образца железа после облучения в гелиевой плазме ПЛМ

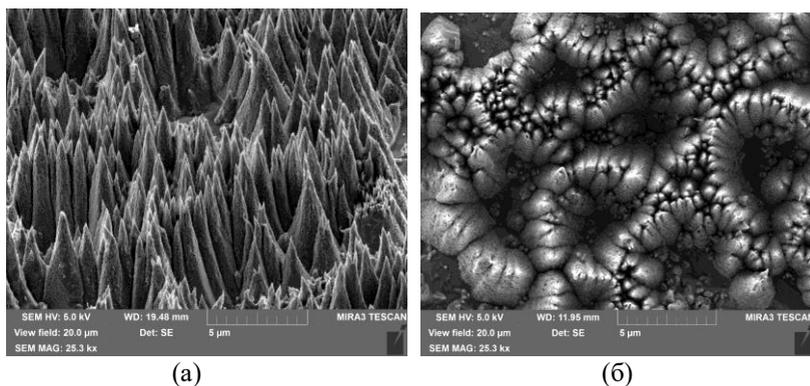


Рис.2. СЭМ микрофотографии области с большой концентрацией конусов. (а)- изображение под углом 48 градусов, (б)- вид сверху.

Изображения, полученные с поверхности областей с меньшей концентрацией конусов (сравни рис.1а и рис. 2а), подтверждают, что геометрические параметры конусов подобны. Угол раствора одинаков, не зависит от размера конуса; он определяется, по-видимому, механизмом роста.

Расположение конусов на поверхности - структурированное. Группы конусов образуют замкнутые геометрические контуры. Исследования в

областях с малой концентрацией конусов показали, что их рост начинается на границах зерен и в областях микродефектов на поверхности (рис.3а). В тоже время, не наблюдается рост конусов на гладких участках кристаллических зерен на начальных этапах роста. Возможно, неоднородности в зонах микродефектов на поверхности инициируют рост конусов.

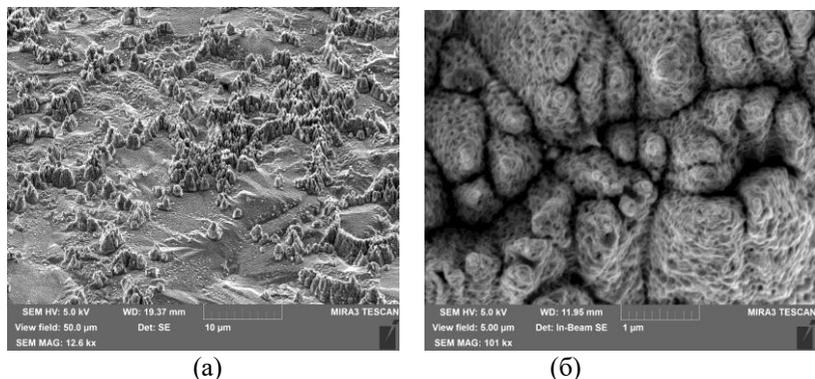


Рис.3. СЭМ микрофотографии: (а) области начального роста на поверхности образца железа после облучения в гелиевой плазме ПЛМ; (б) СЭМ микрофотография поверхности конусов с высоким разрешением.

Изображения поверхности конусов, полученные с помощью IN-BEAM SE детектора, представлены на рис.3б. Конусы состоят из материала образца, в конусах повышенное содержание железа и пониженное содержание хрома и никеля, рис.5. Конусы имеют высокопористую структуру поверхности с большим количеством пор. Подобная структура поверхности свидетельствует о том, что конусы не являются монокристаллическими или поликристаллическими структурами. То есть, механизм роста не идентичен механизму роста вискерсов. Микроскопические исследования поверхности образца у оснований конусов выявили сильную пористость, структура поверхности – «губчатая». Характерный размер пор – около 100 нм.

Максимальная энергия ионов гелия, приходящих на поверхность из плазмы, в эксперименте достигала 100 эВ, массивного распыления материала не наблюдалось, поэтому нельзя объяснить пористость поверхности и рост конусных структур только переосаждением распылённого материала. Для объяснения наблюдений следует применять

теорию Ю.В. Мартыненко [4], рассматривающую интенсивное движение адатомов по поверхности при мощном потоке гелиевой плазмы на поверхность. Этот механизм объясняет конусную форму полученных структур. Движение адатомов по шероховатым развитым поверхностям затруднено, что следует учитывать при интерпретации результатов. Облучение материалов плотными потоками плазмы при высоких температурах приводит к резкому увеличению подвижности адатомов и, возможно, к локальному распылению. Высвобождаемые атомы, двигаясь в области максимальных градиентов температур, создают на поверхности конусные пористые структуры.

