

XXI КОНФЕРЕНЦИЯ

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Москва, НИЯУ МИФИ, 24-25 января 2018 г.

Сборник научных трудов

**Москва
2018**

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

**МАТЕРИАЛЫ
XXI КОНФЕРЕНЦИИ**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Москва, НИЯУ МИФИ, 24-25 января 2018 г.

Москва
2018

ББК 22.333
УДК 533.9 (06)
В 40

Материалы XXI конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью». Москва, 24-25 января 2018 г.
М.: НИЯУ МИФИ, 2018 г., 148 с.

Сборник содержит материалы докладов, представленных на ежегодно проводимую в НИЯУ МИФИ 21 конференцию по взаимодействию плазмы с поверхностью. Тематика конференции охватывает как результаты исследования и моделирования взаимодействия плазмы с поверхностью применительно к проблеме управляемого термоядерного синтеза, так и ряду применений взаимодействия плазмы с поверхностью для модификации материалов в разнообразных технологических задачах. Сборник сформирован по мере поступления докладов, которые опубликованы в авторской редакции при минимальной редакционной правке.

Редакционная коллегия:

Ю.М. Гаспарян,
В.А. Курнаев,
Д.Н. Синельников

ISBN 978-5-7262-2449-7

Программа конференции
«ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ»

Заседание №1

Среда, 24 января

начало в 10.00

Аудитория **Актовый зал**

Председатели – профессор Беграмбеков Л.Б., профессор Писарев А.А.

10.00 – 10.15	<p>I. BORODKINA^{1,2}, D. DOUAI³, D. BORODIN² and JET CONTRIBUTORS*</p> <p>¹ <i>Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Energie- und Klimaforschung – Plasmaphysik, Partner of the Trilateral Euregio Cluster (TEC), 52425 Jülich, Germany</i></p> <p>² <i>National Research Nuclear University MEPhI, 31, Kashirskoe sh., 115409, Moscow, Russia</i></p> <p>³ <i>CEA, IRFM, F-13108 Saint Paul Lez Durance, France</i></p> <p>* See the author list of X. Litaudon et al., <i>Nucl. Fusion</i> 57 (2017) 102001</p> <p>PLASMA-WALL INTERACTION STUDIES AT JET-ILW IN A VIEW OF UPCOMING D, H AND T EXPERIMENTAL CAMPAIGNS</p>
10.15 – 10.30	<p>А.А. АЙРАПЕТОВ, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, О.А. БИДЛЕВИЧ, А.Н. ВОЙТЮК, А.В. ГРУНИН, А.М. ЗАХАРОВ, Я.А. САДОВСКИЙ</p> <p><i>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</i></p> <p>ПОВЕДЕНИЕ ПЕРЕОСАЖДЕННЫХ ВОЛЬФРАМОВЫХ СЛОЕВ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ И РАДИАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАЛИЧИЯ В НИХ ИНОРОДНОЙ ПРИМЕСИ</p>
10.30 – 10.45	<p>М.М. ЦВЕНТУХ</p> <p><i>Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук</i></p> <p>ВЕЛИЧИНА ИМПУЛЬСА ПЛАЗМЫ ВЗРЫВОЭМИССИОННЫХ ЯЧЕЕК КАТОДНОГО ПЯТНА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ВАКУУМЕ</p>
10.45 – 11.00	<p>В.П. БУДАЕВ^{1,2,3}</p> <p>¹ <i>Национальный исследовательский университет «МЭИ»,</i></p> <p>² <i>НИЦ «Курчатовский институт»,</i></p> <p>³ <i>ИКИ РАН, Москва</i></p> <p>ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ СО СТОХАСТИЧЕСКОЙ НАНО- И МИКРОСТРУКТУРОЙ ПОВЕРХНОСТИ: УПРАВЛЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫМИ ПОТОКАМИ В ПЛАЗМЕ И АЭРОДИНАМИКЕ</p>

11.00 – 11.15	<p><u>А.С. ПРИШВИЦЫН</u>¹, В.Б. ЛАЗАРЕВ², С.В. МИРНОВ² ¹Национальный исследовательский университет «МИФИ», Москва ²АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных термоядерных исследований», Троицк, Москва</p> <p>ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛИТИЯ В ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА Т-11М ПО ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕЧЕНИЯ ЕГО НЕЙТРАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ</p>
11.15 – 11.30	<p>В.П. АФАНАСЬЕВ¹, А.С. ГРЯЗЕВ^{1,2}, П.С. КАПЛЯ³, О.Ю. РИДЗЕЛЬ^{1,4}, Н.Ю. СУББОТИН¹, М. КÖRPEN⁵ ¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва ²АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара», Москва ³Москва, Россия ⁴Institut für Angewandte Physik, Vienna University of Technology, Austria ⁵Berlin, Germany</p> <p>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСЛОЙНЫХ ПРОФИЛЕЙ ДЕЙТЕРИЯ В БЕРИЛЛИИ НА ОСНОВЕ СПЕКТРОСКОПИИ ПИКОВ УПРУГО ОТРАЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ СКАНИРОВАНИЕМ</p>
11.30 – 11.45	<p><u>А.Г. ПОСКАКАЛОВ</u>^{1,2}, Н.С. КЛИМОВ^{1,2}, Ю.М. ГАСПАРЯН¹, О.В. ОГОРОДНИКОВА¹, В.С. ЕФИМОВ¹ ¹Национальный исследовательский университет «МИФИ», Москва ²АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных термоядерных исследований», Троицк, Москва</p> <p>ИЗМЕНЕНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ВОЛЬФРАМА И НАКОПЛЕНИЕ ДЕЙТЕРИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ НАГРУЗКАХ</p>
11.45 – 12.05	<p>Перерыв на кофе</p>
12.05 – 12.20	<p><u>Д.Д. БЕРНТ</u>¹, В.О. ПОНОМАРЕНКО¹, А.А. ПИСАРЕВ² ¹ООО «Пилкингтон Гласс», дер. Жуково Раменского р-на МО, Россия ²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</p> <p>ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ НАНОРАЗМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ ТОНКОПЛОСКОСТНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ РЕАКЦИОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ БИНАРНЫХ СПЛАВОВ ПЛАЗМОЙ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА</p>

12.20-12.35	<p>Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ, А.Н. ШЕВЕЙКО, Д.В. ШТАНСКИЙ, А.Е. ЛЕВАШОВ <i>Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»</i></p> <p>СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ В СИСТЕМЕ TiC-(Ni,Al,Fe), ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫМ, ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДАМИ, А ТАКЖЕ ПО ГИБРИДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ</p>
12.35-12.50	<p>С.В. САВУШКИНА, М.Н. ПОЛЯНСКИЙ, Е.А. ВЫСОТИНА <i>ГНЦ - ФГУП «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша», Москва, Россия</i> <i>«Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Россия</i></p> <p>ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ГРАДИЕНТНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ГАФНИЯ</p>
12.50-13.05	<p>Н.Н. ЧЕРЕНДА¹, В.В. УГЛОВ¹, Г.М. ДЗАГНИДЗЕ¹, В.М. АСТАШИНСКИЙ², А.М. КУЗЬМИЦКИЙ² <i>¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь</i> <i>²Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь</i></p> <p>МНОГОЭЛЕМЕНТНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ</p>
13.05-13.20	<p>В.А. АНИКИН¹, А.М. БОРИСОВ¹, А.В. МАКУНИН², Е.С. МАШКОВА², М.А. ОВЧИННИКОВ^{1,2} <i>¹Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)</i> <i>²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова</i></p> <p>ИОННО-ИНДУЦИРОВАННОЕ ГОФРИРОВАНИЕ И ЭРОЗИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИАКРИЛОНИТРИЛЬНОГО УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА</p>
13.20-13.35	<p>В.И. БАЧУРИН, И.И. АМИРОВ, И.В. ЖУРАВЛЕВ, М.О. ИЗЮМОВ, В.В. НАУМОВ, С.Г. СИМАКИН <i>Ярославский филиал ФТИАН РАН, Ярославль</i></p> <p>МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ПЛЕНОК БОМБАРДИРОВКОЙ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНЫМИ ИОНАМИ АРГОНА ПЛАЗМЫ ИНДУКЦИОННОГО ВЧ РАЗРЯДА</p>
13.35-14.05	<p>Перерыв на кофе</p>
14.05-14.20	<p>А.С. РОХМАНЕНКОВ, А.В. ЯНИЛКИН <i>ФГУП Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Автоматики им. Н.Л. Духова</i></p> <p>МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДЕСОРБЦИИ ВОДОРОДА ИЗ ГИДРИДА ТИТАНА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПУЧКА ИОНОВ</p>

14.20-14.35	<u>А.Я. ЛЕЙВИ</u> , А.П. ЯЛОВЕЦ ¹ ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», Челябинск, Россия ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ МИШЕНИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ
14.35-14.50	В.В. АНДРЕЕВ ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», Чебоксары ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МИКРОРАЗРЯДОВ С TiO₂ СОДЕРЖАЩЕЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛЁНКОЙ В ЯЧЕЙКЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА
14.50-15.05	<u>М.М. ХАРЬКОВ</u> , А.В. КАЗИЕВ, Ю.М. ГАСПАРЯН, Д.В. ДАНИЛЮК, А.А. ПИСАРЕВ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» ПОЛУЧЕНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ПУХА НА ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ В ПЛАЗМЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА

Стендовые доклады (15.05-16.30)

1. Т.Р. ТУЛЕНБЕРГЕНОВ, М.К. СКАКОВ, И.А. СОКОЛОВ, Д.А. ГАНОВИЧЕВ
Филиал Институт Атомной Энергии Национального Ядерного Центра, Курчатов, Казахстан
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПЛЕКСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ГЕЛИЕВОЙ И АЗОТНОЙ ПЛАЗМЫ НА КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ТЯЖ
2. П.А. БОРИСОВСКИЙ, С.В. ГАВРИЛОВ, М.Н. МАХМУДОВ, Е.Н. МООС, Г.В. КИСЕЛЕВ, А.И. КУДЮКИН, В.А. СТЕПАНОВ
Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина
ЭРОЗИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ ПЛАЗМОЙ РАЗРЯДА
3. А.В. ЕЛЕЦКИЙ, С.Д. ФЕДОРОВИЧ, Г.С. БОЧАРОВ, О.С. ЗИЛОВА, А.В. ЗАХАРЕНКОВ, Е.В. ТЕРЕНТЬЕВ, А.В. ЛУБЕНЧЕНКО, Н. АБУСАИФ
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ НАНОУГЛЕРОДНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНЫХ, ПУЧКОВЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ НАГРУЗОК

4. М.А. ЛАРЧЕНКО^{1,2}, И.М. ПОЗНЯК^{1,2}
¹*Московский физико-технический институт (государственный университет)*
²*ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований*
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДУКТОВ ЭРОЗИИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ВОЛЬФРАМА ИНТЕНСИВНЫМИ ПОТОКАМИ ПЛАЗМЫ
5. А.А. СТЕПАНЕНКО, Н.М. ОРЕШНИКОВА, А.А. ПИСАРЕВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
ДИФфуЗИЯ ВОДОРОДА В ВОЛЬФРАМЕ В ПОЛЕ ДЕФЕКТОВ ПРИ НАЛИЧИИ ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУРЫ
6. Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ¹, Е.Н. ШЕФТЕЛЬ², Б.С. ТЫНЫСОВ¹ В.А. ТЕДЖЕТОВ², Е.В. ХАРИН²
¹*Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»*
²*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН*
ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ ФЕРРОМАГНИТНЫЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ПЛЁНКИ Fe-Zr/Ni/Ti/AlO ДЛЯ СВЧ-УСТРОЙСТВ
7. Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ, А.Н. ШЕВЕЙКО, К.А. КУПЦОВ
Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИМПУЛЬСНОГО КАТОДНО-ДУГОВОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ИСПАРЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ В СИСТЕМЕ Cr-B-C-N
8. А.И. КУДЮКИН, М.Н. МАХМУДОВ, Е.Н. МООС, К.Е. СЕРЁГИН, В.А. СТЕПАНОВ, Е.Я. ЧЕРНЯК
Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина
ЭРОЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ВАКУУМНЫХ ДУГОГАСИТЕЛЬНЫХ КАМЕРАХ
9. С.П. ЗИМИН¹, Д.А. МОКРОВ¹, Д.Ф. ПЛАТОНОВ¹, И.И. АМИРОВ², В.В. НАУМОВ², Е.С. ГОРЛАЧЕВ², В.Ф. ГРЕМЕНОК³,
¹*Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, Ярославль*
²*Ярославский филиал Физико-технологического института РАН, Ярославль*
³*Научно-практический центр по материаловедению НАН, Минск*
ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЛАЗМЕННОГО НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПЛЕНОК Cu(In,Ga)Se2
10. ZELTSEY^{1,2}, E.N. MOOS^{2,3}
¹*Ryazan Metal Ceramics Instrumentation Plant Joint Stock Company, Russia*

² Limited Liability Company "Ecton", Moscow, Russia
² Physical Department, Yesenin Ryazan State University, Russia
EROSION MODEL OF SURFACE

11. I.A. ZELTSER^{1,2}, E.N. MOOS^{2,3}
¹ Ryazan Metal Ceramics Instrumentation Plant Joint Stock Company, Russia
² Limited Liability Company "Ecton", Moscow, Russia
² Physical Department, Yesenin Ryazan State University, Russia
ELECTRODOPING SURFACE NITROGEN
12. Д.Н. СИНЕЛЬНИКОВ, Д.Г. БУЛГАДАРЯН, Г. БУЯНОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ
13. V.I. SHYMANSKI¹, V.V. UGLOV¹, V.M. ASTASHYNSKI², H.W. ZHONG³, J. SHEN³,
X.Y. LE³
¹ Belarusian State University, Minsk, Belarus
² A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of national academy of science of Belarus, Minsk
³ School of Physics and Nuclear Engineering, Beihang University, Beijing, China
TUNGSTEN SURFACE EROSION UNDER COMPRESSION PLASMA FLOW AND HIGH-INTENSE SHORT-PULSED ION BEAM IMPACTS
14. А.В. НЕСТЕРОВИЧ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ Θ-ПИНЧЕЙ В ОКРЕСТНОСТИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ В ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ
15. БУДАЕВ В.П.^{1,2,3}, ФЕДОРОВИЧ С.Д.¹, МАРТЫНЕНКО Ю.В.², ЛУКАШЕВСКИЙ М.В.¹, ГУБКИН М.К.¹, КАРПОВ А.В.², ЛАЗУКИН А.В.¹, ШЕСТАКОВ Е.А.², СЕРГЕЕВ Н.С.¹
¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва
²НИЦ Курчатовский институт, Москва
³ИКИ РАН, Москва
ИСПЫТАНИЯ ВОЛЬФРАМА СТАЦИОНАРНЫМИ НАГРУЗКАМИ В ПЛАЗМЕННОЙ УСТАНОВКЕ НИУ «МЭИ»
16. С.А. МАЛАНИЧЕВ², Д.Д. БЕРНТ¹, И.Д. ТРОШКИНА², А.А. ПИСАРЕВ³
¹ООО «Пилкнгатон Гласс», дер. Жуково Раменского р-на МО, Россия
²Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева

³*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
**ОСАЖДЕНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ОКСИДА
ТИТАНА РАСПЫЛЕНИЕМ КЕРАМИЧЕСКОЙ МИШЕНИ В ПЛАЗМЕ
МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА И ИХ СВОЙСТВА**

17. А.Б. ТХАБИСИМОВ, А.Ф. МЕДНИКОВ, А.А. МАКЕЕВА
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
АБРАЗИВНОЙ СТОЙКОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ,
ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИННОВАЦИОННЫХ
АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**
18. А.Ф. МЕДНИКОВ, А.Б. ТХАБИСИМОВ, А.А. МАКЕЕВА
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
**ИССЛЕДОВАНИЯ ЭРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ 3D - ПЕЧАТИ**

Четверг, 25 января

начало в 10.00

Аудитория Г-405

Председатель – профессор КУРНАЕВ В.А.

10.10 – 10.40	С.В. МИРНОВ ^{1,2} ¹ АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Троицк, Москва, ² НИЯУ МИФИ, Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш.31 О РЕЗУЛЬТАТАХ V МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ В УСТАНОВКАХ УТС
10.40 – 11.10	Л.Е. ЗАХАРОВ <i>LiWFusion, P.O. Box 2391 Princeton NJ 08543, USA</i> ЛИТИЙ ДЛЯ ТОКАМАКОВ
11.10 – 11.30	И.В. МАЗУЛЬ АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», С. Петербург ДИВЕРТОРНАЯ МИШЕНЬ ДЛЯ ДЕМО РЕАКТОРА
11.30 – 11.50	М.Ю. ЖАРКОВ ¹ , А.В. ВЕРТКОВ ¹ , И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ ^{1,2} , В.А. ВЕРШКОВ ³ , С.В. МИРНОВ ⁴ , В.А. ШУМСКИЙ ² ¹ АО «Красная звезда», Москва, РФ ² НИЯУ МИФИ, Москва, РФ ³ НИЦ «Курчатовский институт», Москва, РФ ⁴ АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Москва, РФ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПОВЕДЕНИЯ ЛИТИЕВЫХ ВНУТРИКАМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТОКАМАКОВ
11.50 – 12.10	И.М. ПОЗНЯК ^{1,2} , В.М. САФРОНОВ ^{1,3} , В.Ю.ЦЫБЕНКО ^{1,2} ¹ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований ² Московский физико-технический институт (государственный университет) ³ Проектный центр ИТЭР, Москва ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ РАСПЛАВЛЕННОГО СЛОЯ МЕТАЛЛА ПРИ УСЛОВИЯХ ХАРАКТЕРНЫХ ДЛЯ ELM-СОБЫТИЙ И СРЫВОВ В ИТЭР
12.10 – 12.30	Перерыв на кофе
12.30 – 12.50	Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, С.С. ДОВГАНЮК, А.Е. ЕВСИН, А.С. КАПЛЕВСКИЙ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» ЗАХВАТ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В ВОЛЬФРАМ ПРИ ЕГО ПЕРИОДИЧЕСКОМ ПЛАЗМЕННОМ ОБЛУЧЕНИИ

12.50- 13.00	<p><u>А.Н. ЩЕРБАК</u>¹, С.В. МИРНОВ¹, В.Б. ЛАЗАРЕВ¹, Я.А. ВАСИНА¹, И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ², А.В. ВЕРТКОВ², М.Ю. ЖАРКОВ²</p> <p>¹АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Троицк, Москва, ²АО «Красная Звезда», Москва</p> <p>СРАВНЕНИЕ ЗАХВАТА ДЕЙТЕРИЯ И ВОДОРОДА ЛИТИЕВЫМИ КОЛЛЕКТОРАМИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ КОЛЛЕКТОРА НА ТОКАМАКЕ T-11M</p>
13.00 – 13.15	<p><u>А.Н. ЩЕРБАК</u>, С.В. МИРНОВ, Н.Т. ДЖИГАЙЛО</p> <p>АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Троицк, Москва</p> <p>НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АБСОЛЮТНОГО КОЛИЧЕСТВА ЛИТИЯ В ЛИТИЙСОДЕРЖАЩИХ ПЛЕНКАХ НА ПОВЕРХНОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МИШЕНЕЙ (ОБРАЗЦОВ-СВИДЕТЕЛЕЙ) В КАМЕРЕ ТОКАМАКОВ</p>
13.15 – 13.35	<p><u>В.П. БУДАЕВ</u>^{1,2}, <u>Л.Н. ХИМЧЕНКО</u>³</p> <p>¹НИЦ «Курчатовский институт», ²Национальный исследовательский университет «МЭИ», ³«Проектный центр ИТЭР», Москва</p> <p>ВЛИЯНИЕ ДУГООБРАЗОВАНИЯ НА ЭРОЗИЮ МАТЕРИАЛОВ В ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ</p>
13.35 – 14.35	Перерыв на обед
14.35 – 14.50	<p><u>С.А. РЯБЦЕВ</u>, Ю.М. ГАСПАРЯН, В.С. ЕФИМОВ, З.Р. АРУТЮНЯН, А.А. ПИСАРЕВ</p> <p>Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"</p> <p>НАКОПЛЕНИЕ ГЕЛИЯ В ВОЛЬФРАМЕ ПРИ ИОННОМ И ПЛАЗМЕННОМ ОБЛУЧЕНИИ</p>
14.50 – 15.05	<p><u>С.А. КРАТ</u>, Я.А. ВАСИНА, Ю.М. ГАСПАРЯН, А.А. ПИСАРЕВ</p> <p>Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"</p> <p>ИЗОТОПНЫЙ ОБМЕН ВОДОРОДА В ЛИТИЕВЫХ ПЛЕНКАХ</p>
15.05 – 15.25	<p><u>Н.Н. ДЕГТЯРЕНКО</u>, А.А. ПИСАРЕВ, М.И. ШУТИКОВА</p> <p>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»</p> <p>РАЗВИТИЕ МОДЕЛИ РАДИАЦИОННОЙ ДЕФЕКТНОСТИ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ВОЛЬФРАМА</p>
15.25 – 15.45	<p><u>V.KH. ALIMOV</u>^{1,2,3}, <u>O.V. OGORODNIKOVA</u>², <u>A.V. SPITSYN</u>⁴, <u>N.P. BOBYR</u>⁴, <u>Y. HATANO</u>³, <u>J. ROTH</u>⁵, <u>K. SUGIYAMA</u>⁵, <u>M. BALDWIN</u>⁶, <u>R. DOERNER</u>⁶, <u>M.H.J.T HOEN</u>⁷, <u>H.T. LEE</u>⁸, <u>Y. UEDA</u>⁸, <u>T. HAYASHI</u>⁹</p> <p>¹A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry ²National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia ³Hydrogen Isotope Research Center, University of Toyama, Toyama, Japan</p>

	<p>⁴National Research Center 'Kurchatov Institute', Moscow, Russia ⁵Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP), Garching, Germany ⁶Center for Energy Research, University of California San Diego (UCSD), USA ⁷FOM-DIFFER, Nieuwegein, The Netherlands ⁸Graduate School of Engineering, Osaka University, Osaka, Japan ⁹National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST), Rokkasho, Japan</p> <p>HYDROGEN ISOTOPE RETENTION IN REDUCED-ACTIVATION FERRITIC/MARTENSITIC STEELS</p>
15.45-16.05	<p>В.Л. БУХОВЕЦ¹, А.Е. ГОРОДЕЦКИЙ¹, Р.Х. ЗАЛАВУТДИНОВ¹, А.В. МАРКИН¹, В.И. ЗОЛОТАРЕВСКИЙ¹, И.А. АРХИПУШКИН¹, Л.П. КАЗАНСКИЙ¹, Т.В. РЫБКИНА¹, А.М. ДМИТРИЕВ², А.Г. РАЗДОБАРИН², Е.Е. МУХИН²</p> <p>¹ Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва ² Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург</p> <p>ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ОКОН В УСЛОВИЯХ ОЧИСТКИ В ВЧ РАЗРЯДЕ В D₂, Ne И ИХ СМЕСЯХ</p>
16.05 – 16.25	<p>А.М.ДМИТРИЕВ¹, Н.А.БАБИНОВ¹, А.Н.БАЖЕНОВ¹, И.М.БУКРЕЕВ¹, Л.А.ВВАРШАВЧИК¹, А.Н.КОВАЛЬ¹, Г.С.КУРСКИЕВ¹, А.Е.ЛИТВИНОВ¹, С.В.МАСЮКЕВИЧ¹, Е.Е.МУХИН¹, А.Г.РАЗДОБАРИН¹, Д.С.САМСОНОВ¹, В.А.СОЛОВЕЙ¹, В.В.СОЛОХА¹, С.Ю.ТОЛСТЯКОВ¹, И.Б.ТЕРЕЩЕНКО¹, А.Е.ГОРОДЕЦКИЙ², В.Л.БУХОВЕЦ², А.В.МАРКИН², А.П.ЗАХАРОВ², Р.Х.ЗАЛАВУТДИНОВ², Ал.П.ЧЕРНАКОВ³, Ан.П.ЧЕРНАКОВ³, П.В. ЧЕРНАКОВ³, А.С.СМИРНОВ⁴, Т.В.ЧЕРНОИЗЮМСКАЯ⁴, А.А.КОБЕЛЕВ⁴, И.А.МАРЦИНОВСКИЙ⁴</p> <p>¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург ²ИФХЭХ им. Фрумкина, Москва ³ЗАО Спектрал-Тех, Санкт-Петербург ⁴СПбГПУ им. Петра Великого, Санкт-Петербург</p> <p>ЧИСТКА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ЕМКОСТНОМ РАЗРЯДЕ В БЛАГОРОДНОМ ГАЗЕ</p>
16.25-17.00	Дискуссия
17.00	Welcome together (103, корп. 33, кафедра физики плазмы, надо одеваться)

С.В. МИРНОВ^{1,2}

¹АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»,
Троицк, Москва,

²НИЯУ МИФИ, Россия, 115409, г. Москва, Каширское ш.31

О РЕЗУЛЬТАТАХ V МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИИ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ В УСТАНОВКАХ УТС

25-27 сентября в Москве под патронажем РФН и НИЯУ МИФИ (РФН грант №15-12-30027) состоялся пятый Международный симпозиум по применению жидких металлов для термоядерных устройств (ISLA-5). Этот симпозиум продолжил ряд аналогичных (ISLA-1-4), посвященных использованию лития в плазменных термоядерных устройствах, впервые проведенных в Японии в 2010 году и продолженных затем в Принстоне, (США) в 2011 году, во Фраскатти, (Италия ENEA) в 2013г, и Гранаде, Испания (CIEMAT) в 2015г. Основное внимание симпозиума было уделено применению жидких металлов в создании и защите внутренних компонентов термоядерных реакторов, непосредственно контактирующих с плазмой (ККП). Однако наряду с этим обсуждались и другие актуальные технологические аспекты применения жидких металлов в технологии УТС (например, использование ртутных насосов при работе с тритием). Обостряющаяся актуальность проблемы связана с тем, что переход от секундных рабочих импульсов термоядерных установок к стационарному режиму термоядерного горения требует развития новых материалов ККП, способных к самовосстановлению и удалению продуктов эрозии первой стенки токамака-реактора без прерывания его рабочего цикла. На симпозиум были представлены последние результаты, полученные по применению лития в виде заполненных им капиллярно-пористых систем, на отечественных токамаках:Т-11М и Т-10, на итальянском токамаке FTU, а также на стеллараторе TJ-II (Испания). Sensацию вызвали первые успешные опыты по применению в токамаке FTU заполненных оловом капиллярно-пористых лимитеров. Другим сенсационным успехом, представленных на симпозиум стало получение на токамаке EAST (КНР) 100 секундных разрядных импульсов в Н-режиме с одновременным использованием вольфрамового дивертора и интенсивной литиевой инжекцией. Успешная работа симпозиума еще раз продемонстрировала, что ISLA остается самой серьезной и важной международной встречей, посвященной технологии применения жидких металлов в установках магнитного синтеза. В отличие от вольфрама и других твердых “материалов”, жидкие металлы могут обеспечить возобновляемую поверхность ККП даже после воздействия

чрезвычайно высоких энергетических нагрузок. Литий позволяет уменьшить количество легких и тяжелых примесей в основной плазме. Инжекция лития позволяет смягчить взаимодействие плазма-стенка. На симпозиум было представлено 38 докладов и 12 постеров, представляющих 26 научных учреждений 14 стран.

Все презентации доступны в режиме онлайн на веб-сайте конференции (<http://www.isla2017.mephi.ru/>). Ряд представленных докладов будет опубликован в ближайшее время в журналах «Физика плазмы» и ВАНТ (серия Термоядерный синтез).

Л.Е. ЗАХАРОВ

LiWFusion, P.O. Box 2391 Princeton NJ 08543, USA lezprinceton@gmail.com

ЛИТИЙ ДЛЯ ТОКАМАКОВ

Литий всегда был неотъемлемой частью термоядерных исследований как необходимый материал в банкете будущих реакторов. Здесь акцент делается на потенциальной роли лития для решения плазменно-физической части программы, которая имеет 60-ти летнюю историю, к сожалению, не вполне успешную.

В последние 20 лет наблюдается всплеск интереса к использованию лития в связи с улучшением параметров плазмы за счёт литизации стенки в экспериментах на токамаках TFTR и T11-M и затем на многих установках. Несмотря на накопленный опыт, потенциальное значение и роль лития для прогресса в термоядерных исследованиях экстраполируется прямолинейно и в конфликте с физическими свойствами лития и с физикой плазмы токамаков.

Три свойства лития: низкое Z , жидкая форма при низкой температуре плавления (180.5 C), и уникальное свойство поглощать атомарные или ионизированные изотопы водорода, определяют его реальное значение для термояда. Другие жидкие металлы не представляют интереса как контакт с высокотемпературной плазмой из-за большого Z и спатеринга.

Типично, жидкие металлы рассматриваются как “неразрушаемая” поверхность пригодная для отвода энергии из плазмы. На самом деле, это неверно. Низкая теплопроводность лития и других жидких металлов делает его (и их) непригодными для снятия энергии из плазмы. 20 мегаджоулей испаряют 1 кг лития, в то время как добавление литиевой гранулы меньшей миллиграмма срывает плазму на токамаке EAST. При этом надежды на мистические “экранирование и охлаждение некорональным излучением” никогда не имели физической почвы и представляют рецепт для инициализации срывов. Быстрое течение для снятия энергии жидкими металлами в сильном поле токамаков невозможно.

В реальности, проблема снятия энергии из плазмы будущих токамаков не имеет решения в рамках принятых сейчас плазменных режимов с недостаточным удержанием энергии, скомпрометировавших себя на токамаках TFTR, JET в 1990-ых годах.

В отличие от этого, текущий жидкий литий, способный подавить рециклинг плазмы на стенках камеры до уровня ниже 50 %, и предотвратить охлаждение плазмы, даёт практический подход не только к снятию энергии

но к моим другим проблемам плазмы токамаков, которые сдерживают прогресс в этой области физики.

Низкий рецилинг в сочетании с NBI (Neutral Beam Injection) автоматически означает новый режим удержания с потенциально удвоенным временем удержания энергии в плазме, когда её потери определяются диффузией частиц, а не турбулентной теплопроводностью. Увеличенное удержание энергии значительно уменьшает мощности нагрева и потоки энергии из плазмы. Это оказывается справедливым и для горячей DT плазмы, для которой также возможен режим с подавленным тепловым потоком.

Данное выступление сосредоточено на технологических вопросах, связанных с внедрением режима LiWF (Lithium Wall Fusion). Основу технологии составляет дивертор с непрерывно текущим литием, названной мной 24/7-FLiLi. Жидкий литий подаётся извне токамака с полным расходом 1 г/с, который подаётся на обращённую к плазме поверхность диверторных пластин и образует 0.1 мм плёнку, движущуюся под действием гравитации (0.5-1 см/с) вдоль пластин и затем в коллектор с трубкой, соединённой с подающей системой вне токамака. Во время разряда, 24/7-FLiLi поглощает изотопы водорода из плазмы и обеспечивает LiWF режим с высоким удержанием. Между разрядами, этот же дивертор чистит камеру от примесей. В то же время, 24/7-FLiLi не взаимодействует с магнитным полем токамака.

Для демонстрационных целей и для нынешних экспериментов 24/7-FLiLi готова для рабочего конструирования и изготовления. Для будущего применения, следующие технологические исследования представляются необходимыми:

1. Надёжные способы соединения фольги из нержавеющей стали с криволинейной медной поверхностью.
2. Долговечность нержавеющей стали в контакте с текущим литием при температуре ниже 400 С.
3. Десорбция и рецилинг водорода и примесей из объёма лития.
4. Долговечность нержавеющей стали в контакте с текущим литием при температуре до 700 С при наличии электрического тока из лития на стенку.
5. Отработка смачивания нержавеющей стали литием для потенциального восстановления прерванного течения.

Доклад обсуждает эти вопросы в деталях.

А.С. РОХМАНЕНКОВ, А.В. ЯНИЛКИН

ФГУП Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Автоматики им. Н.Л. Духова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДЕСОРБЦИИ ВОДОРОДА ИЗ ГИДРИДА ТИТАНА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПУЧКА ИОНОВ

Изучение поведения водорода в металлах и их сплавах имеет большое значение из-за практического использования водород-металлических систем для поглощения ядерного излучения, в источниках нейтронов и для хранения водорода. Эта работа посвящена моделированию поведения водорода в гидридах титана. Изучение базировалось на молекулярной динамике (МД) и численных методах механики сплошных сред. Для МД моделирования использовались программные пакеты LAMMPS и VASP. Для расчетов методами механики сплошных сред использовался OpenFOAM.

Были получены коэффициенты диффузии водорода для различных температур и концентраций водорода в титане. Подобраны константы для описания экспериментов по термодесорбции водорода. Подбор констант производился несколькими методами глобальной минимизации целевой функции.

С помощью первопринципных методов определена зависимость энергии когезии H в TiHx от концентрации водорода. С использованием этой зависимости проведено моделирование поведения водорода в титановом образце с учетом термодесорбции при воздействии ионного пучка.

ЗАХВАТ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В ВОЛЬФРАМ ПРИ ЕГО ПЕРИОДИЧЕСКОМ ПЛАЗМЕННОМ ОБЛУЧЕНИИ

Бериллий и вольфрам выбраны в качестве материалов первой стенки и дивертора ИТЭР, соответственно. В виду вероятного присутствия кислородной примеси в плазме ИТЭР можно ожидать наличия оксидов на их поверхностях, а также на поверхности напылённого на вольфрам бериллиевого слоя. Разработка метода низкотемпературного удаления изотопов водорода из вольфрама и вольфрама с бериллиевыми слоями актуальна с точки зрения безопасности, т.к. захват трития элементами первой стенки и дивертора токамака лимитирован величиной 700 г.

Барьерные свойства оксидных слоёв по отношению к диффузии водорода хорошо известны [1-4]. В работе [1] было показано, что барьерные свойства оксидного слоя на нержавеющей стали по отношению к диффузии изотопов водорода изменяются при ионном и плазменном облучении. Обнаружено, что при облучении нержавеющей стали 12X18Н10Т атомами водорода и ионами водородной плазмы с примесью кислорода, значительно активизируется проникновение изотопов водорода через поверхность нержавеющей стали (явление активированного проникновения через поверхность – АПП), обеспечивая ускорение захвата и десорбции изотопов водорода при низких температурах (≤ 500 К).

В данной работе исследуется возможность использования явления АПП для создания методики низкотемпературного удаления изотопов водорода из вольфрама и вольфрама с покрытием алюминия при облучении ионами водородной плазмы с примесью кислорода.

Показано, что явление АПП развивается на поверхностях вольфрама и вольфрама с алюминиевым покрытием. Особенности развития явления АПП на вольфраме и на поверхности алюминиевого покрытия на вольфраме позволяют заключить, что рост захвата трития в вольфрамовые тайлы дивертора ИТЭР при работе реактора может быть остановлен при их периодическом облучении потоками слабоионизированной дейтериевой плазмы с малой примесью кислорода. Близость параметров оксидных слоёв бериллия и алюминия [5] допускает возможность подобным же образом предотвратить рост захвата трития в диверторные тайлы, покрытые слоем бериллия, и бериллиевые тайлы первой стенки ИТЭР.

Литература

1. Begrambekov L., Grunin A., Kaplevsky A. et al. / *J. of Surf. Inv. X-ray, Synch. and Neut. Tech.* 2015. V. 9. P. 190–195.
2. Kurokawa H, Oyama Y et al. / *J. of Electrochem. Soc.* 2004. V. 151 (8). P. 1264-1268.
3. Ishikawa Y., Nemanic V. / *Vacuum.* 2003. V. 69. P. 501-5123.
4. Zhang G., Wang X., Xiong Y. et.al. / *Int. J. of Hydr. En.* 2013. V. 38. P. 1157-1165.
5. Marot L., Linsmeier Ch., Eren B. et al. / *Fus. Eng. And Des.* 2013. V. 88. P. 1718-1721.

РАЗВИТИЕ МОДЕЛИ РАДИАЦИОННОЙ ДЕФЕКТНОСТИ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ВОЛЬФРАМА

1. Метод DFT применен для исследования рекомбинации вакансий и собственного междоузельного атома вольфрама в форме краудиона в случае, когда вакансия создается на периферии краудиона и либо свободна, либо занята атомом гелия или водорода или шестью атомам Н, образующих комплекс VN6.
2. Собственные междоузельные атомы вольфрама, имеющего ОЦК решетку, преобразуются в дефект гантельного типа (с различной возможной ориентацией), либо в квазилинейный дефект – краудион в направлении [111]. Расчет вероятности преобразования одиночного междоузельного атома в дефект того или иного типа – это отдельная задача. Однако, вблизи внешней поверхности кристаллита образование краудиона более вероятно, в связи с несимметричностью окружения соседних поверхностных атомов W для собственных междоузлий. Показано, что линейный размер краудиона вдоль превышает 10 межатомных расстояний в направлении [111].
3. Атом гелия препятствует рекомбинации вакансии с собственным междоузельным атомом вольфрама в форме-краудиона. Это означает, что кластеры V-He действуют как стопор рекомбинации пар Френкеля.
4. В случае наличия в вакансии атома одного водорода рекомбинацию пары Френкеля проходит, при этом атом водорода вытесняется из области вакансии в междоузельное пространство.
5. Показано, что если вакансия, находится на одной линии с краудионом и на его периферии и содержит 6 атомов водорода, то также возможна блокировка процесса рекомбинации вакансии с собственным междоузельным атомом. Эффективность блокировки зависит от расстояния от центра краудиона до комплекса VN6.
6. Таким образом, заполнение вакансий атомами He и кластером 6H действуют как фактор, усиливающий радиационное повреждение вольфрама, в особенности, его приповерхностной области.

ДИВЕРТОРНАЯ МИШЕНЬ ДЛЯ ДЕМО РЕАКТОРА

Проанализированы условия работы диверторной мишени в реакторе ДЕМО и определены наиболее критические проблемы. Проведен сравнительный анализ известных подходов к обеспечению работоспособности конструкции: газовый дивертор в паре с мишенью как в проекте ИТЭР и жидкометаллические мишени. Очерчены пределы реализации таких подходов. Предложена альтернативная концепция и эскизная проработка диверторной мишени, работоспособной в условиях чрезвычайно высоких стационарных тепловых нагрузок (вплоть до 40 МВт/м²), ожидаемых в реакторе-токамаке демонстрационного типа. Концепция основана на движимой вертикально поперек теплового потока мишени, обеспечивающей размазывание пиковой нагрузки по большой площади вольфрамовой облицовки мишени. Возвратно-поступательное перемещение мишени с частотами в диапазоне от 0.1 до 1 Гц осуществляется с амплитудой до ± 15 см. Для обеспечения теплового контакта между подвижной облицовкой в виде полых цилиндров и неподвижными коаксиально встроенными трубками отвода тепла использован жидкий металл с низким давлением насыщенных паров. Очерчен круг кандидатных жидких металлов и выбран наиболее актуальный для данной концепции критерий селекции лучшего кандидата. Приведена кинематическая и гидравлические схемы работы мишени, сделаны оценки температур составных частей конструкции. Рассматриваются варианты оптимизации конструкции и режимов качания мишени. Обсуждаются различные аспекты использования наиболее перспективного материала для ДЕМО – малоактивируемой ферритно-мартенситной стали, а также вопросы откачки гелия и накопления трития, частичной замены мишени, вопросы активации и другие. Обозначены критические вопросы, подлежащие дальнейшему изучению, и оценены минимальные ресурсы (финансовые и временные), достаточные для продвижения концепции до уровня использования в реализуемых «в металле» проектах.

И.М. ПОЗНЯК^{1,2}, В.М. САФРОНОВ^{1,3}, В.Ю.ЦЫБЕНКО^{1,2}

¹*Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований*

²*Московский физико-технический институт (государственный университет)*

³*Проектный центр ИТЭР, Москва*

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ РАСПЛАВЛЕННОГО СЛОЯ МЕТАЛЛА ПРИ УСЛОВИЯХ ХАРАКТЕРНЫХ ДЛЯ ELM-СОБЫТИЙ И СРЫВОВ В ИТЭР

Во время быстрых плазменных процессов (ELM-событий и срывов) защитные покрытия дивертора и первой стенки ИТЭР будут находиться под действием мощных плазменно-тепловых потоков [1]. Подобные условия невозможно воспроизвести на существующих токамаках, поэтому для модельных экспериментов используются плазменные ускорители или мощные электронные пучки.

В проведенных ранее экспериментах на плазменном ускорителе КСПУ-Т выполнялось облучение металлических покрытий потоками плазмы с параметрами, ожидаемыми при быстрых процессах в ИТЭР [2]. Показано, что облучение интенсивными потоками плазмы вызывает сильную эрозию материалов, основным механизмом которой является перемещение расплавленного слоя вдоль поверхности покрытий. Вследствие перемещения расплава на поверхности материала образуется кратер эрозии с волнообразным рельефом и кольцевым подъёмом (“бруствером”) на периферии. Эрозия такого типа вызовет снижению толщины защитных покрытий дивертора и первой стенки ИТЭР, что приведёт к уменьшению их ресурса.

На данный момент существует несколько проработанных гипотез и теорий движения расплава, включающих в свою основу разнообразную природу сил и механизмов, которые могут быть ответственны за перемещение расплава. Так в статье [2] представлена гипотеза о перемещении расплава градиентом давления плазмы; в расчётно-теоретических работах [3,4] в качестве основных компонент движущей силы учтены градиент поверхностного натяжения, сила Ампера и сила поверхностного трения между расплавом и плазмой. В [5] подробно описан возможный механизм воздействия приповерхностного плазменного потока на волны расплавленного слоя, так что “плазменный ветер” вдоль покрытия эффективно действует на боковую поверхность волн, и это приводит к интенсивному течению расплава со скоростью 1-10 м/с. Все представленные теории и гипотезы требуют развития и дальнейшей проверки в эксперименте.

К данному моменту проведены эксперименты на КСПУ-Т, в которых мишени из двух разных сортов нержавеющей стали - марки 09X15H8Ю-1 и AISI 304 (аналог 08X18H10) – были подвергнуты плазменному облучению с длительностью 1 мс при двух различных максимальных тепловых нагрузках $Q = 1,05 \text{ МДж/м}^2$ и $Q = 1,5 \text{ МДж/м}^2$. Предполагалось, что на различных марках стали получатся отличающиеся картины течения расплава, характеризующиеся различным пространственным периодом и высотой волн. Согласно теоретической модели [5] это должно привести к разной скорости течения расплава – на поверхности с более высокими и частыми волнами скорость расплава была бы выше, а значит, получится более глубокий кратер эрозии. При этом условия облучения были выбраны так, чтобы максимальная тепловая нагрузка была больше $0,8-0,9 \text{ МДж/м}^2$, когда волны на поверхности расплава становятся выше 10 мкм и поддаются измерению с помощью имеющегося профилометра. При тепловых нагрузках более 2 МДж/м^2 , на поверхности мишеней образуются струи, сильно вытянутые в радиальном направлении, и тогда теория [5] не применима.

По измеренным профилям поверхности показано, что на мишенях стали 09X15H8Ю-1 волны имеют меньший пространственный период и два-три раза большую высоту, чем на мишенях из AISI 304. Тем не менее, кратеры эрозии не отличаются существенно по глубине, как можно было бы ожидать в соответствии кубической зависимостью скорости расплава от высоты волн, приведенной в [5]. По результатам эксперимента сделаны следующие возможные предположения:

-“плазменный ветер” не является основной силой, обеспечивающей движение расплава;

-существует другой закон взаимодействия “плазменного ветра” и волн;

-происходит сильное торможение расплава на неоднородностях подложки, влияние оказывает структура материала;

-существует сильная обратная связь по силам, тормозящим расплав – например, волна эффективно тормозится присоединяемой при ее движении массой расплава;

-большую роль играет нестационарность процесса – не уравниваются разгоняющие и тормозящие силы за время облучения; волны растут на протяжении всего процесса с разным темпом на различных материалах.

В дальнейшем для проверки этих предположений планируется провести серию экспериментов по облучению других металлов и их сплавов, что позволит получить широкую вариацию структур расплавленного металла на

поверхности покрытий. Также это поможет ответить на вопрос о причине отличий в параметрах неустойчивостей (волн) на разных металлах. Для проверки гипотезы о различии в скорости роста волн и неравномерности течения расплава предлагается эксперимент с варьированием продолжительности плазменного воздействия.

Литература

1. *Roth J. [et al.]* Recent analysis of key plasma wall interactions issues for ITER // *Journal of Nuclear Materials*, 2009, V.390-391, P.1-9.
2. *Позняк И.М., Климов Н.С., Подковыров В.Л., Сафронов В.М., Житлухин А.М., Коваленко Д.В.* Эрозия металлов при воздействии интенсивных потоков плазмы // *ВАНТ. Серия: термоядерный синтез.* 2008. Т. 35. Вып. 4. С.23-33.
3. *Bazylev B., Wuerz H.* Melt layer erosion of metallic armour targets during off-normal events of tokamaks // *Journal of Nuclear Materials*. 2002. V. 307-311. P. 69-73.
4. *Bazylev B.N., Janeschits G., Landman I.S., Pestchanyi S.E.* Erosion of microbrush tungsten after multiple intense transient events in ITER // *Fusion Engineering and Design*, 2005. V. 75-79. P. 407-411.
5. *Мартынченко Ю.В.* Эрозия поверхности металла в результате образования волнообразного рельефа под действием мощных плазменных потоков // *ВАНТ. Серия: термоядерный синтез.* 2012. Т. 35. Вып. 3. С. 41-43.

В.И. БАЧУРИН, И.И. АМИРОВ, И.В. ЖУРАВЛЕВ, М.О. ИЗЮМОВ,
В.В. НАУМОВ, С.Г. СИМАКИН
Ярославский филиал ФТИАН РАН, Ярославль

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ПЛЕНОК БОМБАРДИРОВКОЙ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНЫМИ ИОНАМИ АРГОНА ПЛАЗМЫ ИНДУКЦИОННОГО ВЧ РАЗРЯДА

Представлены результаты экспериментального исследования химического состава и топографии тонких пленок AlSi с содержанием кремния менее 1% после распыления поверхности низкоэнергетичными ионами Ag. Отличительной особенностью данного материала является существенное различия коэффициентов распыления и пороговой энергии распыления элементов соединения. Такая ситуация может реализовываться в конструкционных элементах контактирующих с плазмой материалов.

Тонкие пленки наносились на пластину окисленного монокристаллического кремния методом магнетронного распыления стандартных мишеней АК1, содержащих 1% кремния, на установке SCR 651 "Tetra" (Alcatel).

Распыление пленок проводилось в реакторе ВЧ индукционного разряда RDE 300. В качестве плазмообразующего газа использовался Ag.

Скорость распыления образцов ионами Ag^+ с энергией 40 -200 эВ измерялась *in situ* во время распыления методом лазерной интерферометрии и составляла от 0.2 до 2.5 нм/сек. Время распыления изменялось от 2 до 12 минут.

Химический состав поверхности исходных и распыленных пленок изучался на установках растровой электронной оже- спектроскопии (РЭОС) РН1 660 и вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) IONTOF V. В РЭОС пучок первичных электронов имел энергию 10 кэВ. В качестве анализирующего пучка на установке ВИМС использовался пучок ионов Bi^+ с энергией 25 кэВ. Регистрировались положительные вторичные ионы основных элементов пленки. Масс-спектры регистрировались в статическом режиме и были построены ионно-микроскопические изображения поверхности в различных ионах. В динамическом режиме было получено послышное распределение основных элементов пленки. Пучок ионов O_2^+ с энергией 500 эВ использовался для распыления поверхности. Электронно-микроскопическое изучение морфологии поверхности проводилось на растровом электронном микроскопе Supra 40. Использовались пучки электронов с энергией 20 кэВ. Угол падения пучка электронов к нормали

поверхности составлял 0° и 70° . Регистрировались отраженные электроны, и использовался топографический контраст.

Измерения состава пленок методом РЭОС проводились без очистки поверхности, поскольку проективный пробег ионов плазмы не превышал 1 нм. Поэтому концентрация молекул С и О составляла до 50%. Соотношение концентраций Al и Si определялось по отношению высокоэнергетичных оже пиков этих элементов с учетом коэффициентов относительной чувствительности. В исходных пленках оже сигнал Si был на уровне шума ($I_{Al}/I_{Si} \sim 18-19$), что свидетельствовало о концентрации кремния в пленке менее 1%. После распыления пленок ионами Ag^{+} с энергией 40-200 эВ соотношение I_{Al}/I_{Si} изменялось до $\sim 3-4$. То есть концентрация Si на поверхности увеличивалась до 20-25%.

Послойный анализ, выполненный с помощью ВИМС, показал, что после обработки пленок в аргоновой плазме ток вторичных ионов Si^{+} увеличивается на порядок по сравнению с исходным образцом. При этом наблюдается тенденция увеличения отношения сигналов I_{Si}/I_{Al} при уменьшении энергии ионов плазмы. Увеличение времени распыления пленок в плазме ионами одной энергии приводит к незначительному росту пика вторичных ионов Si^{+} на поверхности и увеличению толщины приповерхностного слоя с повышенным содержанием кремния в пленке.

Изучение топографии с помощью РЭМ показало, что исходные пленки имеют зернистую структуру с размером зерен порядка 20-100 нм. Кроме того наблюдаются отдельные участки размером 20 нм, выступающие на поверхности в виде холмов, которые имеют большую яркость. Предполагается, что это выделившиеся в отдельную фазу зерна кремния. После ионно-плазменной обработки пленок наблюдается почти двукратное уменьшение средних размеров зерен. Причем при распылении пленок AlSi ионами Ag^{+} с энергиями менее 100 эВ значительно увеличивается концентрация предполагаемых зерен Si. Подтверждением предположения о их составе являются ионно-микроскопические изображения, полученные во вторичных ионах Si^{+} на установке IONTOF V. Яркость изображения поверхности пленки после распыления в ионах Si^{+} значительно возрастает, общий ток вторичных ионов Si^{+} увеличивается в 20 раз.