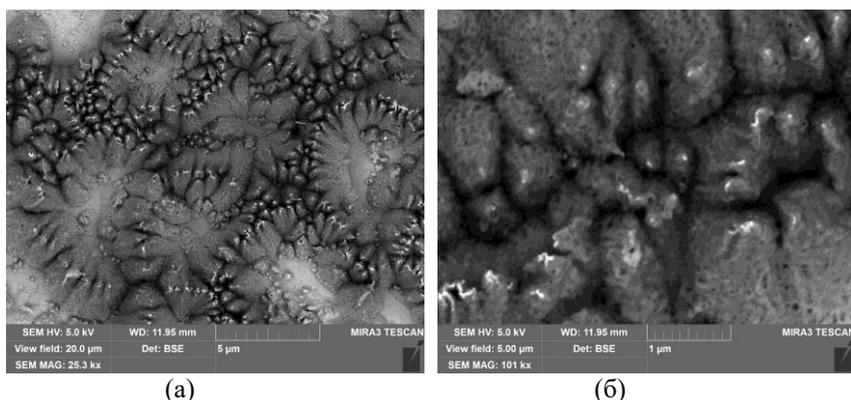


Рис.4. СЭМ микрофотографии конусов, полученные в BSE-детекторе

Работа поддержана грантом РФФ 17-19-01469, анализ материалов поддержан грантом РФФИ 19-29-02020, работы по созданию АСНИ на установке ПЛМ выполнены при поддержке Мегагранта РФ № 14.Z50.31.0042.

1. S. Kajita e a. Sci. Rep . 2018 . 8(1) 56.
2. В.П. Будаев. ВАНТ , Сер. Термоядерный синтез. 2015. Т. 38. № 4. С. 5.
3. В.П. Будаев и др. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2017. Т. 40.3. 23.
4. Ю.В. Мартыненко, М.Ю. Нагель, Физика плазмы 2012. Т. 38.1082.

Н.Н. АНДРИАНОВА¹, А.М. БОРИСОВ¹, А.В. МАКУНИН²,
Е.С. МАШКОВА², М.А. ОВЧИННИКОВ^{1,2}

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

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИОННО-ИНДУЦИРОВАННОГО НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ И ГОФРИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА

Ионно-плазменные методы используются для формирования на поверхности углеродных материалов микро- и наноразмерных элементов [1,2]. Высокодозное ионное облучение углеродных волокон в зависимости от температуры T приводит к процессам аморфизации, рекристаллизации и развития рельефа поверхности, в том числе и в виде гофрирования волокна [1]. Данная работа рассматривает процессы образования рельефа поверхности в виде сетчатой топографии и гофрирования волокна при $T \geq T_a$, где температура динамического отжига радиационных нарушений T_a в графитовых материалах составляет 150 – 200°C в зависимости от сорта иона [2]. В этих условиях изменения топографии поверхности волокон связывают с анизотропными радиационно-индуцированными пластическими процессами формоизменения, происходящими в углеродных материалах [3], и распылением волокна при облучении ионами [4].

Мишенями служили нити углеродных волокон марки ВМН-4 из полиакрилонитрильного (ПАН) волокна и графитизированная ткань марки ТГН-2МК из вискозного волокна. Облучение проводили ионами Ag^+ с энергией 30 кэВ по нормали к оси волокна на масс-монохроматоре НИИЯФ МГУ [5] при температуре мишеней $\sim 200^\circ\text{C}$. Углеродные волокна до и после облучения исследовали с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе Lyra 3 Tescan.

Анализ РЭМ-изображений показывает, что облучение углеродных волокон из ПАН и вискозы приводит к разным типам ионно-индуцированной морфологии, зависящим от флуенса облучения, рис.1. Видно, что центры зарождения гофрированной структуры на поверхности углеродного волокна из ПАН-волокна в виде конических образований (рис.1а) находятся на параллельных оси волокна наноразмерных следах механического воздействия при получении волокна.

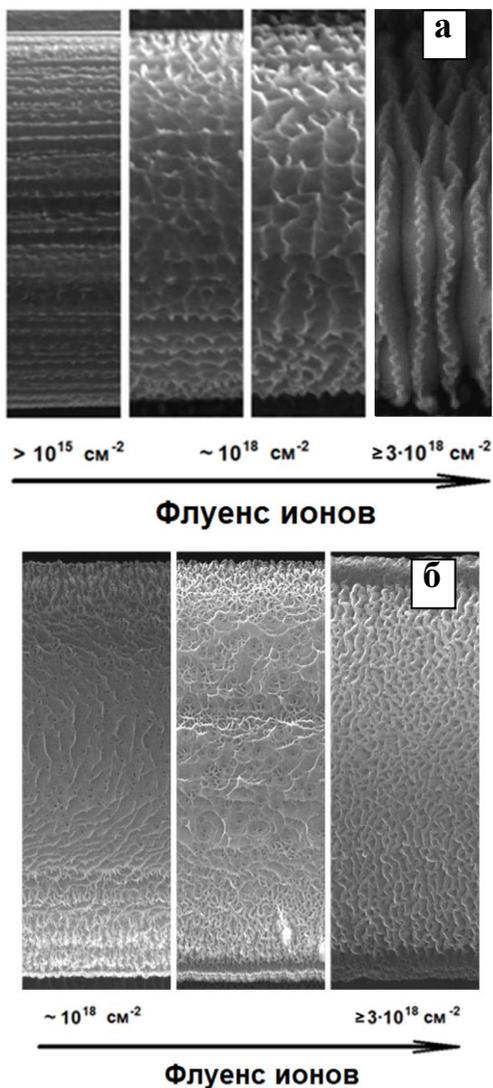


Рис. 1. Эволюция ионно-индуцированной морфологии поверхности углеродного волокна из ПАН-волокна (а) и вискозы (б). Масштабной меткой служит видимый диаметр волокна $\sim 6 \text{ мкм}$

С увеличением флуенса облучения конические центры роста соединяются, образуя ребра, перпендикулярные следам механической обработки. В свою очередь, на следах механической обработки волокна ребра между коническими центрами роста уменьшаются в размерах. При флуенсе облучения $> 1 \cdot 10^{18}$ см² конические элементы мигрируют и соединяются, преобразуясь в гофры посредством роста перпендикулярных оси волокна ребер, достигающих субмикронных размеров. Дальнейшее увеличение флуенса приводит к замещению продольных следов механического воздействия и конических элементов гофрами с наклонными гранями, а также меньшему сегментированию и увеличению размера гофров.

К другому типу топографии поверхности приводит облучение углеродного волокна из вискозы, рис. 1б. Так, при флуенсе $\leq 1 \cdot 10^{18}$ см² наблюдается образование наноразмерных гребневидных структур. Увеличение флуенса приводит к исчезновению гребневидных структур и появлению сетчатой топографии из наноразмерных стенок.

Таким образом, если для углеродного волокна из ПАН-волокна процесс изменения топографии с флуенсом облучения включает в себя последовательные, зависящие от предыдущей стадии, процессы преобразования нанометровой структуры в микрометровую, то для углеродного волокна из вискозы наблюдаются две различные стадии образования наноразмерной структуры.

Список литературы

- [1] Andrianova N.N., Borisov A.M., Mashkova E.S. et. al. // Horizons in World Physics.. 2013. V. 280. New York: Nova Science Publishers. P. 171.
- [2] Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С. // Поверхность. Рентген., синхр. и нейтр. исслед., 2008. № 1. С. 58.
- [3] Yu.S. Virgil'ev, I.P. Kalyagina, Inorganic Materials. 40 (2004) S33.
- [4] Аникин В.А., Борисов А.М., Макунин А.В. и др. // Ядерная физика и инжиниринг. 2018. Т.9. № 2. С. 122
- [5] Mashkova E.S., Molchanov V.A. Medium-Energy Ion Reflection from Solids. Amsterdam. North-Holland, 1985. 444 p.

Н.Н.Е. ЕФИМОВ, Д.Г. БУЛГАДАРЯН, Д.Н.СИНЕЛЬНИКОВ,
В.А.КУРНАЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРОСКОПИИ ИОННОГО РАССЕЯНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ОСАЖДЕНИЯ ТОНКИХ СЛОЕВ ЛИТИЯ НА ВОЛЬФРАМ

В НИЯУ МИФИ проводятся исследования применения спектроскопии рассеяния протонов кэВных энергий для анализа тонких слоев кандидатных материалов ОПЭ [1–3]. Особенностью материалов, используемых в настоящее время в термоядерных установках, является большая разница в атомном номере материала, используемого для дивертора (вольфрам), и материалов с малым атомным номером, применяемым для кондиционирования первой стенки. Большая разница атомных номеров осаждаемых на подложку слоев прекрасно соответствует аналитическим возможностям применения протонов кэВных энергий, так как в этом случае толщину напыленных слоев можно определять с высокой точностью по энергетическим спектрам отраженных ионов [3].