Полученные результаты по модификации поверхности пленки AlSi при распылении образцов ионами аргоновой плазмы объясняются в рамках преимущественного распыления Al и различием пороговой энергии распыления Al и Si.

В.В. АНДРЕЕВ

ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»,
Чебоксары

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МИКРОРАЗРЯДОВ С TiO_2 СОДЕРЖАЩЕЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛЁНКОЙ В ЯЧЕЙКЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА

Сравнительно недорогие фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) могут быть разработаны на основе применения фотоэлектродов, представляющих собой, как правило, сенсibilизированную красителем нанопористую плёнку TiO_2 [1- 8]. При этом диэлектрический барьерный разряд (ДБР) используется для улучшения эффективности преобразования энергии ФЭП. Например, в работах [2, 3] отмечено, что результатом обработки ДБР являются снижение вакансий кислорода в поверхностной плёнке TiO_2 , ускорение сужения наночастиц TiO_2 , а также увеличение удельной площади поверхности и гидрофильности поверхностной плёнки TiO_2 . Вследствие воздействия этих факторов увеличивается адсорбция красителя на поверхностной плёнке TiO_2 .

В данной работе представлены результаты исследования воздействия микроразрядов в ячейке ДБР на поверхностные плёнки, приготовленные на основе кремнийорганических лаков и эмалей и нанесённые на поверхность текстолита. В поверхностные плёнки добавлялись порошкообразные Al_2O_3 и TiO_2 . Исследован элементный состав поверхностных плёнок в областях с различной степенью воздействия микроразрядов. Микроструктура плёнок была исследована методом сканирующей электронной микроскопии с полевой эмиссией (FE-SEM) на электронном микроскопе Hitachi SU8000. Съёмку изображений вели в режиме регистрации вторичных электронов при ускоряющем напряжении 30 кВ и рабочем расстоянии 8- 15 мм. Оптимизация аналитических измерений проведена в рамках описанного ранее подхода [9]. Перед съёмкой образцы помещали на поверхность алюминиевого столика диаметром 25 мм, фиксировали при помощи проводящего клея и напыляли на них проводящий слой углерода толщиной 13 нм при помощи метода магнетронного распыления, описанного ранее [10]. Морфология образцов исследовалась с учетом поправки на поверхностные эффекты напыления проводящего слоя [10]. Было осуществлено EDX-SEM исследование образцов и их картографирование с помощью энергодисперсионного спектрометра Oxford Instruments X-max. Перед измерением образцы были покрыты тонкой пленкой углерода (13 нм) с помощью углеродного напылителя Cressington 208.

Список литературы

1. Han L.Y., Islam A., Chen H., Malapaka C., Chiranjeevi B., Zhang S.F., Yang X.D., Yanagida M. High-efficiency dye-sensitized solar cell with a novel co-adsorbent // *Energy Environ. Sci.* 2012. V. 5. P. 6057-6060.
2. Teramoto Y., Shiono T., Ono R., Oda T. Surface Treatment of TiO₂ electrode for dye-sensitized solar cells using low-temperature and low-energy dielectric barrier discharge in air // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2011. V. 50. 036201.
3. Zen S., Teramoto Y., Ono R., Oda T. Development of low-temperature sintering technique for dye-sensitized solar cells combined with dielectric barrier discharge treatment // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2012. V. 51. 056201.
4. Kim Y., Yoon C.H., Kim K.J., Lee Y.H. Surface modification of porous nanocrystalline TiO₂ films for dye-sensitized solar cell application by various gas plasmas // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 2007. V. 25. P. 1219-1225.
5. Yuji T., Sung Y.M. Surface treatment of TiO₂ films by pulse plasma for dye-sensitized solar cells application // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2007. V. 35. P. 1010-1013.
6. Kim Y., Yoo B.J., Vittal R., Lee Y., Park N.G., Kim K.J. Low-temperature oxygen plasma treatment of TiO₂ film for enhanced performance of dye-sensitized solar cells // *J. Power Sources.* 2008. V. 175. P. 914-919.
7. Wu S., Han H., Tai Q., Zhang J., Chen B.L., Xu S., Zhou C., Yang Y., Hu H., Zhao X.Z. Improvement in dye-sensitized solar cells with a ZnO-coated TiO₂ electrode by rf magnetron sputtering // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 92. 122106.
8. Yuji T., Akatsuka H., Mungkung N., Park B.W., Sung Y.M. Surface treatment of TiO₂ films for dye-sensitized solar cells using atmospheric-pressure non-equilibrium DC pulse discharge plasma jet // *Vacuum.* 2009. V. 83. P. 124-127.
9. Качала В.В., Хемчян Л.Л., Кашин А.С., Орлов Н.В., Грачев А.А., Залесский С.С., Анаников В.П. Комплексное исследование структуры и механизмов получения и превращений газообразных, жидких и твердых химических систем методами масс-спектрометрии, спектроскопии ЯМР и электронной микроскопии // *Успехи химии.* 2013. Т. 82. №7. С. 648-685.
10. Кашин А.С., Анаников В.П. Формирование наноразмерных покрытий и наночастиц металлов путем магнетронного распыления и их исследование методом сканирующей электронной микроскопии // *Изв. АН. Сер. Хим.* 2011. №12. С. 2551-2556.

ИЗОТОПНЫЙ ОБМЕН ВОДОРОДА В ЛИТИЕВЫХ ПЛЁНКАХ ПРИ ВЫДЕРЖКЕ В ГАЗЕ

Избыточное накопление радиоактивного изотопа водорода трития в соосаждённых слоях в термоядерных установках является проблемой с точки зрения радиационной безопасности и уже привело к отказу от использования углерода в ИТЭР. Удаление трития из соосаждённых слоёв, таким образом, является важной задачей, как для предотвращения его накопления, так и с целью его получения для использования в качестве топлива управляемой термоядерной энергетики.

Литий предлагается использовать в качестве материала обращённых к плазме элементов в рамках концепции жидкометаллической стенки реактора. Ранее уже было показано, что литий может накапливать большое количество изотопов водорода в со-осаждённых слоях [Krat и др., 2014]. Возможным каналом очистки лития от тяжёлых изотопов водорода, включая тритий, является изотопный обмен с более лёгкими изотопами водорода. В данной работе исследовался изотопный обмен между дейтерием и водородом в со-осаждённых литий-дейтериевых слоях.

Экспериментальные результаты были получены при помощи установки МР-2. Литий-дейтериевые слои были получены путём распыления литиевой мишени на основе капиллярно-пористой системы дейтериевой плазмы магнетронного разряда. Осаждение проводилось без дополнительного подогрева подложки. Анализ состава плёнок проводился при помощи термодесорбционной спектроскопии (ТДС), применявшейся для определения количества изотопов водорода в плёнках и кварцевых микровесов, с помощью которых определялась общая масса плёнок и, как следствие, количество лития в них. После осаждения, литиевые плёнки подвергались двум типам воздействия: выдержке в атмосфере дейтерия при одном атмосферном давлении в течение одного дня, и выдержке в протоке водорода при 1 Па давления в течение двух дней. Выдержки проводились при температурах подложки от комнатной до 200°C. Для экспериментов по выдержке в атмосфере также проводились опыты по обратному изотопному обмену, в которых литий-водородная плёнка выдерживалась в атмосфере дейтерия.

Было обнаружено, что изотопный обмен в направлении от дейтерия к водороду происходит при всех температурах. При этом при комнатной температуре, изотопный обмен наблюдался только после выдержки в

атмосфере водорода, а после выдержки в протоке водорода обнаружен не был. При комнатной температуре после одного дня контакта с атмосферой водорода содержание дейтерия в плёнке упало с ~25 атомных процентов до 20 ат. %, а содержание водорода повысилось с ~5 ат. % до ~10 ат. %. При этом полное содержание всех изотопов водорода осталось практически неизменным на уровне $(D+H)/Li \sim 30$ ат. %. ТДС-спектр десорбции изотопов водорода остался неизменным, с наибольшим количеством дейтерия, выходящим при температуре ~700 К, и некоторым выходом вплоть до ~1200 К. Обратный опыт по замене водорода на дейтерий не выявил изотопного обмена.

При 200 °С, после одного дня выдержки в атмосфере водорода, весь дейтерий был замещён на водород. При этом общее содержание изотопов водорода после выдержки оказалось на уровне ~20%, что говорит об отсутствии полного перехода плёнки в гидрид лития за счёт контакта с водородом. Это значение ниже концентрации изотопов водорода для плёнок, осаждённых в плазменном разряде при температуре подложки 200 °С, что говорит о полном насыщении или перенасыщении дейтерием плёнок при соосаждении.

Изотопный обмен наблюдался и при выдержке литий-дейтериевой плёнки в протоке водорода при 200°С. После двухдневной выдержки не весь дейтерий был замещён. При этом можно было наблюдать, что основное замещение происходило за счёт дейтерия, десорбция которого происходила в пике при ~700К, то есть за счёт объёмно накопленного дейтерия, а не дейтерия на поверхности плёнки.

В общем можно сказать, что низкотемпературный изотопный обмен может служить эффективным способом извлечения тяжёлых радиоактивных изотопов водорода из лития в токамаках.

Использованная литература

1. Krat S.A. и др. Deuterium release from lithium–deuterium films, deposited in the magnetron discharge // *Vacuum*. 2014. Т. 105. С. 111–114.

В.Л. БУХОВЕЦ¹, А.Е. ГОРОДЕЦКИЙ¹, Р.Х. ЗАЛАВУТДИНОВ¹, А.В. МАРКИН¹, В.И. ЗОЛОТАРЕВСКИЙ¹, И.А. АРХИПУШКИН¹, Л.П. КАЗАНСКИЙ¹, Т.В. РЫБКИНА¹, 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 имени А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*

ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ОКОН В УСЛОВИЯХ ОЧИСТКИ В ВЧ РАЗРЯДЕ В D₂, Ne И ИХ СМЕСЯХ

Основными результатами, касающимися эксплуатации зеркал, на данный момент является вывод о решающем вкладе в деградацию оптических свойств процессов осаждения материалов первой стенки и дивертора на поверхность зеркала. Один из возможных вариантов защиты зеркала – установка перед ним прозрачного окна (так называемое «первое окно»). Наиболее радиационно-стойкими материалами, сохраняющими свою прозрачность при радиационных воздействиях в условиях ИТЭР, являются плавленый кварц КУ-1 (SiO₂). В этом случае возникают задачи сохранения оптических характеристик окна (коэффициентов пропускания света). Остаётся актуальной разработка методики плазменной чистки окон от крошащихся пленок W, Be, C и других элементов, входящих в детали конструкции главной камеры.

Объектом исследования являлись макеты первого окна, защищающего устройства диагностики Томсоновского рассеяния в диверторе ИТЭР, выполненные из плавленого кварца КУ-1 (SiO₂).

Цель работы – отработка методики очистки окон от алюминиевых пленок, использованных как аналоги бериллиевых плёнок, и исследование стойкости диагностических окон в условиях воздействия ВЧ тлеющих разрядов в дейтерии и неоне, используемых в дальнейшем для очистки кварцевого окна от металлических загрязнений. В качестве основного критерия оптической стойкости выделен коэффициент пропускания света в интервале длин волн 400-1100 нм при длительной экспозиции в плазме тлеющего разряда.

В качестве одного из возможных методов чистки в данном отчете рассматривается возможность удаления металла с поверхности плавленого кварца КУ-1 в скрепленных разрядах высокой частоты (частота 13,56 МГц) и постоянного тока (С-ВЧ-ПТ разряд) в среде дейтерия, неона или D₂/Ne. Ток высокой частоты с нагруженного электрода, площадью 1 см², с закреплённым на нём кварцевым образцом 0,2x1x1 см³, через ёмкость образца протекал перпендикулярно оси положительного столба разряда постоянного тока на электрод, площадью 10 см². Ёмкостной асимметричный

ВЧ разряд создавал автосмещение, которое создавало поток положительных ионов к образцу, а разряд постоянного тока позволял стабилизировать горение ВЧ разряда в диапазоне давлений от 2 до 100 Па. Эксперименты проводили при величине постоянного тока 30 мА, мощности ВЧ генератора 50 Вт, давлении 15 Па плазмообразующих газов, D₂, Ne и смеси D₂ + Ne.

Образцы взвешивали до и после экспозиции в плазме на ультрамикровесах с точностью до 0,5 мкг. Эксперименты показали, что в С-ВЧ-ПТ разрядах распыление предварительно нанесённых пленок Al происходит со скоростью порядка 1 нм / мин. Скорость чистки поверхности окон, так же, как и распыление самого кварца, возрастает по мере увеличения содержания неона в смеси.

В процессе работы проводились исследования спектров пропускания (СП), а также элементного состава поверхности и приповерхностных слоев после экспозиции в плазме с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РСМА), рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), и морфологии поверхности кварца с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ). После удаления плёнки Al, пропускательная способность кварца КУ-1 возвращалась в исходное состояние. При плазменном распылении самого кварца коэффициент пропускания света остается постоянным при удалении слоя толщиной до 0,5 мкм.

По результатам анализов СП, РСМА, РФЭС, АСМ можно утверждать, что экспозиция кварцевого окна в С-ВЧ-ПТ разряде при энергиях налетающих ионов дейтерия и неона 30-100 эВ сопровождается распылением окна с уменьшением шероховатости. Следы восстановления поверхностных слоев SiO₂ до субоксидов или кремния отсутствуют, так как подавляющее число распыленных атомов приходится на один - два первых слоев оксида. Пропускательная способность окна остаётся неизменной с точностью 0,5% в интервале длин волн 400-1000 нм.

Проведенные в работе морфологические и элементные исследования кварца показали, что методика предварительной механической обработки крайне важна при определении радиационной стойкости поверхностных слоев в плазме С-ВЧ-ПТ разряда.

Определены коэффициенты пропускания света сквозь макеты окон из кварца КУ-1 на различных этапах плазменного воздействия. Длительное облучение в плазме очищенной от металла поверхности сопровождается разлущением «квазисотовой» структуры поверхности с некоторым увеличением средней эффективной шероховатости до 1,5 нм, но с сохранением светопропускаемости.

А.Г. ПОСКАКАЛОВ^{1,2}, Н.С. КЛИМОВ^{1,2}, Ю.М. ГАСПАРЯН¹,
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

ИЗМЕНЕНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ВОЛЬФРАМА И НАКОПЛЕНИЕ ДЕЙТЕРИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ НАГРУЗКАХ

В Международном термоядерном реакторе ИТЭР в качестве обращенных к плазме материалов будут использоваться вольфрам (W) и бериллий (Be). Из вольфрама будет изготовлено защитное покрытие диверторных пластин, а из бериллия — поверхность первой стенки. Наиболее значительные повреждения защитных покрытий ожидается во время переходных плазменных процессов, таких как ЭЛМ-события, тепловая стадия срыва, ослабленный срыв. 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 на диверторные пластины будут достигать величины 0,6 – 3,5 ГВт/м², что будет вызывать периодическое повышение температуры материала до температуры, сопоставимой с температурой плавления материала [1, 2]. Лазерные источники, источники на основе ионных и электронных пучков, а также мощные плазменные ускорители применяются для исследования эрозии обращенных к плазме материалов и испытания защитных покрытий токамака ИТЭР.

Согласно проведенным ранее исследованиям на плазменном ускорителе КСПУ-Г (ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Россия) [5], и установке на основе электронного пучка JUDITH (Forschungszentrum Jülich, Germany) [6] установлено, что формирование трещин на поверхности вольфрама является основным механизмом разрушения вольфрама при импульсных тепловых нагрузках, лежащих ниже порога плавления его поверхности. При превышении порога плавления существенный вклад в общую эрозию вносят движение расплавленного слоя и выброс капель.

В настоящей работе проводилось облучение вольфрама потоком водородной плазмы длительностью 0,8 мс и тепловой нагрузкой 0,2 – 2,5 МДж/м² (0,3 – 3 ГВт/м²) с целью: (а) исследовать закономерности изменения кристаллической структуры поверхностного слоя вольфрама под действием

плазменного облучения; (б) исследовать закономерности захвата газа приповерхностным слоем вольфрама во время облучения импульсным потоком плазмы.

После плазменного облучения образцы исследовались с использованием электронной микроскопии. Осуществлялось исследование облученной поверхности вольфрама, а также сколов, выполненных поперек облучаемой поверхности. Методами термодесорбционного анализа производилось исследование захваченного вольфрамом во время облучения газа.

В результате исследования поперечных шлифов облученных образцов установлено, что при тепловых нагрузках превышающих порог плавления кристаллическая структура вблизи облучаемой поверхности образца вольфрама претерпевает существенные изменения уже после 1 импульса. Толщина модифицированной области растет с ростом тепловой нагрузки и достигает максимального значения в исследованном диапазоне плотности энергии около 100 мкм (рисунок 1).

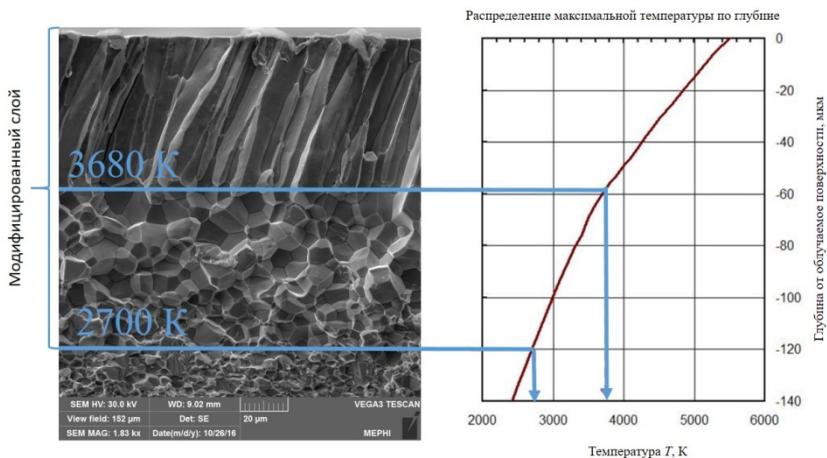


Рисунок 1. Снимок электронным микроскопом поперечного скола образца облученного дейтериевой плазмой длительностью импульса 0,8 мс и тепловой нагрузкой 2,5 МДж/м² и распределение максимальной температуры по глубине. Наблюдаются слои столбчатых (длина до 50÷60 мкм, толщина до 5÷20 мкм) и равноосных кристаллов (поперечные размеры в диапазоне 5÷20 мкм) с распределением максимальной температуры по глубине.

Самый верхний слой состоит из одного ряда игольчатых кристаллов, ориентированных перпендикулярно облучаемой поверхности. Толщина

кристаллов 0,4 – 0,6 мкм, а длина, совпадающая с толщиной слоя, не превышает 4 мкм. Наблюдаемая структура слоя типична для случая быстрой направленной кристаллизации. Этим можно объяснить то, что структура наблюдается непосредственно вблизи поверхности, где скорость кристаллизации достигает максимальных значений.

Второй слой наблюдается всегда, когда есть плавление поверхности вольфрама. Его нижняя (наиболее удаленная от облучаемой поверхности) граница достаточно резкая и совпадает с расчетной границей расплавленного слоя (в момент его максимальной толщины). Слой состоит из столбчатых кристаллов ориентированных перпендикулярно облучаемой поверхности. Характерная длина кристаллов сравнима с толщиной расплавленного слоя, поэтому растет с ростом плотности энергии, и в области максимальной тепловой нагрузки ($2,5 \text{ МДж/м}^2$) достигает значений 50 – 60 мкм, а ширина варьируется в диапазоне 5 – 20 мкм.

Третий, самый нижний слой, имеет размытую нижнюю (наиболее удаленную от облучаемой поверхности) границу и представляет собой переходную область от слоя столбчатых кристаллов к неизменной структуре в глубине материала. Этот слой имеет толщину сопоставимую с толщиной предыдущего (расплавленного) слоя и состоит из равноосных кристаллов с характерным размером в диапазоне 5 – 20 мкм. Размер кристаллов уменьшается как с глубиной, так и с уменьшением тепловой нагрузки. Соответственно можно сделать вывод, что размер кристаллов падает с уменьшением максимальной температуры в области их формирования.

Сопоставление экспериментальных данных с данными численного решения уравнения теплопроводности при параметрах, соответствующих условиям облучения, позволяет установить температурные границы для второго и третьего слоя. Как отмечено выше, нижняя граница второго слоя (слоя столбчатых кристаллов) совпадает с расчетной границей расплава, то есть соответствующей температуре плавления вольфрама, равной 3683 (К). Третий слой (слой равноосных кристаллов) сверху ограничен, соответственно, температурой плавления, а положение его нижней границы варьируется в диапазоне температур 2600 – 3100 (К).

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 $(3 - 4) \cdot 10^{16}$ частиц/см², и на порядок

превосходит соответствующие значения, полученные для образцов, на которых следы плавления отсутствовали $\sim 1 \cdot 10^{15}$ частиц/см² (рисунок 2).

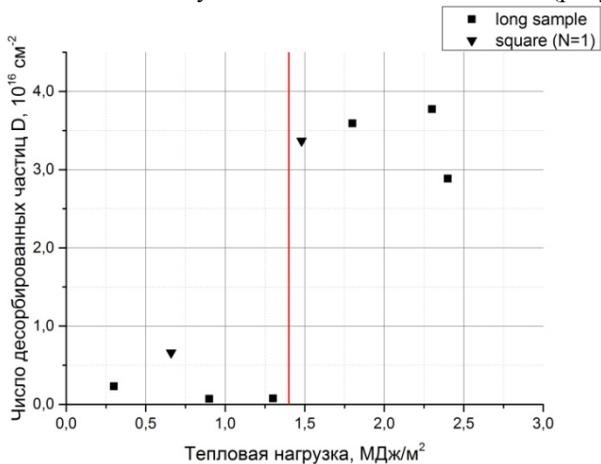


Рисунок 2. Зависимость числа десорбированных частиц с единицы поверхности от тепловой нагрузкой (граница плавления вольфрама при импульсе длительностью 0,8 мс - 1,4 МДж/м²).

Этот факт указывает на существенный рост захвата изотопов водорода вольфрамом при плазменно-тепловых нагрузках превышающих порог его плавления.

Литература:

- [1] Loarte A. et al. Progress on the application of ELM control schemes to ITER scenarios from the non-active phase to DT operation. — Nucl. Fusion, 2014, vol. 54, p. 033007.
- [2] Loarte A. et al. Transient heat loads in current fusion experiments, extrapolation to ITER and consequences for its operation. — Phys. Scr., 2007, vol. 128, p. 222—228.
- [3] V.P. Budaev et al, Tungsten recrystallization and cracking under ITER-relevant heat loads, Journal of Nuclear Materials 463 (2015) 237–240
- [4] Gerald Pintsuk, Characterization of ITER tungsten qualification mock-ups exposed to high cyclic thermal loads, Fusion Engineering and Design 98–99 (2015) 1384–1388

А.Н. ЩЕРБАК¹, С.В. МИРНОВ¹, В.Б. ЛАЗАРЕВ¹, Я.А. ВАСИНА¹,
И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ², А.В. ВЕРТКОВ², М.Ю. ЖАРКОВ²

¹АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»,
Троицк, Москва,

²АО «Красная Звезда», Москва

СРАВНЕНИЕ ЗАХВАТА ДЕЙТЕРИЯ И ВОДОРОДА ЛИТИЕВЫМИ КОЛЛЕКТОРАМИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ КОЛЛЕКТОРА НА ТОКАМАКЕ Т-11М

В ходе предыдущей экспериментальной кампании на токамаке Т-11М исследовалась эффективность гладкого металлического покрытия (а также капиллярно-пористого покрытия) в качестве коллектора по отношению к падающим на него ионам лития в зависимости от температуры поверхности коллектора в рамках модели эмиттер-коллектор, которая впоследствии может быть предложена для будущих термоядерных источников нейтронов (ТИН) [1]. Кроме того, изучался вопрос захвата водорода литием, осажденным на таких коллекторах, также в зависимости от температуры поверхности коллектора с целью выбора оптимальной рабочей температуры коллекторов в будущих ТИН для предотвращения накопления изотопов водорода в рабочей камере токамака-реактора.

В результате, было обнаружено, что в рамках модели непрерывной циркуляции лития в будущих ТИН накопления трития внутри разрядной камеры можно избежать, если температура ее стенок будет находиться в диапазоне $350 \pm 50^\circ\text{C}$. При этом допустимый температурный предел сбора лития гладкой металлической мишенью из водородно-литиевой плазмы может находиться существенно выше, вблизи $450 \pm 50^\circ\text{C}$ [2].

В рамках настоящей работы проводилось исследование захвата дейтерия гладким литиевым коллектором в зависимости от температуры поверхности коллектора, и производилось его сравнение с динамикой захвата водорода коллекторной мишенью в предыдущей кампании.