В данной работе анализируется возможность контроля по рассеянию протонов кэВных энергий осаждения на поверхность вольфрама слоев лития разной толщины и последующей их трансформации за счёт взаимодействия с активными компонентами остаточных газов. Кроме того, проблема отражения ионов водорода с энергиями в десятки кэВ о поверхности лития имеет важное значение для реализации выдвинутой Л.Е.Захаровым концепции реактора с нулевым рециклингом [4,5].

Схема эксперимента и использованная установка соответствовали ранее описанному [3,6]. Пучок протонов с энергией 25 кэВ попадал под скольльзящим углом 19° на поверхность мишени, на которую из термического источника напылялся литий. Рассеянные от мишени протоны регистрировались под углом 38° с помощью электростатического энергоанализатора с энергетическим разрешением 0.01 и телесным углом регистрации стэр. Толщина напыленного слоя дополнительно контролировалась кварцевым микробалансом. Состав остаточного газа определялся квадрупольным масс-спектрометром Extorr 200M.

На рис. 1 приведена эволюция энергетических спектров отраженных протонов в процессе 1,5 часового эксперимента. Крайний правый спектр с самой большой амплитудой соответствует отражению от вольфрамовой мишени до начала процесса напыления лития. Задвижка напылительного узла была закрыта, а нагреватель лития не включен. Затем контролируемая термопарой температура лития, в течение 50 минут повышалась до $370 \pm 5^\circ\text{C}$

и поддерживалась в течение 30 мин, после чего задвижка была открыта. Постоянство потока лития на образец подтверждается данными кварцевого микробаланса, а также постоянством температуры кюветы с литием. В ходе осаждения лития на вольфрам происходил сдвиг пика протонов, прошедших через тонкую плёнку лития и отразившихся на вольфрамовой подложке, в низкоэнергетическую область и уменьшение амплитуды (рис. 1).

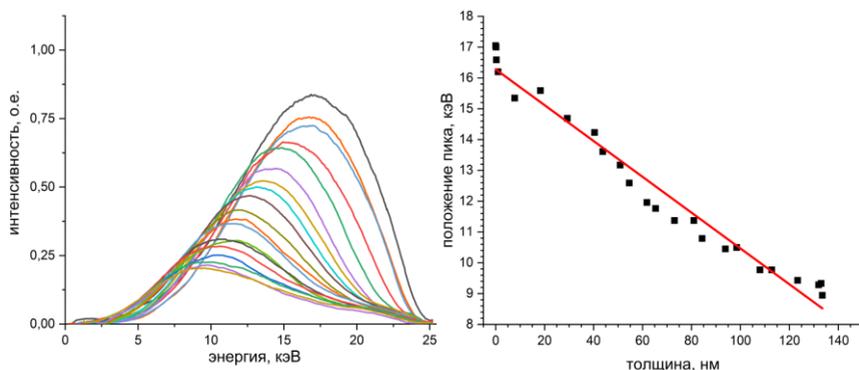


Рис. 1. Энергетические спектры протонов с энергией 25 кэВ, рассеянных на мишени из W в ходе напыления на неё лития. Зависимость положения пика протонов от толщины напылённого лития, измеренной по кварцевому микробалансу.

По достижению максимальной глубины анализа для данной энергии протонов и данного угла рассеяния, что определяется по прекращению изменения положения и амплитуды спектра, задвижка напылительного узла была закрыта. Конечный спектр, таким образом, представляет собой отражение только от лития. По оценкам, которые еще требуют уточнения, толщина напыленного слоя составила ~130 нм. Из рисунка 1 видно, что зависимость положения пика от толщины напылённой плёнки лития, контролируемой по кварцевому микробалансу, близка к линейной, что согласуется с [1,3].

[1] D. Bulgadaryan, V. Kurnaev, D. Sinelnikov, N. Efimov, On the possibility of thin layers thickness determination with low energy proton scattering, Journal of Physics: Conference Series. 941 (2018) 012022. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/941/1/012022>.

[2] D. Bulgadaryan, D. Sinelnikov, V. Kurnaev, S. Kajita, D. Hwangbo, N.

Ohno, Proton scattering from tungsten fuzz, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 434 (2018) 9–12. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2018.07.038>.

[3] D. Bulgadaryan, D. Sinelnikov, V. Kurnaev, N. Efimov, P. Borisyyuk, Y. Lebedinskii, Application of keV-energy proton scattering for thin film analysis, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 438 (2019) 54–57. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2018.10.043>.

[4] L.E. Zakharov, On a burning plasma low recycling regime with $P_{DT} = 23\text{--}26$ MW, $Q_{DT} = 5\text{--}7$ in a JET-like tokamak, Nucl. Fusion. 59 (2019) 096008. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab246b>.

[5] L.E. Zakharov, J.P. Allain, S.X. Bennett, M.A.E. Abdelghany, D.G. Bulgadaryan, Low Recycling Divertor for JET Burning Plasma Regime ($P_{DT} > 25$ MW, $Q_{DT} > 5$), Insensitive to Plasma Physics, IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE. (2019) 8. <https://doi.org/10.1109/TPS.2019.2953591>.

[6] D. Bulgadaryan, D. Kolodko, V. Kurnaev, D. Sinelnikov, Facility and the method for MEIS analysis of layers redeposited in plasma devices, Journal of Physics: Conference Series. 748 (2016) 012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/748/1/012016>.

Я.А. ВАСИНА^{1,2}, А.С. ПРИШВИЦЫН^{1,2}, А.Н. ЩЕРБАК¹, А.С. ДЖУРИК¹,
В.Б. ЛАЗАРЕВ¹, С.В. МИРНОВ^{1,2}, ОТРОЩЕНКО В.Г¹.

¹АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Троицк, Москва

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЧЕТЫРЕХ КОМБИНАЦИЙ ЛИТИЕВЫХ ЛИМИТЕРОВ НА ТОКАМАКЕ Т-11М КАК ПРОТОТИПА ЭМИТТЕР-КОЛЛЕКТОРНОЙ СИСТЕМЫ СТАЦИОНАРНОГО ТОКАМАКА

Главной целью будущих токамаков является работа в стационарном режиме. Анализ литературных данных с различных токамаков показывает, что основной проблемой достижения этого является накопление примесей в пристеночной плазме, что ограничивает длительность разряда. Перспективным решением является использование лития в качестве обращенного к плазме материала.

Литиевая программа токамака Т-11М ориентирована на решение технологических проблем создания стационарного замкнутого литиевого контура в термоядерных установках. Ранее предложена модель такого контура, основными элементами которого являются эмиттеры и коллекторы лития [1]. В рамках данной программы на токамаке Т-11М были протестированы четыре различные схемы расположения эмиттера и коллекторов:

1) Продольный литиевый лимитер использовался одновременно как эмиттер и коллектор лития (его горячая область – эмиттер лития, а холодные концы – коллекторы лития);

2) Вертикальный литиевый лимитер использовался как эмиттер лития, а продольный – как коллектор;

3) Один продольный лимитер использовался как эмиттер лития, а второй (дополнительный) продольный лимитер, расположенный в тени первого – как коллектор;

4) Вертикальный лимитер использовался как эмиттер лития, а два симметрично расположенных продольных лимитера – как коллекторы.

Были исследованы литиевые потоки в SOL для каждой из перечисленных выше схем. Индикатором литиевых потоков на токамаке Т-11М является зонд Маха. Исследовалось радиальное распределение свечения на пластине зонда и ионного тока насыщения на электродах.

Испытания показали, что последняя модель расположения наиболее оптимальна для реализации замкнутого литиевого контура. Прежде всего, было обнаружено, что глубина проникновения лития (характеристическая

длина λ [2]) в SOL уменьшается с 5 см до 1.1 см при переходе от первой к четвертой схеме. Также симметризация коллекторной системы путем введения дополнительного продольного лимитера привела к отсутствию магнитного острова вблизи коллектора.

Литература

[1]. S. Mirnov, Tokamak evolution and view to future, Nucl. Fusion. 59 (2018). doi:10.1088/1741-4326/aace92.