В экспериментах использовалась гладкая коллекторная мишень с возможностью ее нагрева до 600°C [3]. Все эксперименты проводились в типичных разрядах токамака Т-11М: $I_p=70$ кА, $V_T=1,4$ Тл, $t=200$ мс, $n_e=3 \div 5 \cdot 10^{19}$ см⁻³. В отличие от прошлой кампании настоящая конфигурация литиевых лимитеров включает в себя 3 литиевых лимитера на основе капиллярно-пористой системы (КПС): вертикальный литиевый лимитер служит основным эмиттером лития, продольный литиевый лимитер используется в качестве литиевого коллектора, кроме того, в камере Т-11М был установлен дополнительный продольный литиевый лимитер,

аналогичный первому. Чтобы исключить влияние дополнительного продольного лимитера на сбор лития коллекторной мишенью, в процессе экспериментов он находился в ненагретом состоянии.

Анализ лития, осаждаемого на коллекторной мишени, осуществлялся с помощью «пламенного анализа» – по спектральной эмиссии лития в пламени газовой горелки [4]. А анализ выхода дейтерия из лития, захваченного мишенью, изучался с помощью стандартной масс-спектрометрии путем нагрева мишени (термодесорбционная спектроскопия (ТДС)) до 570°C.

На рис. 1 приводятся основные результаты по захвату дейтерия (черная кривая) и лития (красная кривая) коллекторной мишенью в зависимости от рабочей температуры поверхности литиевого коллектора. Четко видно, что захват дейтерия коллекторной мишенью снижается до 0 при рабочей температуре поверхности коллектора масштаба 400°C, в то время как сбор лития уменьшается всего в 6 раз, что аналогично результатам, полученным при работе с водородом.

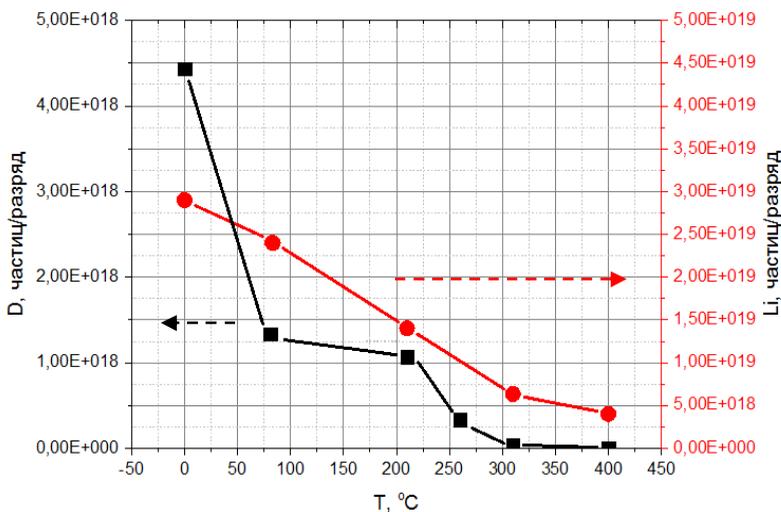


Рис. 1 Зависимость захвата лития и дейтерия в зависимости от температуры поверхности коллекторной мишени

При этом абсолютные оценки показывают, что максимальное число атомов дейтерия, захваченных осажденным литием, может достигать 16% на

атом лития при температуре поверхности мишени вблизи 0°С и снижаются на порядок и более при повышении температуры до 300°С. Что также сопоставимо с результатами захвата водорода литием на коллекторной мишени, полученными в предыдущей кампании.

Список литературы:

- [1]. S.V. Mirnov et al. Nuclear Fusion 55 (2015) 123015
- [2]. А.Н. Щербак и др. «Исследование зависимости сбора лития и водорода коллекторной мишенью от температуры поверхности мишени в системе эмиттер-коллектор на токамаке Т-11М», в сб. XX конференции по взаимодействию плазмы с поверхностью, Москва, НИЯУ МИФИ, 26-27 января 2017 г., с. 52
- [3]. М. Ю. Жарков и др. «Устройства для сбора лития в вакуумной камере токамаков Т-11М и Т-10», в сб. XX конференции по взаимодействию плазмы с поверхностью, Москва, НИЯУ МИФИ, 26-27 января 2017 г., с. 46
- [4]. Н.С. Полуэктов. Методы анализа по фотометрии пламени. М.: Госхимиздат, 1959. 231с.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ МИШЕНИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

На основе численных и экспериментальных исследований были установлены основные механизмы формирования рельефа поверхности при воздействии интенсивных плазменных потоков. Показано, что образование макрократера на поверхности мишени обусловлено развитием неустойчивости Рихтмайера-Мешкова после окончания облучения в течение времени существования расплава.

В качестве исследуемого материала было выбрано железо, массовая плотность, коэффициент поверхностного натяжения и коэффициент вязкости были взяты из [1] для температуры расплава железа 1800 К. В начальный момент времени поверхность расплава задавалась без возмущений, т.е. как абсолютно гладкая. Давление на поверхность расплава и линейные размеры системы, задавались в соответствии с условиями эксперимента [2], для плотности поглощенной энергии 20 Дж/см², количество импульсов $N=1$. В расчетах динамика системы прослеживалась в течение 200 мкс, что соответствует времени существования расплава, давление ударно сжатого слоя учитывалось в течение времени действия компрессионного плазменного потока (КПП) на мишень (80 мкс).

Расчеты по модели, описанной в [4], показали, что на временах действия КПП наблюдается развитие капиллярных волн на поверхности мишени, после окончания действия КПП наблюдался рост амплитуды возмущений за счет развития неустойчивости Рихтмайера-Мешкова до момента кристаллизации.

Также теоретически установлено, что неоднородное поле скоростей, формируемое в расплаве при его радиальном движении по поверхности мишени, приводит к росту упругой энергии в расплаве, что может сопровождаться распадом расплава на отдельные фрагменты. Теоретически было объяснено наблюдаемое в эксперименте явление образования волнообразного рельефа поверхности.

Экспериментально [2,3,5] и теоретически [6] установлено, что при воздействии компрессионных плазменных потоков на вещество расплав движется по поверхности мишени в радиальном направлении из области более высокого давления, связанного с действием самого плазменного потока, в область более низкого давления. Движение расплава по

поверхности твердотельной части мишени сопровождается его охлаждением и, как следствие, торможением. Неоднородное поле скоростей, формируемое, таким образом, в расплаве, приводит к деформации среды и, соответственно, росту упругой энергии расплава, что может сопровождаться распадом расплава на отдельные фрагменты. В случае если упругой энергии будет достаточно для образования новой поверхности, то мы будем наблюдать фрагментацию расплава. Распад расплава не будет наблюдаться в случае, если время, в течение которого запасается упругая энергия, необходимая для распада, будет меньше характерного гидродинамического. Гидродинамическое время определяется как отношение характерного пространственного масштаба образовавшегося фрагмента к скорости звука - c_s .

Оценим количество фрагментов, на которое будет распадаться расплав. Поскольку задача осесимметричная, то удобно рассматривать задачу о разрушении кольца расплава на фрагменты. Площадь поверхности одного фрагмента запишем в виде

$$\Delta f = h \left[(r_b + r_a) \frac{2\pi}{N} + 2(r_b - r_a) \right],$$

r_b - внешний радиус кольца, r_a - внутренний радиус кольца, h - высота кольца (расплава), N - количество частей на которое распадется расплав.

Характерное гидродинамическое время можно определить, как $t_i = (r_b - r_a) / c_s$. Поверхностную энергию данного фрагмента можно записать как $U_\sigma = \sigma \Delta f$, где σ - коэффициент поверхностного натяжения.

Запишем полную энергию кольца расплава: $\varepsilon = N(U_\sigma + T)$

T - кинетическая энергия кольца.

Запишем упругую энергию в единице объема для кольца в виде:

$$\varepsilon_\delta = \frac{K(V - V_0)^2}{2V_0}, \text{ где } K - \text{модуль всестороннего сжатия, } V_0, V - \text{начальный и}$$

конечный объем. Так как $\varepsilon_\delta = \varepsilon$, можно найти количество фрагментов, на

которое распадется кольцо:
$$N = \pi (r_a + r_b) \left[\frac{\varepsilon_\delta - \tau}{2\sigma} - \frac{1}{r_b - r_a} \right], \text{ где } \tau = \frac{\rho v^2}{2} -$$

кинетическая энергия единицы объема.

Фрагментацию расплава, и как следствие образование волнообразного рельефа поверхности, можно хорошо видеть в экспериментах [2,5]. Для сравнения экспериментальных и теоретических исследований, будем рассматривать расплав железа при $T=1800$ К, коэффициент поверхностного

натяжения, плотность модуль всестороннего сжатия были взяты из [1] для данных условий. Из экспериментов [2, 5] можно определить количество фрагментов, на которое распадается расплав, а также отношение поперечного размера фрагмента к продольному λ_2/λ_1 . Согласно [2] λ_2/λ_1 составляет $\sim 0.4-0.6$. Количество фрагментов, на которое распадается расплав, составляет $N=100-300$ фрагментов. По этим двум параметрам и будем проводить сравнение. Численные значения таких параметров будем получать согласно теоретической модели о фрагментации расплава описанной выше. Необходимо отметить, что согласно численным исследованиям скорость движения расплава по поверхности мишени составляет $0.1-1$ м/с. Поэтому все наши результаты должны укладываться в этот диапазон скоростей. Результаты приведены для различных толщин кольца, для $r_b = 1 \text{ мм}$.

Численные исследования показали, что более тонкое кольцо разрушаться на более мелкие фрагменты при одинаковой разнице скоростей внешней части расплава и внутренней. При увеличении разности скоростей фрагменты становятся более вытянутыми. Это хорошо согласуется с экспериментальными данными [2, 3]. Также численные исследования показали, хорошее согласие с экспериментальными данными, как для числа фрагментов, так и для отношения поперечного размера фрагмента к продольному размеру.

Отметим, что при воздействии интенсивных плазменных потоков на медную мишень фрагментация расплава не наблюдается, это связано с высокой теплопроводностью меди. Характерное время температуропроводности меди $t_\chi = H^2 / \chi$ (H – толщина расплава, χ – коэффициент температуропроводности) в ~ 5 раз меньше, чем для железа. Для расплава толщиной 5 мкм характерное гидродинамическое время меди сопоставимо с ее временем температуропроводности ~ 0.2 мкс, а для железной мишени $t_\chi \sim 1.1$ мкс. Таким образом, расплав меди не успевает распасться на фрагменты.

Литература

1. И.С. Григорьев. Физические величины. Справочник. /Под. редакцией Григорьева И.С., Е.З. Мейлихова. // Энергоатомиздат, М, 1991, 1234 с.
2. В.М. Асташинский, А.Я. Лейви, К.А. Талала, В.В. Углов, Н.Н. Черенда, А.П. Яловец. Изменение рельефа поверхности мишени при обработке компрессионными плазменными потоками. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, -2013.-№ 10. -С. 99–106

3. А.Я. Лейви, В.М. Асташинский, Н.Н. Черенда, В.В. Углов, А.П. Яловец. Формирование рельефа поверхности металлической мишени при воздействии компрессионных плазменных потоков// Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. -2014. -№ 6. - С.12-18 DOI: 10.7868/S0207352814060055
4. A.Y. Leivi, A.P. Yalovets, V.S. Krasnikov. The liquid-phase mass transfer of material in the film–substrate system exposed to intense energy flows// High Temperature Material Processes: an international journal. 2015. Т. 17. № 1. С. 15-24.
5. Климов Николай Сергеевич. Макроскопическая эрозия материалов при их облучении интенсивными потоками плазмы. // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. ТРИНИТИ, 2011, 209 с.
6. A. Ya Leivi, A.P. Yalovets Numerical study of mass transfer of a material under intensive flows of high-speed electrons and plasma // IOP Journal of Physics: Conference Series **830** (2017) doi :10.1088/1742-6596/830/1/012071

А.М.ДМИТРИЕВ¹, Н.А.БАБИНОВ¹, А.Н.БАЖЕНОВ¹, И.М.БУКРЕЕВ¹,
Л.А.ВВАРШАВЧИК¹, А.Н.КОВАЛЬ¹, Г.С.КУРСКИЕВ¹, А.Е.ЛЛИТВИНОВ¹,
С.В.МАСЮКЕВИЧ¹, Е.Е.МУХИН¹, А.Г.РАЗДОБАРИН¹, Д.С.САМСОНОВ¹,
В.А.СОЛОВЕЙ¹, В.В.СОЛОХА¹, С.Ю.ТОЛСТЯКОВ¹, И.Б.ТЕРЕЩЕНКО¹,
А.Е.ГОРОДЕЦКИЙ², В.Л.БУХОВЕЦ², А.В.МАРКИН², А.П.ЗАХАРОВ²,
Р.Х.ЗАЛАВУТДИНОВ², Ал.П.ЧЕРНАКОВ³, Ан.П.ЧЕРНАКОВ³,
П.В. ЧЕРНАКОВ³, А.С.СМИРНОВ⁴, Т.В.ЧЕРНОИЗЮМСКАЯ⁴,
А.А.КОБЕЛЕВ⁴, И.А.МАРЦИНОВСКИЙ⁴

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

²ИФХЭХ им. Фрумкина, Москва

³ЗАО Спектрал-Тех, Санкт-Петербург

⁴СПбГПУ им. Петра Великого, Санкт-Петербург

ЧИСТКА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ЕМКОСТНОМ РАЗРЯДЕ В БЛАГОРОДНОМ ГАЗЕ

Введение

Более двадцати оптических диагностик токамака ИТЭР имеют внутри-вакуумные оптические компоненты и нуждаются в разработке способов чистки от напыленных материалов эрозии первой вакуумной стенки [1]. В первую очередь это относится к диагностическим зеркалам и окнам, расположенным в непосредственной близости от плазмы токамака. Поверхности диагностических зеркал будут подвержены осаждению пленок, состоящих преимущественно из Ве с примесями O, N, D, W [2–4], а также их соединений [5]. В качестве основного инструмента для очистки и восстановления оптических свойств поверхности на данный момент рассматривается высокочастотный емкостной (ВЧЕ) разряд, в котором очищаемое зеркало играет роль одного из электродов. Ионы, ускоренные в приэлектродном слое ВЧЕ разряда, бомбардируют поверхность зеркала, приводя к физическому распылению или химическому травлению осадений.

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, подаваемой мощности и т.д.). Ведется экспериментальное исследование влияния типа рабочего газа и частоты [6,7] на параметры ионного потока, и как следствие – на скорость и эффективность чистки. Результаты экспериментальных и численных исследований для различных материалов зеркал, схем подведения ВЧ мощности, а также влияния магнитного поля токамака, представлены в

работе[7].

В данной работе представлены результаты экспериментального и расчетного исследования параметров ионного потока (плотности тока и функции распределения ионов по энергиям) на заземленный и нагруженный электроды в ВЧЕ разряде низкого давления в благородном газе (He, Ne, Ar, Kr, Xe) в диапазоне рабочих частот 40-100 МГц. На основании полученных данных о параметрах ионного потока сделана оценка скорости удаления бериллиевых и вольфрамовых осадений в приближении распыления толстых пленок. Для описания эффективности очистки использован параметр селективности распыления, показывающий отношение скоростей распыления загрязняющих осадений по отношению к скорости распыления поверхности зеркала.

1. Результаты измерений и расчетные параметры ионных потоков на электроды в ВЧЕ разряде

Параметры приэлектродных слоев вблизи заземленного и нагруженного электродов в ВЧЕ разрядах низкого давления существенно различаются ввиду сильной несимметричности разрядов такого типа [8]. Нагруженный электрод в этом случае приобретает отрицательный постоянный потенциал по отношению к земле. Следовательно, энергия ионов, ускоряющихся в слое у заземленного электрода, оказывается существенно ниже энергии ионов, бомбардирующих поверхность нагруженного электрода. Максимум ФРИЭ на заземленном электроде находится в области очень низких энергий, недостаточных для распыления металлических покрытий [9], и практически не зависит от частоты. Изменение давления рабочего газа в разрядной камере существенно влияет на положение пика и форму ФРИЭ, с тенденцией увеличения энергии при уменьшении давления. При этом, на заземленном электроде, даже в низком давлении, энергия ионов, достигающих, поверхность заземленного электрода, будет сравнима с порогом распыления металлических осадений (~ 40 эВ). В случае использования зеркала как нагруженного электрода, одним из критериев выбора базового давления является подавление процессов переосаждения распыленной с обоих электродов примеси на оптическую поверхность. Оптимизация рабочего давления возможна как экспериментальным путем в геометрии, моделирующей окружение оптического элемента в ИТЭР, так и путем численного моделирования, учитывающего транспорт распыленных частиц в нейтральном газе [10]. В экспериментах по исследованию параметров слоя ВЧ электрода было выбрано давление 2 Па.

Плотность тока на нагруженном электроде растет с увеличением рабочей частоты, что совпадает с поведением плотности плазмы, теоретически

описанным в [11]. При этом плотность тока оказалась выше в легких газах, что так же хорошо согласуется с теоретическими данными [8]. Известно, что в ВЧЕ разрядах низкого давления основная часть подведенной к разряду мощности тратится на ускорение ионов слоев. Исходя из этого утверждения при постоянной мощности, вложенной в разряд, рост тока при увеличении рабочей частоты должен сопровождаться уменьшением энергии ионов. Это качественное соображение подтвердилось расчетами ФРИЭ в слое ВЧ электрода. В качестве входных данных для расчетов ФРИЭ в слое ВЧ электрода использовались экспериментально измеренные ФРИЭ на заземленном электроде, ток на ВЧ электроде и автосмещение, измеренное между электродами.

При повышении частоты функция распределения смещается в область более низких энергий. При этом при низких частотах в виду уменьшения циклической ионной частоты [12] ФРИЭ уширяется. Низкоэнергетичная область функции распределения ионов по энергиям дает существенный вклад в полный поток ионов, ускоренных в слое, что обуславливает необходимость учета функции распределения при расчете коэффициента распыления материалов в ВЧЕ разряде.

2. Оценка скорости распыления. Селективность

Для оценки влияния формы ФРИЭ на скорость распыления был использован эффективный коэффициент распыления, определяемый как $Y_{mean} = \int_{\varepsilon_{min}}^{\varepsilon_{max}} IEDF(\varepsilon) y(\varepsilon) d\varepsilon / \int_{\varepsilon_{min}}^{\varepsilon_{max}} IEDF(\varepsilon) d\varepsilon$, где $y(\varepsilon)$ энергетическая зависимость коэффициента физического распыления взятая из [9], $IEDF$ – ФРИЭ в приэлектродном слое. Наибольшая скорость распыления бериллия достигается в гелиевом разряде на высоких рабочих частотах. Разряды в более тяжелых газах больше подходят для распыления вольфрамовых осаджений. Однако, использование разрядов тяжелых газов также эффективно распыляет и поверхность молибденовых зеркал.

Селективность распыления, равная отношению скорости очистки осаднения к скорости распыления поверхности зеркала подтверждает высокую эффективность гелия, как рабочего газа системы чистки зеркал от бериллиевых осаджений в токамаке. Разряды в тяжелых газах (Ne, Ar, Kr и Xe) обеспечивают близкие значения селективности чистки молибденового зеркала от вольфрамовых пленок. Однако ввиду того, что селективность в разрядах такого типа ниже или близка к единице, чистка вольфрамовых осаджений должна производиться как можно реже, чтобы предотвратить деградацию оптических свойств диагностических зеркал.

3. Выводы

В данной работе представлены результаты экспериментального

исследования и численного расчета параметров ВЧЕ разряда в различных благородных газах в зависимости от рабочей частоты и давления рабочего газа. Выявлено существенное влияние данных параметров на характеристики приэлектродных слоев и ионных потоков на нагруженный и заземленный электроды. С помощью эффективного коэффициента распыления проведена оценка скорости и селективности распыления бериллиевых и молибденовых осадений с поверхности молибденового зеркала. Сделан вывод, что для очистки зеркал от пленок Ве целесообразно использовать разряд в гелии на высоких рабочих частотах. Для удаления вольфрамовых осадений может быть использован ВЧЕ разряд в тяжелом газе. Однако такой разряд нельзя использовать часто, так как продолжительное использование такого метода чистки может привести к деградации поверхности молибденового зеркала.

Благодарность: Данная работа поддержана корпорацией Росатом (контракт - N.4к.52.9Б.14.1002) в рамках работ проводимых для организации ИТЭР. Решения и мнения представленные в данном докладе не обязательно выражают интересы организации ИТЭР.

Список литературы

- [1] A. Litnovsky et al., *Fusion Eng. Des.* 86 1780 (2011)
- [2] D. Ivanova et al., *PhysicaScripta* T159 (2014).
- [3] A Garcia-Carrasco et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 382 (2016) 91–95
- [4] M. Rubel et al., *Phys. Scr.* T145 (2011) 014070 (6pp)
- [5] Gorodetskii A.E. et al., 2011 *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.* 47 540 (2011)
- [6] L. Moser et al, *Phys. Scr.* T167 (2016)
- [7] Razdobarin A.G. et al., *Nucl. Fusion* 2015 55 (2015) 093022
- [8] E Kawamura, et al., *Plasma Sources Sci. Technol.* 8 (1999)
- [9] W. Eckstein, 2002 *IPP* 9/132 (2002)
- [10] Л.А.Варшавчик и др. Неделя науки СПбПУ. ИФНИТ. – СПб.:Из-во Политехн. ун-та, 2017.
- [11] Chung et al., *J. Appl. Phys.* 78 (II), 1995
- [12] M. A. Lieberman, *J. Appl. Phys.* • Vol. 65, No. 11, 1989

М.М. ХАРЬКОВ, А.В. КАЗИЕВ, Ю.М. ГАСПАРЯН,
Д.В. ДАНИЛЮК, А.А. ПИСАРЕВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ПУХА НА ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ В ПЛАЗМЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА

Экспериментально получены режимы облучения вольфрама ионами гелия в плазме высокочастотного индукционного разряда, приводящие к формированию наноструктурированного пуха на поверхности. Энергия ионов составляла 200 эВ. Варьировались доза облучения Φ , поток ионов Γ , а также температура образца T при обработке. Диапазоны изменения параметров составляли: Φ от $3,7 \times 10^{24} \text{ м}^{-2}$ до $2,1 \times 10^{25} \text{ м}^{-2}$ при Γ от $3,5 \times 10^{20} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ до $2,0 \times 10^{21} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$; $T = 1000\text{--}1300 \text{ К}$. Поверхности полученных образцов диагностировались на сканирующем электронном микроскопе FEI Versa 3D. На рис. 1 представлено СЭМ-изображение одного из образцов.

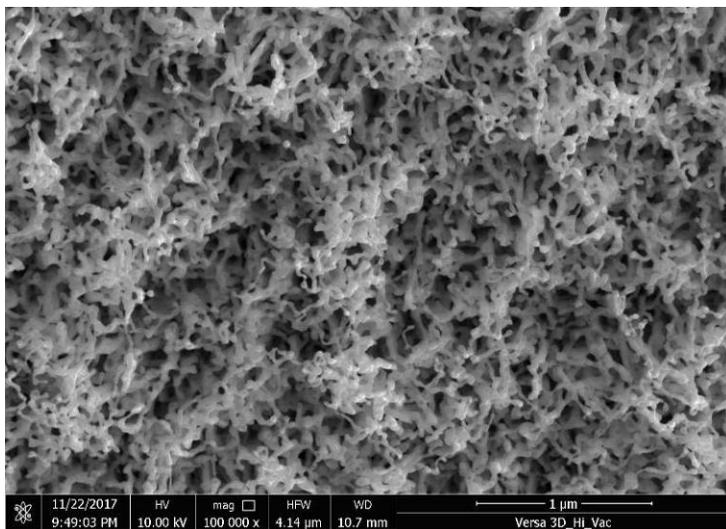


Рис. 1. Наноструктурированный пух на поверхности W
($\Phi = 2,1 \times 10^{25} \text{ м}^{-2}$, $T \sim 1200 \text{ К}$)

Поперечные размеры волокон составляют $\sim 10\text{--}20 \text{ нм}$, а их длина $\sim 300\text{--}1000 \text{ нм}$ в зависимости от режима обработки.

А.С. ПРИШВИЦЫН¹, В.Б. ЛАЗАРЕВ², С.В. МИРНОВ^{1,2}
¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
²АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛИТИЯ В ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА Т-11М ПО ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕЧЕНИЯ ЕГО НЕЙТРАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ

На токамаке Т-11М перед осенне-зимней экспериментальной кампанией 2017 года, был заменен вертикальный лимитер – источник (эмиттер) лития на новый, полностью заполненный литием. А также, был добавлен второй продольный лимитер – коллектор лития, симметричный имевшемуся ранее. Поэтому проводилось исследование распределение лития в пристеночной плазме токамака Т-11М и сравнение с данными предыдущей экспериментальной кампанией.