[2]. Mirnov S.V. J. Nucl. Mater. 390-391 (2009) 876-885

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ	3
С.С. АНАНЬЕВ, Д.Н. ДЕМИДОВ, С.В. СУСЛИН <i>Моделирование транспорта водорода в материалах ТЯР с учетом радиационно стимулированных дефектов</i>	9
А.Г. ПОСКАКАЛОВ ^{1,2} , Н.С. КЛИМОВ ^{1,2} , Ю.М. ГАСПАРЯН ¹ , Д.В. КОВАЛЕНКО ² , О.В. ОГОРОДНИКОВА ¹ , В.С. ЕФИМОВ ¹ <i>Моделирование накопления дейтерия при импульсных плазменных нагрузках характерных для ИТЭР</i>	13
М.М. ЦВЕНТУХ <i>Развитие сквозной модели взрывозмиссионного импульса на основе перехода через критическое состояние вещества</i>	17
Е.Д. ВОВЧЕНКО, Ю.М. ГАСПАРЯН, С.А. КРАТ, В.А. КУРНАЕВ, А.А. ПИСАРЕВ, Т.В. СТЕПАНОВА <i>LIBS анализ присутствия Li в W тайлах токамака T-10</i>	21
Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, А.С. КАПЛЕВСКИЙ, С.С. ДОВГАНЮК, Н.Н. КАСИМОВА <i>Захват изотопов водорода в покрытия бериллия и алюминия, напыленные в плазме</i>	25
A. PRISHVITSYN, R. DEJARNAC, J. HORACEK, M. JERAB, J. ADAMEK, J. CAVALIER, V. WEINZETTL, P. VONDRACEK, A. VERTKOV <i>Свечение нейтрального и ионизованного лития вблизи поверхности литиевой мишени в токамаке COMPASS</i>	29
Д.И. ЕЛЕЦ, А.Г. РАЗДОБАРИН, А.М. ДМИТРИЕВ, Н.А. БАБИНОВ, А.Н. БАЖЕНОВ, И.М. БУКРЕЕВ, И.А. ХОДУНОВ, А.Н. КОВАЛЬ, Г.С. КУРСКИЕВ, А.Е. ЛИТВИНОВ, Е.Е. МУХИН, Д.С. САМСОНОВ, В.А. СЕНИЧЕНКОВ, В.А. СОЛОВЕЙ, И.Б. ТЕРЕЩЕНКО, С.Ю. ТОЛСТЯКОВ, Л.А. ВАРШАВЧИК, П.В. ЧЕРНАКОВ, Ал.П. ЧЕРНАКОВ, Ан.П. ЧЕРНАКОВ, Н.С. ЖИЛЬЦОВ <i>Некоторые аспекты диагностики накопления изотопов водорода в первой стенке реакторов токамаков</i>	30
З.Р. АРУТЮНЯН, Ю.М. ГАСПАРЯН, В.С. ЕФИМОВ, С.А. РЯБЦЕВ, А.А. ПИСАРЕВ <i>Удержание дейтерия в поверхностном слое вольфрама, предоблученном ионами гелия</i>	32
Л.А. ВАРШАВЧИК, Н.А. БАБИНОВ, П.А. ЗАТЫЛКИН, А.А. ЧИРОНОВА, А.П. ЧЕРНАКОВ, А.М. ДМИТРИЕВ, А.Г. РАЗДОБАРИН, Д.С. САМСОНОВ, Е.Е. МУХИН <i>Код KITE: моделирование распыления, транспорта и осаждения для чистки оптических элементов ИТЭР</i>	36

- В.П. БУДАЕВ, С.Д. ФЕДОРОВИЧ, А.В. ДЕДОВ, Ю.В. МАРТЫНЕНКО, А.В. 40
КАРПОВ, М.К. ГУБКИН, П.Г. ФРИК, Д.Н. ГЕРАСИМОВ, А.П. СЛИВА, Г. ВАН
ООСТ, Е.В. СВИРИДОВ, А.В. ЛУБЕНЧЕНКО, А.Ю. МАРЧЕНКОВ, М.В.
ЛУКАШЕВСКИЙ, А.В. ЗАХАРЕНКОВ, И.В. ВОИНКОВА, А.В. ЛАЗУКИН, З.А.
ЗАКЛЕЦКИЙ, К.А. РОГОЗИН, А.А. КОНЬКОВ, Г.Б. ВАСИЛЬЕВ
**Испытание плазменными нагрузками вольфрамовых конструкционных
материалов термоядерного реактора в установке ПЛМ**
- М.Ю. ЖАРКОВ, А.В. ВЕРТКОВ, И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ, В.А. ВЕРШКОВ, Г.Е. 44
НОТКИН, С.В. МИРНОВ, В.Б. ЛАЗАРЕВ, И.Л. ТАЖИБАЕВА
**Прототипы литиевых квазистационарных внутрикамерных
элементов токамака**
- A. LITNOVSKY, J. SCHMITZ, F. KLEIN, K. DE LANNOYE, A. KRETER, TH. 48
MORGAN, J.W. COENEN AND CH. LINSMEIER.
**Plasma performance of smart tungsten-based alloys for a future fusion power
plant**
- Л.Н.ХИМЧЕНКО, В.П.БУДАЕВ 51
**Как учет взрывной электронной эмиссии на вольфрамовых
диверторных пластинах и бериллиевой стенке может повлиять на
представления о балансе энергии и примесном составе в ИТЭР.**
- В.П. БУДАЕВ, С.Д. ФЕДОРОВИЧ, А.В. ДЕДОВ, А.Т. КОМОВ, А.В. КАРПОВ, 55
М.К. ГУБКИН, Ю.В. МАРТЫНЕНКО, П.Г. ФРИК, Е.В. СВИРИДОВ, Д.Н.
ГЕРАСИМОВ, М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ, А.В. ЛУБЕНЧЕНКО¹, А.Ю., А.В.
ЗАХАРЕНКОВ, А.В. ЛАЗУКИН, З.А. ЗАКЛЕЦКИЙ, Г.Б. ВАСИЛЬЕВ, В. ЧАН
КУАНГ
**Плазменная установка ПЛМ-2 для полномасштабных испытаний
материалов термоядерного реактора стационарными плазменными
нагрузками**
- А.А.АЙРАПЕТОВ, Н.А.ПУНТАКОВ, Л.Б.БЕГРАМБЕКОВ, С.С.ДОВГАНЮК, 59
А.В.ГРУНИН, А.С.КАПЛЕВСКИЙ, А.В.ТЕНИШЕВ, С.А.ГРАШИН, И.И.АРХИПОВ
**Свойства графита, предназначенного для контактирующих с плазмой
элементов токамака Т-15МД**
- В.А. КУРНАЕВ, А.В. МАРКИН, Ю.М. ГАСПАРЯН, Е.Е. МУХИН, Д.Г. 63
БУЛГАДАРЯН, Е.Д. ВОВЧЕНКО, А.Г. РАЗДОБАРИН, В.С. НОРАКИДЗЕ, Д.И.
ЕЛЕЦ, Л.А. СНИГИРЕВ
**Дистанционные методы анализа содержания изотопов водорода в
материалах первой стенки токамаков**