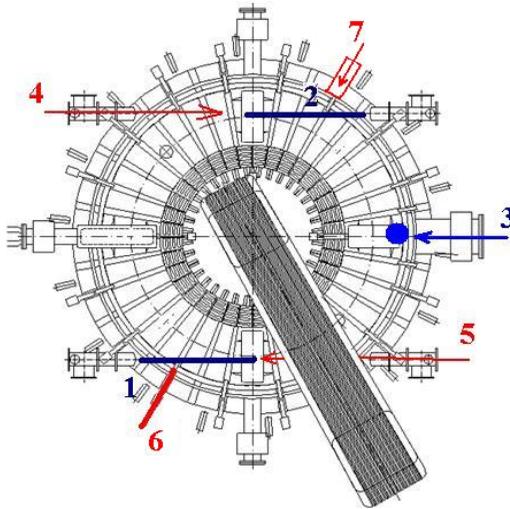


Рис.1 Расположение лимитеров и камер в токамаке Т11-М
1-горизонтальный лимитер (старый); 2-горизонтальный лимитер (новый); 3-вертикальный лимитер; 4,5-диагностические окна для высокоскоростных и ИК камер; 6-зонд Маха.

Было использовано два метода. Первый – исследование сбора лития мишенью в зависимости от ее (мишени) температуры. Так же производилось сравнение с данными предыдущей кампании (зима-весна 2017).

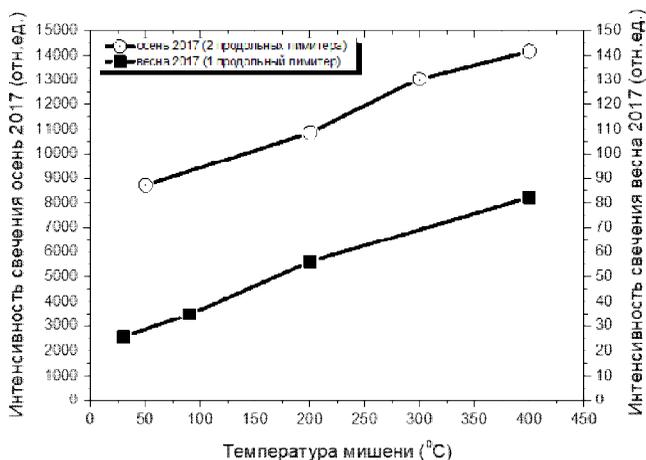


Рис.2 Зависимость средней интенсивности свечения нейтрального лития от температуры поверхности мишени.

Полученная зависимость по характеру слабо отличается от результатов для конфигурации токамака с одним продольным лимитером. Однако сами значения для одной и той же температуры отличаются на 2 порядка. Это обусловлено заменой вертикального лимитера – эмиттера лития на новый. Т.е. увеличилось общее количество лития в системе по сравнению с предыдущей экспериментальной кампанией.

Второй метод – исследование радиального распределения свечения нейтрального лития над поверхностью пластины подвижного зонда Маха. В данных экспериментах пластина зонда использовалась в качестве коллектора лития в процессе рабочего импульса токамака.

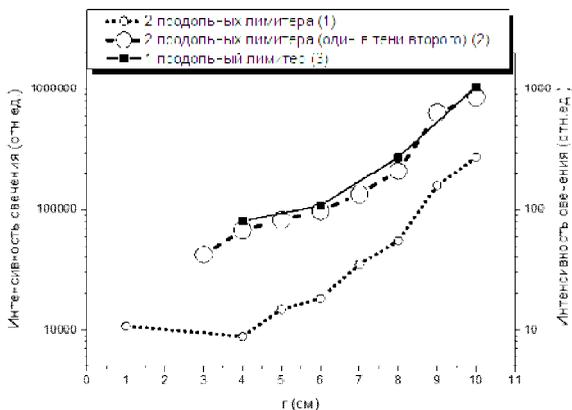


Рис.3 Зависимости интенсивности свечения лития на пластине зонда Маха от расстояния до стенки камеры. Шкала для 1, 2 зависимостей слева, для 3 справа.

Аппроксимируя экспериментальные кривые экспоненциальной функцией вида $e^{\frac{r}{\lambda}}$, получим значения для λ :

Номер кривой	1	2	3
λ , см	1,73	2,38	2,33

Таким образом, исходя из экспериментальных зависимостей можно сделать вывод, что при замене вертикального лимитера свечение нейтрального лития на пластине зонда Маха увеличилось на 2 порядка. Из анализа кривых (1) и (2) можно сделать вывод, что добавление дополнительного продольного лимитера существенно уменьшает количество лития в пристеночной плазме за счет увеличения площади поверхности коллекторов лития. Но в то же время в конфигурации токамака с двумя продольными лимитерами радиальное распределение концентрации лития становится более острым, т.е. литий собирается ближе к границе плазменного шнура.

Подводя итоги, можно сделать вывод, что замена вертикального лимитера повлияла только на общее количество лития в системе (увеличилось на 2 порядка), при этом не изменяя характерные зависимости радиального распределения интенсивности свечения на пластине зонда Маха и захват лития на криогенную мишень. Однако при установке второго продольного лимитера изменилось радиальное распределение лития в пристеночной плазме. Оно стало более острым, т.е. литий собирается ближе к границе плазменного шнура.

В.П. АФАНАСЬЕВ¹, А.С. ГРЯЗЕВ^{1,2}, П.С. КАПЛЯ³, О.Ю. РИДЗЕЛЬ^{1,4},
Н.Ю. СУББОТИН¹, М. КÖPPEN⁵

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

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

³Москва, Россия

⁴Institut für Angewandte Physik, Vienna University of Technology, Austria

⁵Berlin, Germany

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСЛОЙНЫХ ПРОФИЛЕЙ ДЕЙТЕРИЯ В БЕРИЛЛИИ НА ОСНОВЕ СПЕКТРОСКОПИИ ПИКОВ УПРУГО ОТРАЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ СКАНИРОВАНИЕМ

Рассматриваемый в настоящей работе метод анализа содержания изотопов водорода в бериллии очень часто называют электронным RBS (Rutherford Backscattering Spectroscopy), сравнивая его с давно известным методом анализа поверхности, основанным на спектроскопии процесса рассеяния легких ионов [1]. Спектроскопия пиков упруго отраженных электронов, или EPES (Elastic Peak Electron Spectroscopy), может быть реализована на установках, обладающих высоким энергетическим разрешением, способным фиксировать разность в потерях энергии электрона при его отражении от ядер с различной массой. Информационную глубину мишени определяет средняя длина пробега между двумя неупругими соударениями l_{in} . Величина l_{in} увеличивается с ростом энергии зондирующего пучка E_0 по закону $l_{in} \sim E_0^{0,8}$. Определяя среднее содержание изотопа водорода в слое порядка l_{in} при разных значениях энергии зондирующего пучка E_0 мы можем определить послойный профиль интересующего нас изотопа водорода.

Определение среднего по глубине l_{in} содержания изотопа водорода, в первом приближении, можно выполнять, используя SLA (Straight Line Approximation), в которой нисходящее движение электрона происходит по прямой в направлении зондирующего пучка электронов. Восходящий после рассеяний от ядра изотопа водорода поток электронов движется по прямой в направлении визирования, которое определяется осью энергоанализатора.

Учет влияния процессов многократного упругого рассеяния электронов на интенсивность сигнала электронного RBS выполняется в рамках малоуглового приближения на основе подходов, развитых в работах [2, 3].

Рассмотрим возможности процедуры энергетического сканирования изотопов водорода в бериллии используя серийно выпускаемые установки

электронной спектроскопии, в которых рабочий диапазон ограничивается максимальным значением энергии, как правило, равным 5 кэВ.

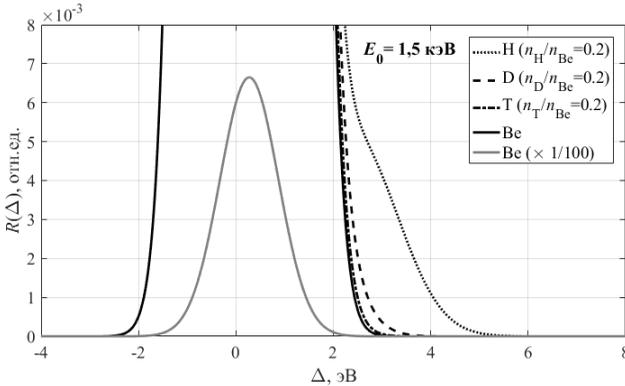


Рис. 1. Пики в энергетическом спектре электронов, отраженных от бериллия и изотопов водорода. Энергия зондирующего пучка $E_0 = 1,5$ кэВ.

Рис. 1 указывает на проблемы, возникающие при реализации процедуры вычитания фона для определения площадей под пиками дейтерия и трития. Сигнал EPES водорода хорошо заметен, что продемонстрировано в работе [4]. Из рис. 1 хорошо видна проблема более чем стократной разности в интенсивностях пиков бериллия и дейтерия, критерий Релея выполняется только для пика электронов, отраженных от протия.

Рис. 2 иллюстрирует принципиальную возможность регистрации дейтерия в бериллии для случая, когда относительная концентрация дейтерия в бериллии составляет 20 %. Рис. 3 иллюстрирует возможность уверенной регистрации дейтерия в бериллии для случая, когда концентрация дейтерия составляет 20 % от концентрации бериллия.

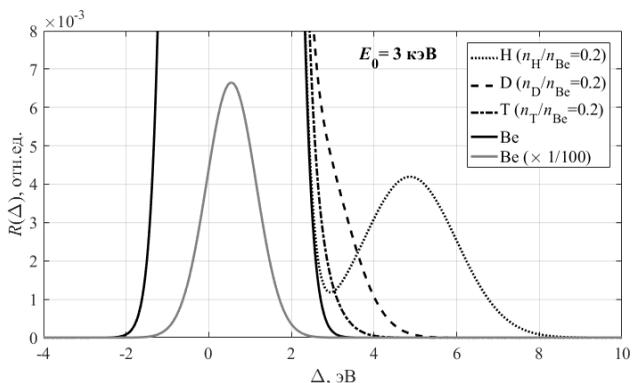


Рис. 2. То же, что и на рис. 1. Энергия зондирующего пучка $E_0 = 3$ кэВ.

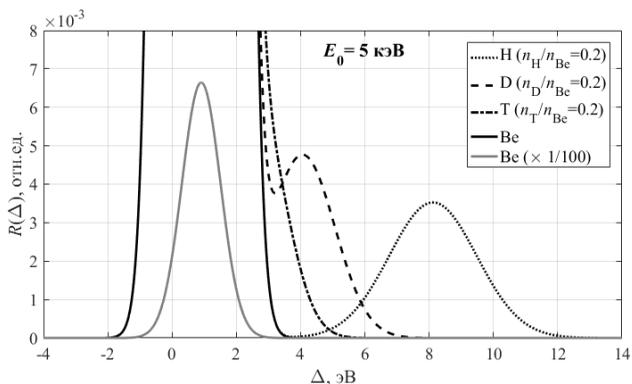


Рис. 3. То же, что и на рис. 1. Энергия зондирующего пучка $E_0 = 5$ кэВ.

Учитывая, что для разных энергий зондирования E_0 величина l_{in} различна, то существует возможность проводить энергетическое сканирование образцов. В данном исследовании по экспериментальным спектрам и на основе расчетов, связывающих площадь под упругими пиками с относительной концентрацией дейтерия в бериллии, мы получили величины средних по информационной глубине (l_{in}) относительных концентраций дейтерия в приповерхностном слое бериллии, представленных в табл. 1. Результат расчета спектра представлен на рис. 4.

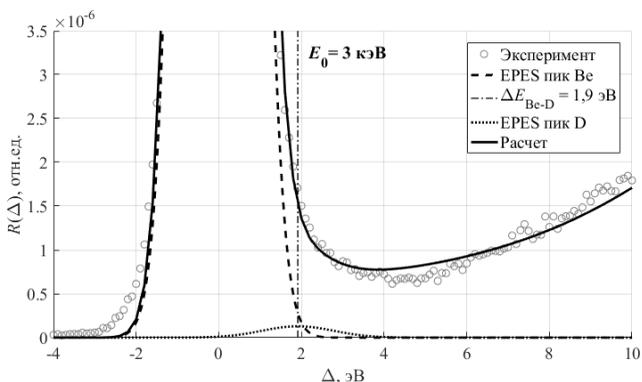


Рис. 4. EPES спектры от образца бериллия, имплантированного дейтерием ($2.01 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$), измеренные при энергии $E_0 \approx 3 \text{ кэВ}$. Сплошная линия – расчет, учитывающий многократные неупругие потери энергии; пунктирная линия – пик, сформированный электронами упруго отраженными от дейтерия.

Табл. 1. Результаты расчета относительных концентраций дейтерия в бериллии

$E_0, \text{кэВ}$	$l_{in}, \text{нм}$	n_D/n_{Be}
3	6,0	0,10
5	9,2	0,15

Работа была выполнена в рамках государственного задания № 3.1414.2017.

Список литературы:

- [1] Afanas'ev V.P., Gryazev A.S., Kaplya P.S., Köppen M., Ridzel O.Yu., Subbotin N.Yu., Hansen P. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 891. P. 012303.
- [2] Афанасьев В.П., Капля П.С., Лисицына Е. // Поверхность. Рентген-, синхротр. и нейтрон. исслед. 2016. № 3. стр. 66–71.
- [3] Afanas'ev V.P., Efremenko D.S., Kaplya P.S. // J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 2016. V. 210. Pp. 16-29.
- [4] Yubero F., Tókési K. // Appl. Phys. Letters. 2009. V. 95. P. 084101.

Д.Д. БЕРНТ¹, В.О. ПОНОМАРЕНКО¹, А.А. ПИСАРЕВ²
¹ООО «Пилкингтон Гласс», дер. Жуково Раменского р-на МО, Россия
²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ НАНОРАЗМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ РЕАКЦИОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ БИНАРНЫХ СПЛАВОВ ПЛАЗМОЙ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА

В настоящее время в прикладных тонкопленочных технологиях представляют интерес покрытия, обладающие сложной развитой морфологией поверхности, и проявляющие за счет этого дополнительные специальные качества, такие как, например, поверхностная гидрофобность/фильность или сниженное паразитное поверхностное контактное сопротивление [1].

Было показано, что введение N_2 в качестве дополнительной реакционной составляющей смеси рабочих газов в ходе осаждения би-металлических оксидов Zn-Sn-O и Si-Al-O при реакционном магнетронном распылении сплавных металлических мишеней приводит к росту олеофобных качеств поверхности получаемых слоев до 45% [2]. При этом РЭМ получаемых слоев демонстрирует, что нано-зерна на поверхности уменьшаются в размерах, а их плотность увеличивается. Не совсем понятен, однако, механизм, способствующий образованию описанной нанокристаллической структуры слоев, способствующей росту олеофобных качеств их поверхности. В частности не ясна роль N_2 .

Целью данной работы является изучение формирования наноразмерной структуры тонкопленочных би-металлических покрытий, получаемых методом физического осаждения из плазмы магнетронного разряда в присутствии кислородо-азотной реакционной смеси.

В рамках данной работы были экспериментально получены 3 серии образцов тонкопленочных покрытий на стекле, осажденных путем реакционного распыления в плазме магнетронного разряда биметаллических сплавных мишеней различных материалов с разной степенью легирования: легированный алюминием кремний SiAl со степенью легирования 10wt% Al, и легированный оловом цинк ZnSn со степенями легирования 10wt% Sn и 50wt% Sn для различных мишеней. Эксперименты проводились на промышленной установке ионно-плазменного осаждения тонкопленочных покрытий на стеклянные подложки сверхбольших площадей Von Ardenne GC330H. В качестве подложек выступали листы силикатного флот-стекла толщиной 4мм формата 2250×3640 мм.

Осаждение тонкопленочных слоев во всех трех сериях экспериментов осуществлялось в смешанной атмосфере рабочих газов, в качестве распылительной составляющей которой выступал аргон, а реакционной – одновременно напускаемые кислород и азот, при этом отношение величины потока газонапуска N_2 к O_2 варьировалось между образцами каждой из серий.

Последующий РФЭС анализ образцов продемонстрировал отсутствие включения азотной компоненты в состав тонкопленочных покрытий для всех использовавшихся материалов распыляемых мишеней и всех величин отношения потока газонапуска N_2 к O_2 в процессе осаждения.

Было предположено, что причиной формирования наноразмерной структуры поверхности полученных покрытий может служить т.н. аномальный рост зерен. Это явление энергетически выгодного формирования кристаллитов в матрице более мелких зерен-прекурсоров, образуемых, в свою очередь, примесью или легирующей составляющей материала [3]. Данный процесс хорошо известен в производстве керамик, например в стекловарении или электродуговом спекании многоэлементных керамических соединений. В нашем случае атомы легирующих компонент на катоде и подложке более активны по отношению к кислороду и образуют оксиды быстрее, чем атомы основного металла. По всей видимости, из-за невысокой концентрации этих примесей их оксидные зерна на подложке имеют небольшие размеры, и растущие поверх них зерна оксидов основного металла также имеют малые размеры. Результирующий размер зерен многоэлементного слоя описывается формулой Кларка:

$$\delta = \frac{1}{3} \left(\frac{x_i - x_i^0}{x_i^L} \right) G \quad (1)$$

где δ – толщина слоя; G – средний диаметр зерен, принимаемых за глобулы; x_i – концентрация вводимой в систему примеси; x_i^0 – ее предел растворимости; x_i^L – равновесная концентрация примеси в жидкой фазе. Можно заметить, что размер зерен слоя будет уменьшаться с увеличением концентрации участвующей в его образовании примесной составляющей.

Для описания поступления формирующих покрытия элементов на подложку, была использована расчетная симуляция на базе программного пакета SRIM/SIMTRA+RSD [4]. Учитывалась эволюция распылительной системы во времени за счет: учета профиля распыления мишени для используемой геометрии катодов, соответствующего учета перераспыления и неравномерности профиля тока распыляющих частиц на мишень с учетом реакционного режима работы, а также учета предела насыщения

поверхности мишени при хемосорбции реакционных компонент смеси рабочих газов.

Для всех материалов распыляемых мишеней расчеты продемонстрировали отсутствие поступления на подложку нитридов металлических компонент при всех использованных в экспериментах газонапусках азота. Это связано, видимо, с более высокой реакционной способностью кислорода, который стремится замещать собой азот при формировании отравленного слоя мишени. Кислород также стремится замещать азот в слое, формирующемся на подложке. Таким образом, формирование оксинитридов и нитридов при реакционном распылении в смеси O_2 и N_2 возможно лишь при очень высоком содержании азота в газовой смеси. Данное явление описывалось, например, в [5], где в зависимости от баланса газонапуска O_2 и N_2 наблюдалось два состояния переходного (т.е. промежуточного на гистерезисе между полностью металлическим и полностью отравленным) режима реакционного распыления Ti-мишени. «Оксидное» состояние, с формированием оксида титана на подложке, и «нитридное» - обеспечивавшее формирование оксинитрида титана. Каждое из состояний обладало характерным поведением с точки зрения изменения интенсивностей характеристического излучения компонент плазмы разряда. Анализ спектров характеристического излучения плазмы во всех наших экспериментах показал, что распыление мишени осуществлялось в «оксидном» состоянии отравления, что согласуется с результатами расчетов и РФЭС.

Численные расчеты также демонстрирует увеличение парциальной концентрации поступающего на подложку оксида легирующей компоненты по отношению к концентрации оксида основной металлической компоненты распыляемого сплава с увеличением потока газонапуска азота (Рис. 1-А). Это должно приводить к увеличению количества зародышей зерен оксидов примеси, и соответственно уменьшению размеров зерен оксидов основного металла. Полученный на базе этих результатов согласно (1) характер зависимости между величиной потока газонапуска N_2 и средним диаметром зерна покрытия дает хорошее согласие с экспериментальными данными АСМ (Рис. 1-В).

Данный результат позволяет утверждать, что механизм аномального роста зерен может быть использован для описания формирования наноразмерной структуры тонкопленочных би-металлических покрытий, реакционно осаждаемых из плазмы магнетронного разряда в реакционной кислородо-азотной газовой смеси.

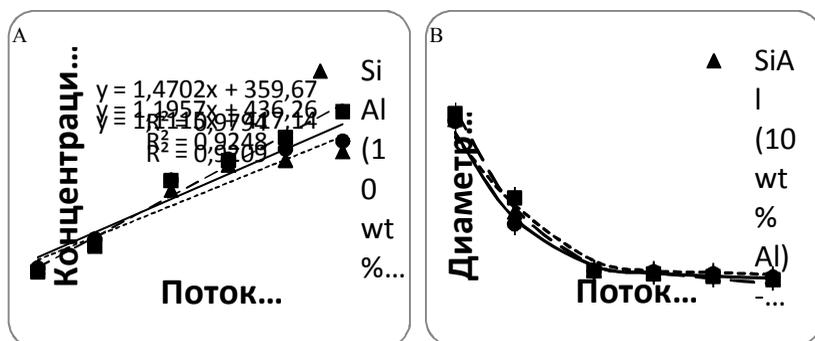


Рис. 1: Зависимость от величины газонапуска N_2 для А - концентрации оксида легирующей составляющей в формирующейся пленке; и В - диаметра зерен для случаев всех материалов использовавшихся мишеней.

Введение азота в качестве дополнительной реакционной компоненты смеси рабочих газов способствует увеличению доли легирующей компоненты в распыляемом потоке, что приводит к увеличению плотности зерен-прекурсоров, состоящих из оксида легирующей компоненты, более активной к кислороду, и, соответственно, уменьшению размеров зерен оксида основной металлической компоненты, растущих на прекурсорах. Нитриды и оксинитриды в растущей пленке не наблюдаются из-за высокой активности кислорода, в результате которой катод работает в режиме реактивного окисления при любом содержании азота в реакционной смеси в рамках данных экспериментов.

Литература:

- [1] A. Steele, I. Bayer, E. Loth, Inherently Superoleophobic Nanocomposite Coatings by Spray Atomization – NanoLetters, 2009, 9 (1), pp 501–505
- [2] D. Bernt, V. Ponomarenko, A. Pisarev, Oleophobic optical coating deposited by magnetron PVD - J. Phys.: Conf. Ser., 2016, 748
- [3] I. Bae, S. Baik, Abnormal Grain Growth of Alumina, J. Am. Ceram. Soc., 1997, 80, p 1149
- [4] K. Strijckmans, D. Depla, A time-dependent model for reactive sputter deposition, J. Phys.: Appl. Phys., 2014, 47 (23), 235302
- [5] В. Пинаев, В. Шаповалов, Оптическая эмиссионная спектроскопия плазмы при реактивном магнетронном распылении, Вакуумная техника и технология, 2006, 16, 143-151

С.В. САВУШКИНА, М.Н. ПОЛЯНСКИЙ, Е.А. ВЫСОТИНА
ГНЦ - ФГУП «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша», Москва, Россия
«Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Россия

ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ГРАДИЕНТНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ГАФНИЯ

Оксид гафния является привлекательным керамическим компонентом теплозащитного покрытия благодаря его сходству с диоксидом циркония и его повышенным температурам фазовых переходов. Оксид гафния обладает более низкой теплопроводностью, чем стабилизированный оксидом иттрия диоксид циркония, и более длительной выдержкой при термоциклических испытаниях при температуре до 2600°C [1]. Наилучшими теплоизоляционными свойствами обладают покрытия из оксида гафния, получаемые плазменным напылением [2]. Однако, недостатком использования оксида гафния по сравнению с диоксидом циркония, остается меньший коэффициент теплового расширения (КТР).

Решением проблемы применения оксида гафния в качестве верхних слоев теплозащитного покрытия может быть создание градиентной структуры с постепенно изменяющимся КТР. Покрытия с плавным градиентом химического состава позволяют эффективно демпфировать температурные сжатия и расширения покрытия при термоциклических нагрузках.

Формировать градиентную структуру покрытия при плазменном напылении возможно постепенным изменением состава подаваемого порошка из дозатора в плазматрон. При напылении сверхзвуковыми скоростями возможно также образование дополнительных переходных слоев смещения [3].

В данной работе проводили формирование и исследования покрытий толщиной до 120 мкм, содержащих слои NiCoCrAlY , $\text{ZrO}_2\text{-7\%Y}_2\text{O}_3$ и $\text{HfO}_2\text{-9\%Y}_2\text{O}_3$. Плазменное напыление проводили при давлении в камере 100 Па при помощи сверхзвукового сопла плазматрона, создающего веер волн разрежения Прандтля-Майера [4]. Сопло способствует конденсации наночастиц из паровой фазы напыляемого материала в результате постепенного охлаждения паровой фазы напыляемого вещества в окрестностях сечений излома сопла на 6 и 27 градусов.

Покрытия получали последовательным напылением слоев при замене порошка в дозаторе и в одном цикле напыления при постепенной смене порошка в дозаторе.

Полученные покрытия исследовали с помощью растровой электронной

микроскопии, рентгеновского микроанализа, рентгеновской дифракции, термического анализа и при тепловых испытаниях с помощью плазмотрона при температуре на поверхности ~ 2200 К на расстоянии образца до среза сопла плазмотрона ~ 16 мм.

Исследования поперечной структуры покрытий показало наличие переходных слоев смешенного состава между слоями $ZrO_2-7\%Y_2O_3$ и $HfO_2-9\%Y_2O_3$ толщиной ~ 7 мкм (рис 1.). При напылении в едином цикле толщина переходных слоев возросла примерно в 2 раза.

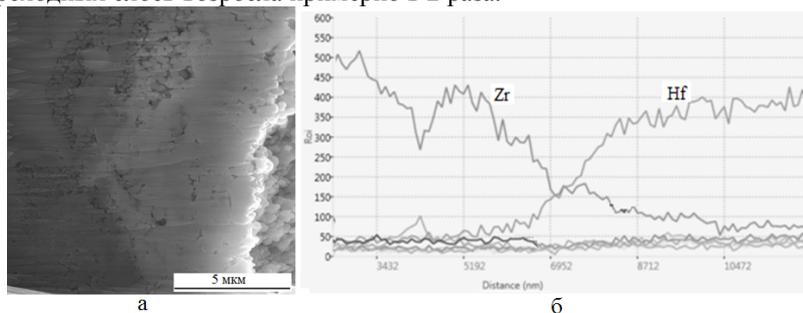


Рис. 1. Структура пограничной области между слоями $ZrO_2-7\%Y_2O_3$ и $HfO_2-9\%Y_2O_3$ (а) и распределение Zr и Hf вдоль линии (б).

Исследование структуры верхнего слоя $HfO_2-9\%Y_2O_3$ показало наличие деформированных частиц размером до 20 мкм, более мелких фрагментов частиц, глобул субмикронного размера и наноструктурных областей.

В результате 13 термоциклических испытаний по 30 секунд в огне плазмотрона произошло увеличение шероховатости поверхности покрытия, образования трещин не произошло.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-10309).

Литература

1. Zhu D., Robert A. //Surface and Coatings Technology. 1998.V. 108–109. pp. 114–120.
2. Zhu D., Bansal N. P., Miller R. A. /105th Annual Meeting and Exposition of the American Ceramic Society, Nashville, Tennessee, April 27–30. 2003. pp. 1-9.
3. А.М. Борисов, В.Г. Востриков, Е.А. Романовский, Н.В. Ткаченко, М.Н. Полянский, С.В. Савушкина / Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 2.
4. Полянский М. Н., Савушкина С. В. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2014, № 2, с. 53–57

V.KH. ALIMOV^{1,2,3}, O.V. OGORODNIKOVA², A.V. SPITSYN⁴,
N.P. BOBYR⁴, Y. HATANO³, J. ROTH⁵, K. SUGIYAMA⁵, M. BALDWIN⁶, R.
DOERNER⁶, M.H.J. T HOEN⁷, H.T. LEE⁸, Y. UEDA⁸, T. HAYASHI⁹

¹*A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry*

²*National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia*
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³*Hydrogen Isotope Research Center, University of Toyama, Toyama, Japan*

⁴*National Research Center 'Kurchatov Institute', Moscow, Russia*

⁵*Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP), Garching, Germany*

⁶*Center for Energy Research, University of California San Diego (UCSD), USA*

⁷*FOM-DIFFER, Nieuwegein, The Netherlands*

⁸*Graduate School of Engineering, Osaka University, Osaka, Japan*

⁹*National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST),
Rokkasho, Japan*

HYDROGEN ISOTOPE RETENTION IN REDUCED-ACTIVATION FERRITIC/MARTENSITIC STEELS

Reduced Activation Ferritic/Martensitic (RAFM) steels such as Eurofer (EU), F82H (Japan), Rusfer EK-181 (Russia) are candidate materials for first wall and breeding blanket structural application in future fusion power plants. These steels have been developed in order to simplify special waste storage of highly radioactive structures of fusion reactor after service. With this objective some alloying elements such as Mo, Nb and Ni present in the commercial martensitic steels have been replaced by other elements such as Ta, W and V which exhibit faster decay of induced radioactivity.

As probable blanket structural materials, the RAFM steels will be exposed to gaseous tritium bred in a blanket under neutron irradiation. A part of tritium implanted into an armor material from plasma will permeate to the RAFM steels. Besides, the use of bare RAFM steel as first-wall material in a fusion reactor, at least in selected areas of the main chamber, has been proposed recently [1]. Therefore, study of hydrogen isotope retention in undamaged and damaged RAFM steels (i.e., in the steels as-received and in the steels with ion-induced displacement damages simulating neutron-induced defects) is an important issue for assessment of tritium retention in structural elements of fusion reactors.

1. Deuterium Retention in Undamaged RAFM steels

The specimens of Eurofer and F82H steels were exposed to 20-3000 eV D plasmas at various temperatures to fluences in the range from 3.8×10^{23} to 8×10^{26} D/m². The following plasma facilities were used: PISCES-A (UCSD, USA) [2], LPG (QST, Japan) [3], PlaQ (IPP Germany) [4], PILOT-PSI (FOM-DIFFER, The

Netherlands) [5], HiFIT (Osaka Univ., Japan) [6]. The deuterium depth profiles in the steel specimens were determined by energy-scanning nuclear reaction analysis [7].

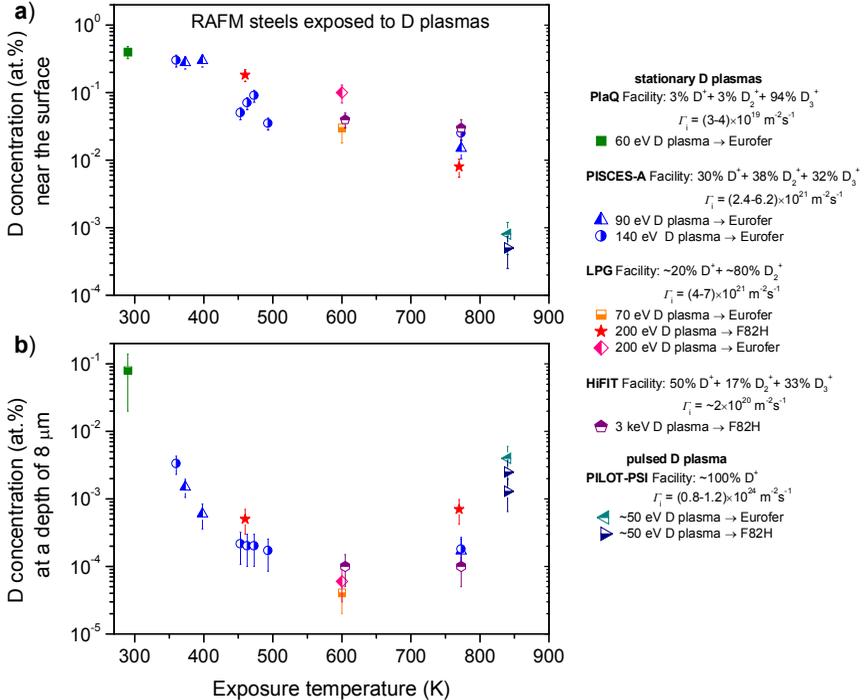


Figure 1. Deuterium concentration near the surface (a) and at a depth of about 8 μm (b) in RAFM steels exposed to D plasmas at various temperatures. For each D plasma exposure, the D ion energy, plasma composition, and D ion flux, Γ_i , are indicated in the legend.

It has been shown that in undamaged RAFM steels exposed to D plasmas with ion energies in the range from several tens of eV to several keV, the D depth profiles are characterized by a sharp near-surface concentration maximum and by practically constant bulk concentration at depths deeper than 1-2 μm . Note that values of the near-surface and bulk concentrations are strongly depended on the D plasma exposure temperature (Fig. 1).

It should be noted that that exposure of multicomponent RAFM steels to deuterium plasmas with ion energies above 40 eV to high fluencies (above 10^{24} D/m^2) leads to the formation of nano-structured near-surface layers enriched with

W. The formation of surface roughness results in a decrease of the D retention near the surface due to increasing the desorption flux and can reduce the total D retention.

2. Deuterium Retention in Damaged RAFM steels

The F82H and Eurofer specimens were irradiated at 300 K with 20 MeV W ions to the damage level of 0.54 displacements per atom (dpa) at the damage peak situated at a depth of 1.8 μm . In addition, the F82H specimens were irradiated at 523 K with 6.4 MeV Fe ions to various damage levels in the range from 0.02 to 12.5 dpa at the damage peak situated at 1.5 μm . The damaged specimens were exposed to D_2 gas at a pressure of 100 kPa and temperatures of 473 and 573 K for 5 h. At 373 K the exposure time period was 210 h.

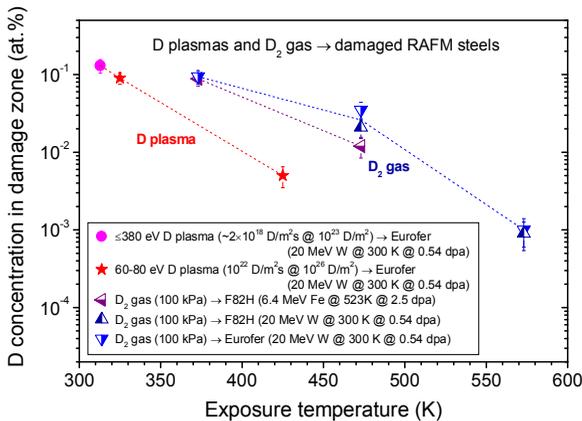


Figure 2. Maximum concentration of deuterium retained in the damage zone of F82H and Eurofer specimens beforehand irradiated with MeV-range heavy ions and then (i) exposed to D plasmas and (ii) exposed to D_2 gas at a pressure of 100 kPa, as a function of the exposure temperature. Conditions of D plasma exposures (ion energies, D fluxes and D fluences) and conditions of irradiation with heavy ions for damaging RAFM specimens (types and energies of heavy ions, irradiation temperature, and damage levels at the damage peak) are indicated in the legend.

Generation of heavy-ion-induced displacement damages in the RAFM specimens and subsequent exposure to D_2 gas at temperatures in the range from 373 to 573 K lead to trapping of deuterium over the whole damage zone to a concentration depending on the specimen temperature during D plasma or D_2 gas exposure (Fig. 2).

3. Tritium Retention in RAFM Steels [8]

The specimens of Rusfer EK-181 steel were subjected to (i) irradiation with 20 MeV W ions to the damage level of 0.54 dpa, (ii) exposure to high flux D plasmas at 400 and 600 K to a fluence of 10^{25} D/m² (LENTA facility), and (iii) pulsed photonic heat loads - 0.5 MJ/m², 0.5 ms, 10 cycles (QSPA-T facility). The specimens of F82H and Eurofer steels were also irradiated with 20 MeV W ions to the same damage level. After that the specimens thus prepared were exposed to D₂-(0.4%)T₂ gas mixture at total pressure of 2 kPa and temperature of 473 K for 5 h. The effects of displacement damage, plasma exposure and heat load on tritium retention and subsequent release during keeping at room temperature in air was examined using imaging plate (IP) [9] and β -ray induced X-ray spectrometry (BIXS) [10].

Despite enormous change in the surface morphology, T retention in the heat-loaded specimen is comparable with that in the unloaded specimen. The exposure to the plasma results in significant increase in T retention at the surface and/or in the subsurface layer. However, T trapped at the surface and/or in the subsurface layer is easily removed by keeping the specimens in air at around 300 K. Formation of radiation-induced defects leads to drastic increase in T retention, and T trapped at the defects is not removed at around 300 K. These observations suggests that displacement damages has the largest effects on T retention around 473 K.

References

- [1] B.J. Braams, K. Lim, IAEA Nuclear Data Section, Plasma-Material Interaction with Steel Surfaces. Report of a Consultancy Meeting, Vienna, August 2014, <https://www-nds.iaea.org/publications/indc/indc-nds-0671.pdf>.
- [2] E.M. Hollmann, A.Yu. Pigarov, Phys. Plasmas 9 (10) (2002) 4330.
- [3] G.-N. Luo, W.M. Shu, H. Nakamura, et al., Rev. Sci. Instrum. 75 (2004) 4374.
- [4] A. Manhard, T. Schwarz-Selinger, W. Jacob, Plasma Sources Sci. Technol. 20 (2011) 015010.
- [5] G.J. van Rooij, V.P. Veremiyenko, W.J. Goedheer, et al., Appl. Phys. Lett. 90 (2007) 121501.
- [6] T. Shimada, Y. Ueda, A. Sagara, M. Nishikawa, Rev. Sci. Instrum. 73 (2002) 1741.
- [7] V.Kh. Alimov, M. Mayer, J. Roth, Nucl. Instr. Meth. B 234 (2005) 169.
- [8] Y. Hatano, V.Kh. Alimov, A.V. Spitsyn, et al., Fusion Sci. Technol. 67 (2015) 361.
- [9] H. Saitoh, T. Hishi, T. Misawa, et al., J. Nucl. Mater. 258-263 (1998) 1404.
- [10] M. Matsuyama, T. Murai, K. Toshida, et al., J. Nucl. Mater. 307-311 (2007) 729.

Н.Н. ЧЕРЕНДА¹, В.В. УГЛОВ¹, Г.М. ДЗАГНИДЗЕ¹,
В.М. АСТАШИНСКИЙ², А.М. КУЗЬМИЦКИЙ

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь
²Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,
Минск, Беларусь

МНОГОЭЛЕМЕНТНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

Концентрированные потоки частиц могут быть эффективно использованы для легирования поверхностного слоя материалов элементами, обеспечивающими повышение его эксплуатационных свойств. Легирование осуществляется путем нанесения пленки или покрытия легирующего элемента на поверхность материала и последующего их перемешивания при воздействии ионными, электронными, лазерными или плазменными потоками [1]. При использовании режимов воздействия, приводящих к плавлению, основным механизмом формирования легированного слоя является конвективный массоперенос в жидкости. Однородность перемешивания компонентов покрытия и подложки будет увеличиваться с ростом длительности существования расплава. Особый интерес в этом отношении представляют компрессионные плазменные потоки (КПП), генерируемые квазистационарными плазменными ускорителями, с относительно большой длительностью импульса ~ 100 мкс [2]. Целью данной работы являлось исследование структурно-фазового состояния, прочностных свойств поверхностного слоя стали 3, одновременно легированного атомами молибдена и хрома под действием компрессионных плазменных потоков.

Объектом исследований являлась сталь 3 (концентрация легирующих элементов в вес. %: 0,2 С, 0,2 Si, 0,5 Mn) с ферритно-перлитной структурой. Перед обработкой КПП на поверхность образцов первой группы наносилось покрытие Mo-Cr методом вакуумно-дугового осаждения при одновременной работе катодов молибдена и хрома (напряжение смещения - 120 В, время нанесения 5 мин). Концентрация хрома в покрытии составляла 15 ат.%, толщина покрытия ~ 2 мкм. Обработку образцов с покрытием осуществляли 1-5 импульсами с плотностью энергии, поглощенной поверхностью 13 Дж/см² за импульс. Эксперименты проводили в режиме “остаточного газа”, при котором предварительно откачанную вакуумную камеру МПК заполняли рабочим газом – азотом до давления 400 Па.

Структурно-фазовое состояние поверхностного слоя исследовалось

методом рентгеноструктурного анализа с помощью дифрактометра Rigaku Ultima IV в излучении $\text{CuK}\alpha$ в фокусировке параллельных пучков. Микроструктура поперечных шлифов образцов изучалась с использованием растрового электронного микроскопа LEO1455VP. Элементный состав поверхностного слоя исследовался с помощью энергодисперсионного микроанализатора Oxford Instruments, сопряженного с растровым электронным микроскопом. Относительная погрешность определения концентрации элементов не превышала 10 %. Измерения микротвердости по Виккерсу проводили на микротвердомере ПМТЗ при нагрузке 0,98 Н, время выдержки под нагрузкой 10 с.

Анализ поперечного сечения образцов, проведенный с помощью растровой электронной микроскопии, показал, что воздействие КПП на систему (Mo,Cr)/сталь 3 приводит к формированию поверхностного слоя стали, легированного атомами молибдена и хрома. Толщина легированного слоя после 5 импульсов воздействия составляет ~ 10 мкм. Распределение легирующих элементов в этом слое является относительно однородным. С увеличением количества импульсов происходит уменьшение концентрации Mo и Cr в легированном слое (рис. 1).

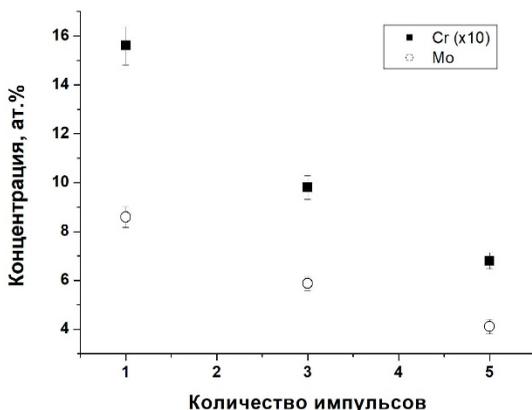


Рис. 1. Зависимость концентрации легирующих элементов в поверхностном слое стали от количества импульсов воздействия КПП.

Этот эффект преимущественно связан с эрозией поверхности при плазменном воздействии, основным механизмом которого является гидродинамическое течение расплава под действием давления растекающегося вдоль поверхности плазменного потока [3]. Следует

отметить, что соотношение концентраций Мо и Сг в легированном слое (в пределах погрешности) соответствует соотношению концентраций в покрытии. Таким образом, варьирование токов дуг при нанесении покрытия, определяющих в нем концентрацию элементов, а также режимов плазменного воздействия позволяет добиться необходимой концентрации элементов в легированном слое.

Результаты фазового анализа образцов до и после воздействия представлены на рис. 2. Как видно, после воздействия легированный слой содержит твердые растворы на основе α -Fe и γ -Fe.

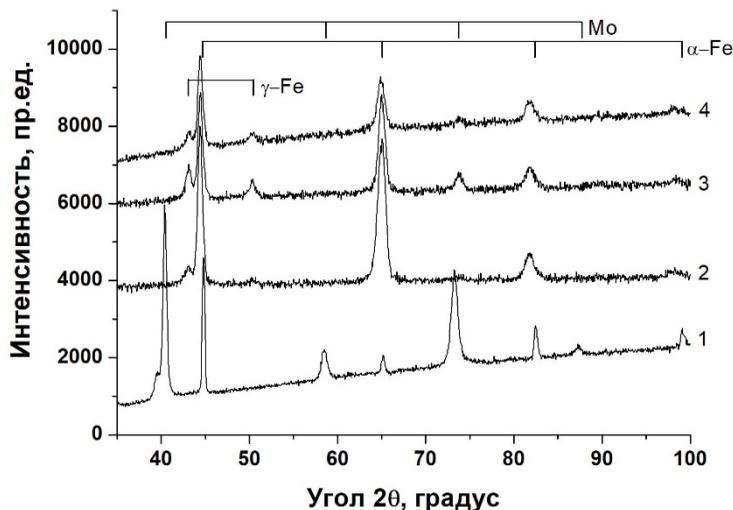


Рис. 2. Дифрактограммы исходного образца системы (Mo,Cr)/Сталь 3 (1) и образцов, обработанных КПП с различным количеством импульсов: 1 (2), 3 (3), 5 (4).

Дифракционные линии α -Fe сдвинуты в область меньших углов, что может свидетельствовать о формировании твердого раствора замещения α -Fe(Mo,Cr). Согласно равновесным бинарным диаграммам состояния Fe-Cr и Fe-Mo можно ожидать, что все атомы Cr (во всем полученном диапазоне концентраций) могут войти в твердый раствор на основе α -Fe, в то время как атомы молибдена могут входить как в состав твердого раствора α -фазы, так и формировать интерметаллид Fe_2Mo , дифракционные линии которого обнаружены не были. Однако, как видно из рис. 2, параметр решетки α -Fe не зависит от количества импульсов воздействия, т.е. уже при 5 импульсах,

вероятно, достигается предельная концентрация атомов Мо в твердом растворе. Тогда, в легированном слое могут присутствовать дисперсные выделения Fe_2Mo , не разрешаемые дифракционным анализом. Существование γ -Fe, как было показано ранее, обусловлено диффузией азота из остаточной атмосферы вакуумной камеры в поверхностный слой и формированием азотистого аустенита в поверхностном слое.

Структурно-фазовые изменения в поверхностном слое обуславливают модификацию свойств поверхности, в частности, прочностных (рис. 3). Увеличение количества импульсов ведет к росту микротвердости. После 5 импульсов воздействия микротвердость поверхностного слоя в 3.5 раза превышает микротвердость исходной стали.

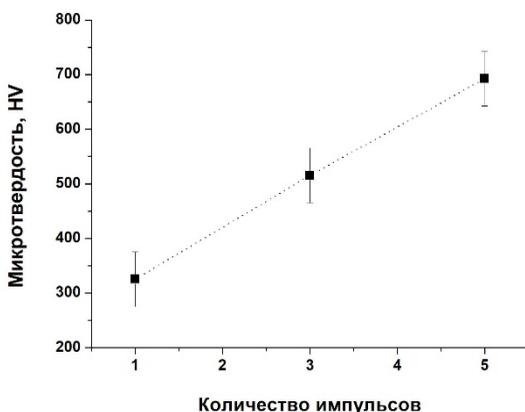


Рис.3. Зависимость микротвердости поверхностного слоя стали от количества импульсов воздействия КПП.

Список литературы.

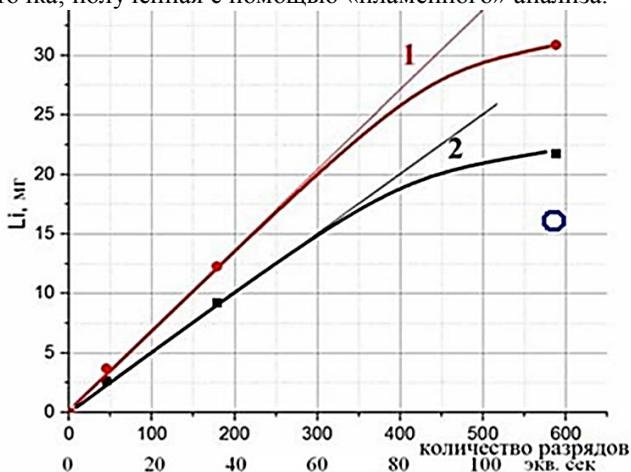
- [1] В.А. Kalin, V.L. Yakushin, V.I. Vasiliev, S.S. Tserevitinov. Surface and Coatings Technology, vol. 96, 1997, 110-116.
- [2] В.В. Углов, Н.Н. Черенда, В.М. Анищик, В.М. Асташинский, Н.Т. Квасов, Модификация материалов компрессионными плазменными потоками, Минск: БГУ, 2013, 248 с.
- [3] V.I. Tereshin, I.E. Garkusha, A.N. Bandura, et.al. J. Nucl. Mater., vol. 313–316, 2003, 685–689.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АБСОЛЮТНОГО КОЛИЧЕСТВА ЛИТИЯ В ЛИТИЙСОДЕРЖАЩИХ ПЛЕНКАХ НА ПОВЕРХНОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МИШЕНЕЙ (ОБРАЗЦОВ-СВИДЕТЕЛЕЙ) В КАМЕРЕ ТОКАМАКОВ

Задача измерения абсолютного количества лития в литийсодержащих пленках возникла в процессе решения задачи о транспорте ионизованного лития (растекания вдоль магнитного поля и поперечной диффузии) в пограничном слое лимитер-стенка (SOL – scrape-off layer) в ходе рабочего режима токамака. Было замечено, что различные металлические мишени, погруженные в этот слой, постепенно покрываются пленками лития, либо его соединений, что очевидно указывало на существование продольных (вдоль магнитного поля токамака) литиевых потоков в тени лимитера. Масштаб этих потоков можно было бы оценить, измерив вес нанесенного лития и разделив его на время эксперимента. При знании коэффициента аккомодации лития на мишени, полученная таким образом усредненная величина могла бы дать уже количественную оценку продольных потоков, усредненных за разряд. Однако прямые методы по взвешиванию экспонированной литиевой мишени (например, путем измерения ухода частоты кварцевого резонатора) крайне сложны в условиях высокого вакуума токамака. Задача упростилась бы в случае вывода мишени на анализ из камеры в атмосферу. Однако при этом возникает серьезное осложнение – сильное сродство лития по отношению к основным компонентам воздуха, приводящее к тому, что в процессе извлечения образцов из разрядной камеры токамака на их поверхности образуется смесь нитрида и оксида лития в соотношении $Li_3N : Li_2O = 3$ [1], что, в свою очередь, способно неопределенным образом изменить «кажущуюся» массу извлеченного лития. Это препятствие было преодолено путем применения следующего физико-химического приема [2]. С целью определения количества лития, нанесенного в процессе плазменной экспозиции, образцы-свидетели после извлечения на воздух в ходе удаления из разрядной камеры Т-11М, сначала на 1 час помещались в кипящую дистиллированную воду. Сам элементарный литий и все его основные химические соединения, образование которых потенциально возможно при экспонировании образцов-свидетелей в плазме и затем при их контакте с воздухом, вступают

с водой в различные химические реакции, конечным продуктом в которых оказывается щелочь LiOH. Полученное количество LiOH в водном растворе, пропорциональное исходному абсолютному содержанию лития в образце, определялось затем тремя методами. Хронологически первым в данном исследовании стал метод кислотно-основного титрования [2]. Далее он был дополнен более простым и оперативным методом определения количества LiOH по электропроводности раствора (электролитическим методом). Наконец третьим методом стало определение содержания лития в растворе с помощью пламенного фотометра [3]. Все три метода имеют свои особенности и позволяют получить в итоге некоторую дополнительную информацию о состоянии лития на стенках токамаков.