- А.М.ДМИТРИЕВ, Н.А.БАБИНОВ, И.М.БУКРЕЕВ, А.ВАРШАВЧИК, Д.И. ЕЛЕЦ, 67
 П.А.ЗАТЫЛКИН, Е.Е.МУХИН, А.Г.РАЗДОБАРИН, Д.С.САМСОНОВ, Л.А.
 СНИГИРЕВ, С.Ю.ТОЛСТЯКОВ, Ал.П.ЧЕРНАКОВ, Ан.П.ЧЕРНАКОВ,
 П.В.ЧЕРНАКОВ, А.Е.ГОРОДЕЦКИЙ, В.Л.БУХОВЕЦ, А.В.МАРКИН,
 Р.Х.ЗАЛАВУТДИНОВ, П.А. ШИГИН, И.Б. КУПРИЯНОВ, В.Л. ПОДКОВЫРОВ,
 Д.В. КОВАЛЕНКО
**Статус разработки системы плазменной очистки первого зеркала в
 ФТИ им. А.Ф. Иоффе**
- Н.Н. ДЕГТЯРЕНКО, А.А. ПИСАРЕВ 71
**Влияние атомов гелия на поведение пар Френкеля при малых
 расстояниях разлета**
- С.А. КРАТ, Ю.М. ГАСПАРЯН, Я.А. ВАСИНА, А.С. ПРИШВИЦЫН, А.А. 76
 ПИСАРЕВ
Теоретическое описание соосаждения водорода с металлами
- А.Е. ГОРОДЕЦКИЙ, В.Л. БУХОВЕЦ, А.В. МАРКИН, В.И. ЗОЛОТАРЕВСКИЙ, 79
 Т.В. РЫБКИНА, В.Л. ВОЙТИЦКИЙ, Р.Х. ЗАЛАВУТДИНОВ, А.П. ЗАХАРОВ,
 А.М. ДМИТРИЕВ, А.Г. РАЗДОБАРИН, Е.Е.МУХИН
**Подавление блистерообразования в Мо зеркалах после полировки
 алмазными составами**
- В.Л. БУХОВЕЦ, А.В. МАРКИН¹, А.Е. ГОРОДЕЦКИЙ, 83
 В.Л. ВОЙТИЦКИЙ¹, Р.Х. ЗАЛАВУТДИНОВ, Е.Е. МУХИН, А.Г. РАЗДОБАРИН
**Изменение светопропускания фианита при экспозиции в плазме
 дейтерия и гелия**
- У.КН. ALIMOV, У. НАТАНО, Р.КН. ZALAVUTDINOV, 86
Modeling of hydrogen isotope trapping in self-damaged tungsten
- А.В. ГОЛУБЕВА, Б.И. ХРИПУНОВ, Н.П. БОБЫРЬ, Н.Н. КОЛОБЫЛИНА, А.А. 90
 МЕДНИКОВ, В.Х. АЛИМОВ, В.М. ЧЕРНОВ
Селективное распыление ферритно-мартенситных сталей
- И.С. ПИМЕНОВ, С.В. НЕУДАЧИН, А.А. БОРЩЕГОВСКИЙ 92
**Спонтанное падение Li-содержащей чешуйки как триггер
 нелокального понижения потоков тепла и частиц при ко+ко и
 ко+контр генерации тока ЭЦ-волнами в токамаке Т-10**
- В.П. БУДАЕВ^{1,2}, С.Д. ФЕДОРОВИЧ¹, И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ³, А.В. ВЕРТКОВ³, 96
 А.В. КАРПОВ², М.К. ГУБКИН¹, ВАН ООСТ Г.^{1,4}, Ю.В. МАРТЫНЕНКО², П.Г.
 ФРИК¹, Е.В. СВИРИДОВ¹, Д.Н. ГЕРАСИМОВ¹, А.В. ЛУБЕНЧЕНКО¹, А.В.
 ЗАХАРЕНКОВ¹, А.Ю. МАРЧЕНКОВ¹, М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ¹, И.В. ВОИНКОВА¹,
 А.В. ЛАЗУКИН¹, А.А. КОНЬКОВ¹, К.А. РОГОЗИН, Г.Б. ВАСИЛЬЕВ, З.А.
 ЗАКЛЕЦКИЙ
**Исследование жидкометаллической литиевой капиллярно-пористой
 системы стационарной плазмы в установке ПЛИМ**

- С.Д. ФЕДОРОВИЧ, А.В. КАРПОВ, В.П. БУДАЕВ, С.А. ГРАШИН, М.К. ГУБКИН, 100
 А.П. СЛИВА, Ю.В. МАРТЫНЕНКО, А.Ю. МАРЧЕНКОВ, М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ,
 З.А. ЗАКЛЕЦКИЙ, В. ЧАН КУАНГ, Г.Б. ВАСИЛЬЕВ, К.А. РОГОЗИН
**Исследование компонентов защитной графитовой облицовки камеры
 токамака Т-15МД стационарными плазменными нагрузками в
 установке ПЛМ и мощными электронными пучками**
- С.Д. ФЕДОРОВИЧ¹, В.П. БУДАЕВ, Ю.В. МАРТЫНЕНКО, А.В. КАРПОВ, М.К. 104
 ГУБКИН, А.Ю. МАРЧЕНКОВ, Д.Н. ГЕРАСИМОВ, М.В. ЛУКАШЕВСКИЙ, А.В.
 ЛАЗУКИН, З.А. ЗАКЛЕЦКИЙ
**Рост наноструктурированной высокопористой поверхности на
 образцах стали при плазменной обработке в установке ПЛМ**
- Н.Н. АНДРИАНОВА, А.М. БОРИСОВ, А.В. МАКУНИН, Е.С. МАШКОВА², М.А. 108
 ОВЧИННИКОВ
**Исследование процессов ионно-индуцированного
 наноструктурирования и гофрирования поверхности углеродного
 волокна**
- Н.Е. ЕФИМОВ, Д.Г. БУЛГАДАРЯН, Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ, В.А. КУРНАЕВ 111
**Применение спектроскопии ионного рассеяния для анализа осаждения
 тонких слоев лития на вольфраме**
- Я.А. ВАСИНА, А.С. ПРИШВИЦЫН, А.Н. ЩЕРБАК, А.С. ДЖУРИК, В.Б. 114
 ЛАЗАРЕВ, С.В. МИРНОВ, ОТРОЩЕНКО В.Г
**Экспериментальные испытания четырех комбинаций литиевых
 лимитеров на токамаке Т-11М как прототипа эмиттер-коллекторной
 системы стационарного токамака**