Один из результатов одновременного применения трех методов анализа представлен на рис. 1, где приведены значения сбора лития на токамаке T-11M зондом-свидетелем – мишенью из нержавеющей стали – для серии в 600 рабочих импульсов (150 эквивалентных секунд), полученные двумя методами: титриметрическим (1) и электролитическим (2), а также контрольная точка, полученная с помощью «пламенного» анализа.



1 – титрование раствора, 2 – электролитический способ, синий кружок (○) – результат «пламенного» анализа

Рис. 1. Результат сбора лития за 600 импульсов – 150 эквивалентных секунд.

Различия трех методов, очевидно, указывают на присутствие в растворе «посторонних» катионов, природа которых до конца неизвестна. Различие результатов, полученных электролитическим и «пламенным» методами,

составляет не более 20%, что, с одной стороны, позволяет с учетом этой коррекции использовать электролитический метод как оперативный метод определения абсолютного содержания лития, учитывая его относительную простоту проведения в лабораторных условиях, с другой стороны, ставит вопрос о причине такого расхождения.

Визуальное указание на возможную причину различия между титриметрическим и электролитическим методами в определении лития давал желтоватый оттенок исследуемого раствора, наблюдавшийся иногда после кипячения экспонированной мишени в дистиллированной воде, который можно объяснить присутствием в растворе взвеси соединений окисленного железа. Действительно, материалом обмываемых зондов-свидетелей и первой стенки токамака являлась SS – нержавеющая сталь с преимущественным содержанием железа. Она потенциально способна частично корродировать в ходе смыва горячим дистиллятом. Возникающая при этом ржавчина – смесь оксида железа (III) ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) с оксигидроксидом железа (III) ($\text{FeO}(\text{OH})$) – способна образовывать видимую желтоватую взвесь. Ржавчина в воде почти не диссоциирует (у обеих её составляющих крайне низкие произведения растворимости ($\text{PP}(\text{Fe}(\text{OH})_3) = 6.3 \cdot 10^{-38}$ и $\text{PP}(\text{FeO}(\text{OH})) = 2.2 \cdot 10^{-42}$ [4]). Таким образом, её влияние на электропроводность пренебрежимо мало, по сравнению с LiOH. Но при этом, будучи амфотерным (окс)гидроксидом, она активно реагирует с HCl при титровании (подобно LiOH участвуя в реакциях нейтрализации с образованием FeCl_3). При этом, на 1 моль (окс)гидроксида железа (III) уходит втрое больше соляной кислоты, чем на 1 моль LiOH. Соответствующий этому повышенный расход HCl мог внешне восприниматься как повышенное содержание Li в исследуемом растворе. Тем не менее, полностью отказаться от титриметрического и электролитического методов анализа полученных растворов лития в пользу исключительно «пламенного» вряд ли разумно. Наблюдаемое различие может служить индикатором присутствия в литиевых пленках примеси тяжелых металлов (в первую очередь, железа) – результатов эрозии первой стенки в ходе работы токамака.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Соглашение о предоставлении субсидии № 14.599.21.0001 от 29 августа 2017г.

Список литературы:

- [5]. Н.С. Полуэктов и др. Аналитическая химия лития. М.: Наука, 1975. 204 с.
- [6]. Azizov E.A. et al. "Experiments at the T-11M device in substantiation of the tokamak with Lithium loop cycle" 36 EPS Conf. on Plasma Physics and Controlled Fusion. Sofia. 2009. P5.192.
- [7]. Н.С. Полуэктов. Методы анализа по фотометрии пламени. М.: Госхимиздат, 1959. 231с.
- [8]. С.Т. Жуков. Константы гидратации (произведения растворимости). Общедоступный электронный портал Химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова:
<http://www.chem.msu.su/rus/school/zhukov/20a.html>

М.А ЛАРЧЕНКО^{1,2}, И.М. ПОЗНЯК^{1,2}

¹Московский физико-технический институт (государственный университет

²ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДУКТОВ ЭРОЗИИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ВОЛЬФРАМА ИНТЕНСИВНЫМИ ПОТОКАМИ ПЛАЗМЫ

Во время переходных плазменных процессов в ИТЭР (ELM-ы, срывы, вертикальные перемещения плазменного шнура) ожидается воздействие интенсивных потоков плазмы на защитные покрытия вакуумной камеры. При длительности воздействия $t = 1 - 3$ мс тепловые нагрузки на вольфрамовые (дивертор) и бериллиевые (первая стенка) облицовочные пластины будут доходить до $Q = 80$ МДж/м² [1], что соответствует фактору теплового воздействия $F = Q/t^{0.5}$ $F = 2500$ МДж/м²с^{0.5} и существенно превосходит пороги плавления материалов.

Эрозия за счет испарения защитных пластин и образования металлической пыли может повлечь поступление примесей в горячую термоядерную плазму и вызвать ее радиационное охлаждение. Кроме этого, будет происходить сокращение срока службы защитных покрытий и накопление пыли в вакуумной камере токамака [1]. Для создания и проверки расчетно-теоретических моделей [2,3], описывающих указанные процессы, нужны экспериментальные данные о поведении материалов под действием интенсивных плазменных потоков, а также – о свойствах образующихся продуктов эрозии. Получить такие данные являлось основной целью представленной работы.

Существующие токамаки не обладают достаточной мощностью, чтобы воспроизводить условия, ожидаемые во время переходных процессов в ИТЭР, поэтому для испытания материалов применяют плазменные ускорители, магнитные плазменные ловушки, лазеры, электронные и ионные пучки. В представленной работе эксперименты по облучению материалов плазмой были выполнены на исследовательской установке МК-200UG. Интенсивность плазменного потока, фактор теплового воздействия, энергия ионов, плотность и давление плазмы на МК-200UG близки к параметрам, ожидаемым во время срывов и ELM-ов в ИТЭР [4].

В рамках представленной работы мишени из вольфрама, стали и алюминия в виде плоских пластин с размерами 6 см на 12 см подвергали воздействию потока водородной плазмы длительностью 25 мкс, плотностью тепловой энергии до 10 МДж/м² ($F \leq 2000$ МДж/м²с^{0.5}) и энергией ионов $\approx 1,5$ кэВ. Взаимодействие плазмы с мишенями происходило в продольном

магнитном поле величиной 1,5 Тл.

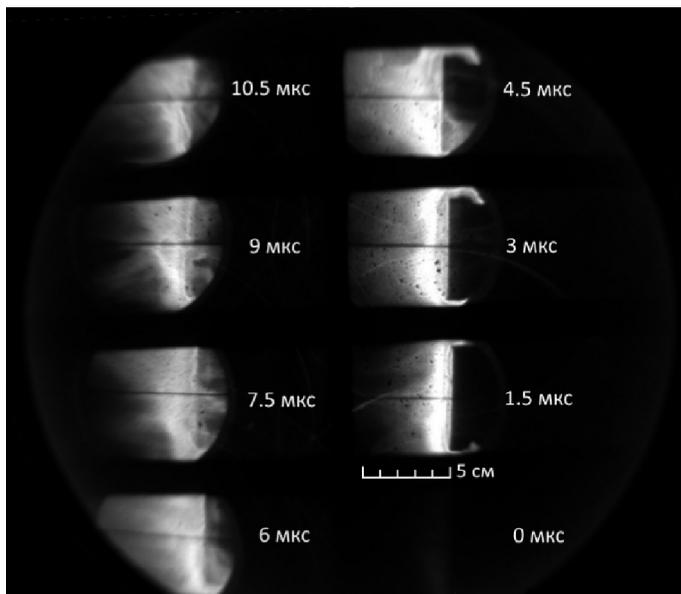


Рис 1. Динамика свечения приповерхностного плазменного слоя в мягком рентгеновском диапазоне.

Поток водородной плазмы падает на мишень из вольфрама слева.

Для исследования формирования и динамики ионизованных паров материалов применялась восьмикадровая камера-обскура, чувствительная к излучению в мягком рентгеновском диапазоне. Получены данные о времени формирования, скорости распространения и длительности существования мишенной плазмы. Показано, что ее распространение происходит преимущественно вдоль силовых линий магнитного поля. – рис. 1.



Рис. 2. Треки капель, инжестируемых с вольфрамовой мишени.
Поток водородной плазмы падает на мишень справа.

Капли, выбрасываемые с поверхности металлических мишеней, регистрировались при помощи фотокамеры. Типичный снимок, полученный в эксперименте с вольфрамовым образцом, представлен на рис. 2. Получены данные о направлении и интенсивности выброса капель с вольфрамовой, стальной и алюминиевой мишеней. Проведена оценка скорости их движения.

Литература

1. *Pitts R.A., Carpentier S., Escourbiac F. et al.* A full tungsten divertor for ITER: Physics issues and design status. // J. Nucl. Mat., 2013, V.438, P. S48-S56.
2. *Bazylev B.N., Janeschitz G., Landman I.S. et al.* Melt damage simulation of W-macrobrush and divertor gaps after multiple transient events in ITER // J. Nucl. Mat., 2007 V. 363, P.1011-1015.
3. *Pestchanyi S., Arkhipov N., Landman I. et al.* Simulation of tungsten plasma transport along magnetic field after ELM-like heat loads. // J. Nucl. Mat., 2013 V.438, P. S459-S462.
4. *Позняк И.М., Архипов Н.И., Карелов С.В. и др.* Свойства примесей вольфрама, образующихся в плазме при облучении вольфрамовых мишеней мощными плазменными потоками. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2014, Т.37, №1, С.70-79

I. BORODKINA^{1,2}, D. DOUAI³, D. BORODIN² and JET CONTRIBUTORS*

¹*Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Energie- und Klimaforschung – Plasmaphysik, Partner of the Trilateral Euregio Cluster (TEC), 52425 Jülich, Germany*

²*National Research Nuclear University MEPhI, 31, Kashirskoe sh., 115409, Moscow, Russia*

³*CEA, IRFM, F-13108 Saint Paul Lez Durance, France*

* *See the author list of X. Litaudon et al., Nucl. Fusion 57 (2017) 102001*

PLASMA-WALL INTERACTION STUDIES AT JET-ILW IN A VIEW OF UPCOMING D, H AND T EXPERIMENTAL CAMPAIGNS

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

In 2017 the coordinated on-site and off-site analysis and modelling activities in the frame of the fifteen researcher groups named as “analysis&modelling tasks” were performed: analysis of past experiments & assess of JET D-T campaign readiness, predictive modelling with physics based integrated (edge-core, wall-SOL) codes for JET and ITER, preparation of experimental proposals for C38-C42 D-H-T-H-D upcoming campaigns.

One of the tasks relevant to plasma-surface interaction (PSI) studies is the “T17-12: Isotope wall content control and long term erosion/migration interpretation”. The main goals of this task are to elaborate the strategy for reducing D wall inventory before T campaign (and T before D in C40) to stay within neutron activation limits, to monitor isotope ratio in the plasma at various locations and in the key wall components, to determine the T wall retention rate (important because of ITER safety limit) and to improve general erosion/migration/retention prediction capabilities including code development, validation as well as extension allowing for instance treatment of dust particles transport. The task activity was divided into five working groups:

- Isotope ratio estimations and evaluation of wall cleaning methods for reliable control of isotope wall content,
- Spectral modelling of spectroscopic measurements for W, Be as well as Be and N molecules and analysis/modelling of the formation and transport of ND, NH, NH₃ molecules in seeded experiments,
- Validation of PSI and SOL impurity transport models using JET data,

- Quantification of dust formation fraction of the total erosion and retention based on existing JET experiments and prediction of the tritium content for TT operation at JET and DT operation at JET and ITER,
- Validation of integrated plasma-wall interaction models against long-term exposure experiments from “C30C” campaign and other experiments.

In this paper the main results of this task and the accepted proposals for the PSI-relevant experiments in the upcoming JET campaigns are presented.

To develop reliable isotope ratio estimations in the vessel the H/(H+D) ratio data from analysis of residual gas (RGA) for C37 campaign (2016) are analysed. Isotope ratio obtained from RGA signals is shown to agree in general with divertor spectroscopy (see fig. 1). New fitting algorithm for Balmer- α line separation is presented. Test with partially used in RGA optical penning (OP) measurements (“KT5P” diagnostic) demonstrates good quality of the fitting H/[H+D] ratio, in particular for relatively low intensities (0.5% and below).

Available OP data in KT5P have been re-analyzed. Spectral profile comparison revealed that the instrument resolution was altered since JET DTE1 campaign leading to the large error bars for H/[H+D] < 1%. Corrective actions are suggested for the respective “KT5” diagnostic providing increased light collection to improve accuracy at H/[H+D] < 1% and improved resolution in order to correctly assess T/(H+D+T).

The isotope exchange efficiency of different wall cleaning (WC) methods is evaluated based on the analysis of the previous experiment data. Several proposals for the control of the isotope wall content have been made, which include wall baking at 320°C, glow discharge and ICRF conditioning (GDC, ICWC), raised strike point magnetic configuration allowing to access the deposits at divertor baffle. Combination of mentioned WC methods is also going to be tested during a dedicated “baking week”, a strategy of which for C39 has been proposed (see fig. 2).

To improve the interpretation of spectroscopic measurements the scripts for fitting ND, BeD, NH and BeH molecular bands are ready and tested for KSRA, KSRB, KSRC, KT3A and KT3B JET spectrometers. It is shown that spectra fitting is uneasy in the divertor region due to the weak signals and multiple blended lines. Using rovibronic-resolved electron collision data (R-Matrix method simulations) the synthetic spectra and the temperature information for BeH, BeD and BeT is calculated and benchmarked with the experiment. New software to subtract the bremsstrahlung background from the “KL11” 2D camera filtered images for WI line emission in the divertor is developed to improve W-erosion analysis. In the frame of ammonia production studies comparison of ammonia formation from RGA signals for different plasma configuration (“M15-29” versus

“H16-05” experiments) is presented. Background plasma parameters profiles for “M15-29” experiment are simulated by the fluid code SOLEDGE2D-EIRENE. It will allow N₂ and NH₃ transport modelling by the ERO code.

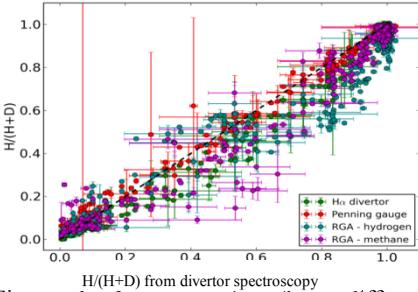


Figure 1. Isotope ratios from different diagnostics versus KS3B spectroscopy data [A. Drenik, PFMC 2017]

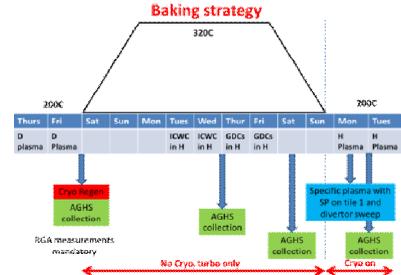


Figure 2. Cleaning strategy defined for C39 campaign

A new powerful tool (ERO2.0) for erosion and migration modelling is applied for simulation of Be erosion and transport for limiter plasmas taking into account 3D wall geometry and machine-sized simulation volumes. A good agreement between measured “KS3” line-of-sight (LOS) averaged effective yields and Be sputtering yields simulated by ERO2.0 is obtained assuming a certain Be background concentration in the modelling. Reproduction of KL1 2D images shows good agreement near contact point, however too low emission further upstream (see fig. 3). The first comparison with heat flux from IR images seems also to give positive outcome.

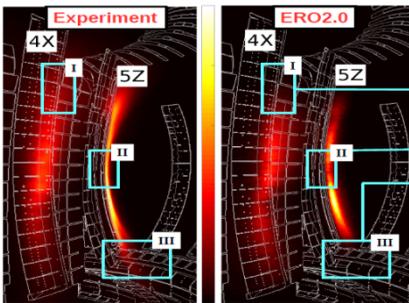


Figure 3. KL1 Be II 467nm line emission intensity from experiment and rendered by the ERO2.0 synthetic camera model from the simulated volumetric emission data

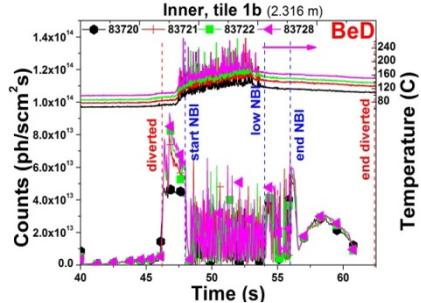


Figure 4. Analysis of BeD emission using “KS3” signals from the inner divertor for “C30C” plasmas

Using the dust trajectory code DUSTTRACK the trajectory and the evolution of the physics parameters of Be and composite dust particles with different size and initial conditions are simulated. It was found that hydrogen isotopes are mainly released within the SOL from dust particles launched from the main wall. Post-mortem analysis shows the large melting areas at the upper dump plates. Modelling of Be dust particles migration launched from the upper dump plates is performed and the possible areas of preferential dust accumulation and T inventory within the JET-ILW vessel are investigated.

The W sputtering source under intra-ELM and inter-ELM conditions in JET-ILW hydrogen plasma discharges with compound and Type-III ELMs is analyzed and benchmarked with WI spectroscopy. The impact of the Be ionization state and the Be concentration in the impinging ion flux on the W sputtering is estimated. The influence of the prompt deposition of eroded W is simulated by ERO code under intra-ELM and inter-ELM conditions. It is found that net erosion is about a factor of 30 lower than gross erosion at the strike point under intra-ELM due to deposition and about 5 under inter-ELM conditions and the net erosion rate is similar for intra- and inter-ELM conditions for relatively high inter-ELM temperature.

The JET adaptation of the 2D particle-in-cell (PIC) full kinetic massively parallel code for SOL modelling (BIT2) is ongoing aiming to reach the productive stage for full kinetic runs for the JET SOL.

Extensive analysis of the H-mode discharges during a two-week lasting JET ILW operation (“C30C”) [2] with quasi steady-state wall conditions is performed. First IR and TC data analysis for ILW tiles 0/1 (divertor baffle) for the “C30C” campaign is presented. Detailed analysis of Be and BeD optical emission in divertor co-deposits (see fig. 4) and outer strike point is presented and discussed. Transport in the sub-divertor including louvres, pump and the sub-divertor pressure gauge is implemented into the SOLPS-ITER code and the respective extended grid is generated. Simulated upstream ne/Te profiles are in good agreement with experiment. A diffusion trapping model is applied to study the dynamic outgassing from Be-covered tiles 0/1 in JET during type-I ELMy H-modes and to explain post-peak occurring up to 8ms after first peak in measured ion particle flux.

This task is extended to continue in 2018-19 with updated deliverables. Some deliverables of this task will move to the experiments. The task has helped to develop the PSI-relevant experiment proposals accepted now for the upcoming JET campaigns: wall cleaning, W source, H/D/T monitoring etc.

[1] G. Matthews et al. Phys. Scr. T145 (2011) 014001

[2] S. Brezinsek et al, Nucl. Fusion 53 (2013) 083023

М.Ю. ЖАРКОВ¹, А.В. ВЕРТКОВ¹, И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ^{1,2},
В.А. ВЕРШКОВ³, С.В. МИРНОВ⁴, В.А. ШУМСКИЙ²

¹АО «Красная звезда», Москва, РФ

²НИЯУ МИФИ, Москва, РФ

³НИЦ «Курчатовский институт», Москва, РФ

⁴АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Москва, РФ

УСТРОЙСТВА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПОВЕДЕНИЯ ЛИТИЕВЫХ ВНУТРИКАМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТОКАМАКОВ

В ряде экспериментальных исследований было убедительно показано, что использование лития в качестве материала обращенного к плазме токамака и стелларатора приводит с одной стороны к существенному улучшению параметров плазменного разряда, а с другой - к возможности создания ресурсоспособных внутрикамерных элементов [1-4]. Таким образом, могут быть решены как плазмозфизические, так и технологические проблемы разрабатываемого стационарного реактора термоядерного синтеза. Принимая во внимание высокую сорбционную активность лития по отношению к водороду и его изотопам, необходимо исключить неконтролируемое его накопление на стенках камеры реактора и, как следствие, ограничить накопление трития. Организация замкнутой циркуляции лития в камере с использованием литиевых эмиттеров и коллекторов [1, 5] на основе капиллярно-пористых систем позволяет в основном решить эту задачу, однако часть потока атомов лития может достигать стенки камеры и должна быть удалена. Для решения этой задачи на токамаке Т-11М была разработана методика [6] эффективного сбора лития с внутренних поверхностей камеры с помощью криогенной мишени в условиях тлеющего разряда в инертном газе (гелий, аргон) и водороде.

Конструкция диагностических мишеней для токамаков Т-10 и Т-11М описана в [7], на рисунках 1, 2 изображены изготовленные устройства. Проведённые эксперименты на токамаке Т-11М дали ясное представление о динамике и температурной зависимости осаждения лития и дейтерия в условиях реального токамака [8]. Результаты экспериментальной кампании на токамаке Т-10, где скорость сбора лития достигла 2.1 мг/ч при температуре собирающей поверхности 350°С убедительно подтвердили полученные выводы. На рисунке 3 показан вид мишени токамака Т-10 с захваченным литием.



Рис. 1. Устройство для сбора лития токамака T-11M. а – общий вид, б, в – различные виды приёмных поверхностей



Рис. 2 Устройство для сбора лития токамака T-10: а – в форме гладкого цилиндра, б – в форме диагностического зонда



Рис. 3. Вид литиевой мишени после эксперимента в токамаке T-10

Изучение взаимодействия материалов на основе лития с плазмой токамака нуждается в разработке методики инфракрасной (ИК) термометрии, которая позволит исследовать динамику этого процесса и определить уровень приходящих тепловых потоков. Критическим моментом разработки ИК диагностики является процесс калибровки. Известно, что достоверность измерения температуры с помощью инфракрасной камеры зависит от корректного учета излучательной способности исследуемой поверхности ϵ . Исходя из того, что литий является чрезвычайно активным металлом по отношению к остаточным газам в камере токамака, следует ожидать образования с течением времени различной толщины поверхностных пленок продуктов реакции лития с этими газами, что повлечёт за собой изменение излучательной способности. В этой связи отработка методики ИК диагностики литиевых внутрикамерных элементов (лимитеров) в условиях реального токамака, когда возможно моделировать в полной мере влияние атмосферы остаточных газов и воздействия плазмы на излучательную способность поверхности, имеет важнейшее значение.

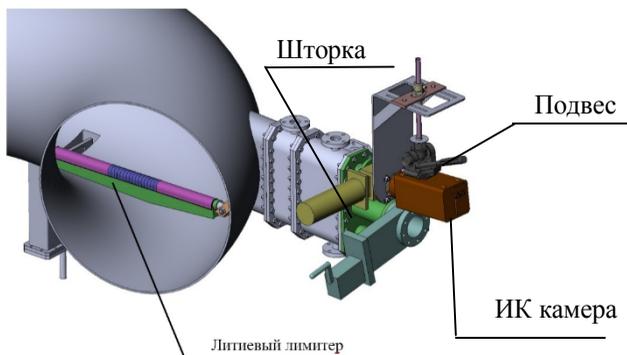


Рис. 4. Схема расположения ИК диагностики

Диагностика для токамака Т-11М реализуется с помощью устройства (рис. 4) на основе ИК камеры со спектральным диапазоном 7-14 мкм, установленной на фланце диагностического порта и наблюдающей поверхность литиевого лимитера через окно из фторида бария.

Работы выполнены при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение о предоставлении субсидии № 14.599.21.0001 от 29 августа 2017 г.

Список литературы:

- [1] I.E. Lyublinski, M. S. V. Mirnov et al., Development of lithium CPS based limiters for the realization of a concept of a closed lithium circulation loop in a tokamak, *Physics Procedia*, 12/2015, 71:47-51.
- [2] G. Mazzitelli et. al., Review of FTU results with the liquid lithium limiter, (2010) *Fusion Engineering and Design*, 85 (6), pp. 896-901.
- [3] A. Vertkov, I. Luyblinski, G. Mazzitelli, et al., *Fus. Eng. Des.* 82 (2007) 1627-1633.
- [4] F. L. Tabarés, [D. Tafalla](#), [E. Ovarzabal](#), et al., IAEA –CPS-19/CD, EX/P5-36, IAEA, 2012
- [5] S.V. Mirnov, A. M. Belov, N.T. Djigailo et al., Recent lithium experiments in tokamak T-11-M, *J. Nucl. Mater.* 07/2013, 438: s 224-228.
- [6] Вертков А.В., Жарков М.Ю., Люблинский И.Е. и др., Криогенная мишень для сбора лития в вакуумной камере токамака Т-11М // Сборник научных трудов XVI конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью». Москва, НИЯУ «МИФИ», 1-2 февраля 2013 г., с. 31-34.
- [7] М.Ю. Жарков, А.В. Вертков, И.Е. Люблинский и др. Устройства для сбора лития в вакуумной камере токамаков Т-11М и Т-10 // Материалы XX конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью». Москва, НИЯУ МИФИ, 26-27 января 2017 г., с. 46-49.
- [8] А.Н. Щербак, С.В. Мирнов, Я.А. Васина и др. Исследование зависимости сбора лития и водорода коллекторной мишенью от температуры поверхности мишени в системе эмиттер-коллектор на токамаке Т-11М // Материалы XX конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью». Москва, НИЯУ МИФИ, 26-27 января 2017 г., с. 52-55.

В.А. АНИКИН¹, А.М. БОРИСОВ¹, А.В. МАКУНИН², Е.С. МАШКОВА²,
М.А.ОВЧИННИКОВ^{1,2}

¹Московский авиационный институт

(Национальный исследовательский университет)

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

ИОННО-ИНДУЦИРОВАННОЕ ГОФРИРОВАНИЕ И ЭРОЗИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИАКРИЛОНИТРИЛЬНОГО УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА

Высокодозное ионное облучение композиционных материалов с армирующими их углеродными волокнами может приводить как к структурным изменениям, так и к значительным изменениям морфологии оболочки волокна [1,2]. В зависимости от температуры облучаемой мишени T и уровня радиационных нарушений, определяемого числом смещений на атом (СНА, dpa), могут происходить процессы аморфизации, рекристаллизации, а также развития специфической морфологии поверхности в виде гофрирования волокна [1]. Аморфизация наблюдается при $T < T_a$ динамического отжига радиационных нарушений. При $T > T_a$ рекристаллизация поверхности волокна может сопровождаться образованием субмикронных призматических элементов. В данной работе методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) и лазерной гониофотометрии (ЛГФ) исследовали гофрирование оболочки углеродного ПАН-волокна ВМН-4 композита КУП-ВМ при высокодозном ($\geq 10^{18}$ ион/см²) облучении ионами Ar^+ энергии 30 кэВ и температуре мишени от 200 до 600°C. На рис.1 представлены типичные РЭМ-изображения гофрированных структур.

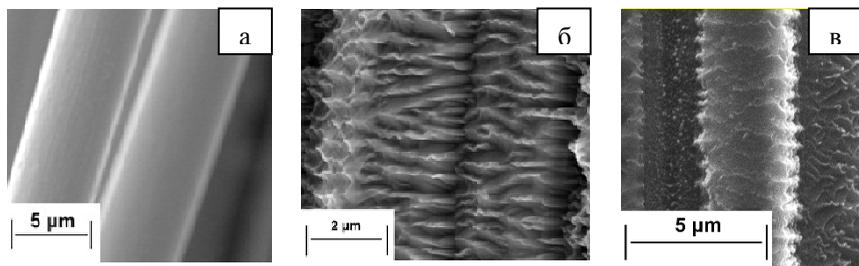


Рис.1. РЭМ-изображения углеродного волокна до(а) и после облучения ионами Ar^+ энергии 30 кэВ при температурах 300°C (б) и 400°C (в)

Найдено, что такие параметры гофрированной структуры, как углы наклона гофров и доля гофрированной структуры $L_{\text{гоф}}/L_{\text{исх}}$ проявляют экстремальные зависимости от температуры облучаемой мишени с минимумами при $T \sim 450^\circ\text{C}$, см. рис.2. Угол наклона граней гофров, являясь при $T = 400^\circ\text{C}$ наименьшим $\beta = 15^\circ$, при $T = 200$ и 600°C превышает 40° . На РЭМ-изображениях эти особенности проявляются в виде сглаживания гофров в приосевой области волокна, облученного при $T = 400^\circ\text{C}$.

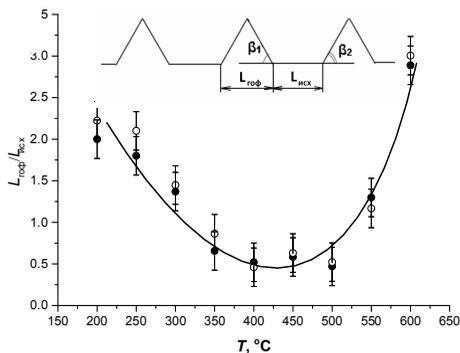


Рис.2. Температурная зависимость относительной доли $L_{\text{гоф}}/L_{\text{исх}}$ гофрированной структуры

Найденные закономерности позволяют связать явление ионно-индуцированного гофрирования с анизотропными радиационно-индуцированными пластическими процессами формоизменения углеродных материалов [3] с учетом эрозии при распылении поверхности волокна ионной бомбардировкой.

Список литературы:

- [1] Andrianova N.N., Borisov A.M., Mashkova E.S., Parilis E.S., Virgiliev Yu.S. // Horizons in World Physics, Nova Science Publishers. 2013. V. 280. P. 171-190.
- [2] Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С., Петров Д.В. // Поверхность. Рентген-, синхротрон. и нейтрон. исследования. 2014. №6. С.6-11.
- [3] Virgil'ev Yu.S., Kalyagina I.P. // Inorganic Materials. Suppl. 1. 2004. V.1. p. S33-S49.

В.П. БУДАЕВ^{1,2}, Л.Н. ХИМЧЕНКО³

¹ НИЦ «Курчатовский институт»,

²Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

³«Проектный центр ИТЭР», Москва

ВЛИЯНИЕ ДУГООБРАЗОВАНИЯ НА ЭРОЗИЮ МАТЕРИАЛОВ В ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ

Анализ экспериментальных данных по эрозии и результатов испытания материалов первой стенки и дивертора вольфрама и бериллия термоядерного реактора ИТЭР показал недостаточность имеющейся базы данных для принятия окончательных инженерных решений по конструкции модулей первой стенки и дивертора и предсказанию нагрузки в ИТЭР при ЭЛМах, срывах и др.

При плазменно-тепловых испытаниях материалов первой стенки и дивертора термоядерного реактора ИТЭР в современных установках несколько эффектов, таких как распыление, растрескивание, плавление поверхностного слоя, движение расплавленного металла по поверхности, эрозия капель, испарение и кипение, рекристаллизация и отверждение расплавленного слоя, вызывают охрупчивание и значительное изменение структуры поверхности материала на глубину до сотен и тысяч микрометров [1]. Эти процессы приводят к стохастической кластеризации слоев на поверхности на масштабах от десятков нанометров до сотен микрометров, образуя шероховатость поверхности с чрезвычайно высокой удельной площадью [2]. Такая неоднородная поверхность благоприятна для инициации униполярных дуг и искровых процессов.

В работе [3] рассмотрены эффекты взаимодействия плазма-стенка, при которых униполярные дуги могут приводить к выносу дополнительного теплового потока из плазмы на поверхность, приводящего к охлаждению приповерхностной плазмы. Для оценки этого эффекта и его вклад в нагрев первой стенки в термоядерном реакторе следует накопить и систематизировать экспериментальную базу данных эффектов дугообразования.

В экспериментах на токамаке Т-10 с вольфрамовыми диафрагмами (лимитерами) были зарегистрированы высокие тепловые нагрузки на край диафрагм до 50 МВт/м² при длительности такой нагрузки более 100 мсек (т.е. в квазистационарных условиях) [4], приводящие к значительной эрозии с эффектами дугообразования.

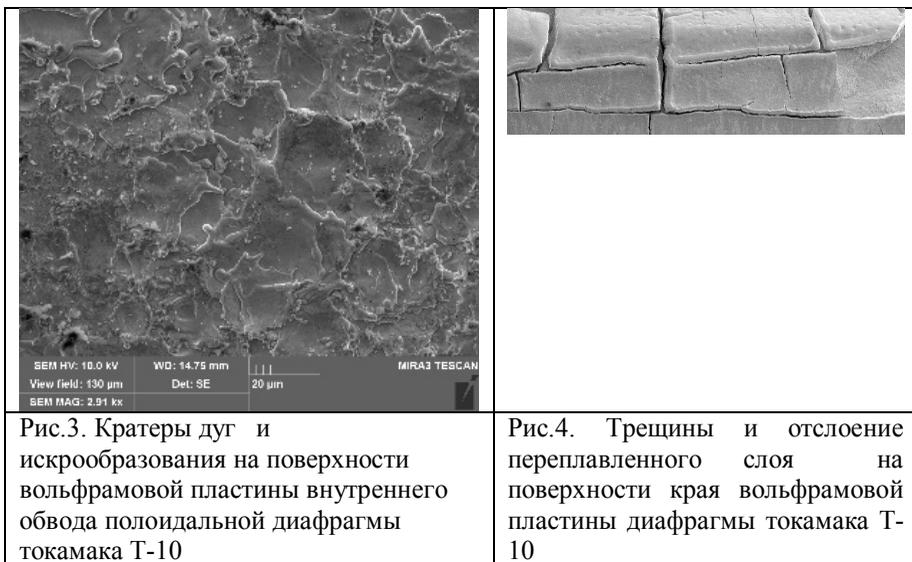


Рис.1. Оплавление и эрозия края вольфрамовой пластины внутреннего обвода полоидальной диафрагмы токамака Т-10



Рис.2. Трещины на боковой поверхности вольфрамовых пластин внутреннего обвода полоидальной диафрагмы токамака Т-10

Такие экстремально большие нагрузки формировались в специальных режимах токамака Т-10 с СВЧ нагревом плазмы, в которых большая часть теплового потока из плазменного шнура (около 100 кВт) концентрировалось на небольшой поверхности вольфрамовых пластин диафрагмы на внутреннем обводе (около 20 см²), вызывая нагрев края этих пластин до температуры, выше температуры плавления вольфрама (выше 3460 °С) (рис.1). Такая плазменно-тепловая нагрузка вызвала значительную эрозию и растрескивание поверхности вольфрамовых пластин (рис.2). Радиальный размер трещин больше, чем ширина радиального спада продольной энергии (которая для токамака Т-10 около 5-7 мм). В зонах с повышенной эрозией на поверхности пластин, обращенных и к ионной стороне, и к электронной стороне пластин по отношению к продольному потоку, наблюдались кратеры дуг (рис.3). Наблюдались отслоение и деструкция поверхностных слоев после расплава в некоторых зонах (рис.4). Наибольшая эрозия наблюдалась на торцевой поверхности вольфрамовых пластин, обращенных к центру плазмы.



Исследование поверхности вольфрамовых пластин из токамака Т-10 методом электронной микроскопии выявило кратеры с размером 1 - 5 мкм, которые могут быть идентифицированы как искровые кратеры. Глубокие дуговые кратеры диаметром 30 – 100 мкм (рис.5) сформированы как катодные пятна первого и второго рода. Следует отметить, что при испытания бериллиевых пластин ИТЭР на установке КСПУ-Ве с нагрузками, идентичными нагрузкам ожидаемыми при ЭЛМах в ИТЭР, обнаружены кратеры с такими же размерами, как в токамаке Т-10 (рис.6) [5]. Это может указывать на универсальный характер дугообразования при взаимодействии высокотемпературной плазмы с металлическими материалами. Характер эрозии поверхности вольфрама и бериллия после повышенной плазменно-тепловой нагрузки указывает на т.н. эктонный механизм электронной эмиссии (взрывной эмиссии электронов) [6,7], приводящий к повышенному разогреву поверхности в условиях самоподдерживающегося процесса, что может приводить к расплавлению поверхности в зоне дугообразования.

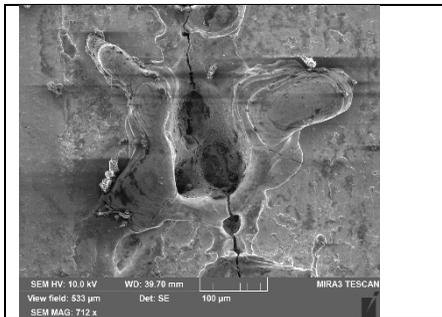


Рис.5. Глубокий дуговой кратер – катодное пятно второго рода на вольфрамовой пластине из токамака Т-10

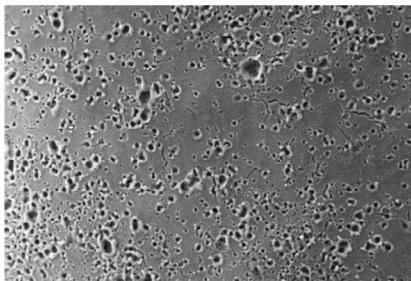


Рис.6. Дуговые кратеры на поверхности бериллиевой мишени ГПП-56ПС после плазменно- тепловых испытаний в КСПУ-Ве нагрузками ожидаемыми в ЭЛМах в ИТЭР

Работа была поддержана грантом РФФИ №17-19-01469, вольфрамовые образцы получены в экспериментах на токамаке Т-10, проведенных при поддержке ГК Росатом (контракт № Н.4х.241.9Б.17.1011), бериллиевые образцы получены при выполнении работ по программе испытаний материалов ИТЭР Проектного центра ИТЭР РФ.

- [1] Budaev V. P. Physics of Atomic Nuclei 79(7) 1137-1162 (2016)
- [2] Будаев В.П. Письма в ЖЭТФ 105 5 284–290 (2017)
- [3] Недоспасов А.В., Петров В.Г., Теплофизика высоких температур. 20, №1, 202-204 (1982)
- [4] Khimchenko L.N. et al. “Investigation of ITER-grade tungsten under very high heat loads”, Т.ОА2.496. 06 June 2017, SOFE-2017, Shanghai, China
- [5] Khimchenko L.N. et al. 20th International Conference on Plasma Surface Interactions 2012. Aachen, Germany. 20 May 2012 - 25 May 2012
- [6] Месяц Г.А. УФН 165, 6 601–626 (1995)
- [7] Barengolts S.A. et al. Nuclear Fusion, (50), 125004 (2010)

I.A. ZELTSER^{1,2}, E.N. MOOS^{2,3}

¹ Ryazan Metal Ceramics Instrumentation Plant Joint Stock Company, Russia

² Limited Liability Company "Ecton", Moscow, Russia

² Physical Department, Yesenin Ryazan State University, Russia

ELECTRODOPING SURFACE NITROGEN

The study of the alloying metal surface processes in a controlled gas atmosphere are of considerable interest for the modern technologies not only of traditional machine-building, but also significant for the electromechanical devices development in micro- and nanoelectronics. This raises interest in the possibilities of the alloy electroding (ED). It is known that when switching electric circuits of the direct and the alternating current, the process of the closing and opening contacts leads to the electric discharge processes. In this case erosion of the contact surface is observed. In particular, in the case of the doping in a nitrogen atmosphere, nitride-containing coatings can be formed.

The purpose of this paper is to experimentally confirm this assumption.

The objects of investigation were the reed switches that are constructed on the base of the serial devices MCA-14103 with a 14 mm balloon length [1] which do not have Au-Ru contact coatings.

The contacts of the reed switch are located almost parallel at a distance of about 30 μm from each other and have an overlap region of about 400 μm in length and 680 μm in width.

The contact springs were stamped from permalloy wire of "Dilaton 52" brand degreased and annealed in a hydrogen atmosphere. The wire was drawn from permalloy rod (52% Ni, 48% Fe) by vacuum melting. The dry nitrogen (with a dew point not more than - 63°C) and spectrally pure (99.999%) with the pressure about 300 mm Hg (39.9 kPa) were used as the gas filling.

The structure and elemental composition of the sample surface were studied by scanning electron microscopy (SEM) and X-ray spectral microanalysis (EPMA).

The measurements of the electrical resistance (R), the breakdown voltage (U), the magnetomotive actuation forces (F_{on}) and release (F_{off}) as well as switching tests (ST) of the reed switches were carried out by means of the specialized equipment [1].

The reed switch V, placed in the standard control coil L (number of turns 5000, resistance 870 Ohm), was connected to the variable source during the ED and to the DC source with the ST from the PS through the resistance R. The coil from the generator G was supplied with the ED sinusoidal voltage with frequencies in the range from 200 to 1000 Hz. During the ST a meander of the rectangular voltage pulses with a duration of 2 ms and a frequency of 50 Hz was

applied. The closing of the reed contacts at ED and ST occurred under the action of a magnetomotive force of $1.5 F_{on}$.

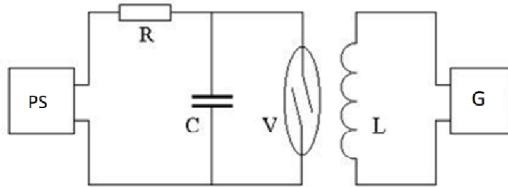


Fig. 1. The simplified diagram of the experimental installation for ED and ST reed switches: PS is the source of the switched current (variable at ED, constant at ST), R is the resistor, C is the parasitic capacitance, V is the reed switch, L is the control coil, G is the generator.

The contacts of reed switches from the mains were supplied with an alternating voltage of 220 V with 50 Hz. In mode N. 1, the switched current reached 48 mA, and in the mode N. 2 is about 95 mA. In both modes the switching frequency (ν) varied in the range from 200 to 1000 Hz in steps of 100 or 200 Hz. Regardless of the switching frequencies and currents values to be set the total number of the investigated reed switches remained constant and amounted to $5 \cdot 10^5$ operations.

The influence of the magnitude of the response frequency ν and current on the contact surface morphology, the concentration of nitrogen (n) in the surface layers of the formed contact pads (CP) and their area (S), and their effect on the electrical resistance (R) and on the breakdown voltage (U).

The obtained contact area SEM images and the EPMA spectrum of the reed contactor after its ED in the regime N. 2 ($I = 95$ mA) with $\nu = 400$ Hz showed that as a result of the ED two CPs of 79446.297 and 20943 mc^2 were formed. On its surface the chaotically located microcraters with a diameter of 2.4-3.6 mc were formed. The nitrogen concentration in the CP surface layers was 8.1 at.%. The spark breakdown which occurs when the contacts are approaching and the mass transfer of the material part from one contact to another. The periodic change in the transport direction creates the necessary conditions for the ionization and atomization of molecular nitrogen in the reed switch and ED. The mass transfer dynamics of the surface erosion processes occurring during current commutation are discussed [2] in the details.

The R and U measurements were carried out before and after ED. The initial values (up to ED) of the electrophysical parameters of the reed samples were: $R = 0.15-0.2$ Ohms (at a rate of $R \leq 0.1$ Ohm for serial devices MKA-14103), $U = 285$ V.

The conducted measurements of the resistance and breakdown voltage of this

sample showed that the values of these parameters as a result of the processing have a tendency to decrease to $R = 0.08 \text{ Ohm}$ (corresponds to the norm) and $U = 265 \text{ V}$ (decreased by $\Delta U = 20 \text{ V}$).

In the same way all prototypes of the reed switches were investigated. The results of SEM and EPMA studies and electrophysical measurements of the reed switch parameters are processed in the form of graphs of the experimental dependences of n , S , ΔU on v . The values of R for all v did not exceed the norm (0.1 Ohm).

ST reed switches after ED passed at idle (without current load, mode ST N.3) and in the process of switching them to a constant electric current with an active load (ST mode N. 4, 5) at the installation a simplified diagram of which is shown in Fig. 1.

In modes 4, 5, the contacts of the reed switches were supplied with a constant voltage of 24 V and 100 V, and a current of 400 and 100 mA was commuted, respectively. In all three modes of the ST the switching frequency corresponded to 100 Hz. The total operating time of the investigated reed switches in regimes N. 3, 4 and 5 amounted to 10^6 operations. Those who passed the tests were considered to be reeds in which the processes of the erosion and mass transfer did not lead to non-opening of the contacts or to their welding and whose resistance did not exceed the norm (0.1 Ohm).

In the beginning ST were conducted in regime N.3 and then the reed lots of 10 units which passed these tests passed ST according to regime N 4, 5. Thus, the rational regime of ED relics was determined. He was the mode of the doping number 2 with a switching frequency $v = 400 \text{ Hz}$, and a current of $I = 95 \text{ mA}$, the reed switches of which have withstood all these tests.

The amount of nitrogen N in the surface layers contact square and the nitrided layer thickness can be estimated from the formulas:

$$N = (\rho S h N_A n) / A, \quad (1) \quad N = S t / a^3, \quad (2) \quad t = (\rho a^3 h N_A n) / A \quad (3),$$

where ρ , A , h are the density, the atomic weight of the iron accordingly, $h = 0.5 \text{ }\mu\text{m}$ is the depth of the output of the X-ray signal from iron calculated by the Monte-Carlo method using the software of the energy dispersive microanalyzer INCA X-MAX 20, $a = 3.8 \text{ \AA}$ is the lattice constant of the extrusion alloy, N_A is the Avogadro number; S and n are the experimental data obtained from the SEM and EPMA studies.

The calculations carried out using formulas (1) and (3) taking into account the results of SEM and EPMA investigation of the contact surface showed that at ED reducers treated under mode 2 with a switching frequency of 400 Hz, a contact

place with a thickness of the nitrated layer approximately 149 nm in which there are $2.57 \cdot 10^{14}$ nitrogen atoms.

References

[1]. S.M. Karabanov, R.M. Mayzels, V.N. Shoffa, Magnetically contacts (reed switches) and products based on them, Dolgoprudny "Intellect" Publishing House, 408, 2011 (in Russian).

[2]. I.A. Zeltser, A.S. Karpov, E.N. Moos; N.B. Rybin, A.B. Tolstoguzov, Surface Erosion of Low-Current Reed Switches. Coatings, 2017, 7, 75.

I.A. ZELTSER^{1,2}, E.N. MOOS^{2,3}

¹ Ryazan Metal Ceramics Instrumentation Plant Joint Stock Company, Russia

² Limited Liability Company "Ecton", Moscow, Russia

² Physical Department, Yesenin Ryazan State University, Russia

EROSION MODEL OF SURFACE

I. Introduction

One of the main reasons of the reed switch contacts erosion is considered to be the formation of liquid metal bridge during opening a current 1 - 10 mA [1]. According to the G.A. Mesyatz hypothesis [2] only the ecton is a driver of mass transfer at closing and opening contacts. To date work on the erosion of low-power contacts are not fully considered the processes and mechanisms of formation of the prominences and recess holes on the electrode surface.

The aim of this work is an experimental study ecton model erosion contacts when switching electrical current circuits, based on the study of these processes and mechanisms. The morphology and elemental composition of the surface are studied by SEM, AFM and EDXA methods. The direct current switching mode was 24 V for 0.04; 0.1; 0.2; 0.3; 0.4 and 0.8 A with a resistive load and the operations numbers were from 0 to 1 million times.

II. Results

The electrical discharge machining of the anode and the mass transfer of the anode material to the cathode under conditions of arc discharge caused by the thermo mechanical action of the electron package (about 10^{11} electron) named as ecton emitted normal to the cathode surface jointly with the molten metal, steam and the plasma (cathode flame) with speeds of up to 10^6 cm/s in the direction of the anode. It occurs during the electrode convergence on the switching current. Its interelectrode gap reaches the distance about $d = 0.1 - 1$ microns. As a result of the cathode surface roughness the field increases (from 10^5 to 10^8 V/cm) and the autoelectronic emission and combination with thermionic are exited. If the threshold density ($\sim 10^8$ A/cm²) exceeded then it leads to explosive electron emission [3], the microexplosion transform the cathode material in liquid, steam and plasma phases: the spark stage of the discharge starts. The liquid metal drops fly out with the speed $v \approx 10^4$ cm/s. The cathode plasma flame moves to the anode with velocity $v \approx 10^6$ cm/s. The secondary electron current flows in the ecton form which in the cathode flame has a zero work function and injects in the direction of the anode. The ecton formation time is about $t_e \approx 10^{-8}$ s. The number of electrons in ecton is about $N_e \approx 10^{11} - 10^{12}$ [2]. The secondary electron emission single act (from one of the surface tip) lasting 10^{-8} s is terminated as a result of dissipation, emission of molten metal and reduce the current density. The spark temperature

reaches 10000°C in the breakdown channel. The cathode ecton localization energy (spark discharge) in the anode microvolume surface causes to its explosion due to the formation of several states: liquid, gaseous, plasma. The crater at the blast site is appeared. The anode crater exceeds the cathode one size because of the electrons from the anode flame is returned back to the anode increasing its temperature and the anode ions to compensate for electron space charge.

It leads to more heating of the anode. The polar portion mass transfer is from the anode to the cathode for the same electrode materials. The anode plasma flame, vapors and droplets move to meet the cathode ones. On the cathode surface are formed a large number (10^5 - 10^6) approximately the same geometrical size and shape of a saucer-like disc, and on the anode surface appear the same number of the small craters on the deepening inner surface.

By opening current due to the surface roughness of the contact divergence occurs simultaneously. Through a separate spot will be leaking all the current in the circuit. Therefore, the area of the retraction current is melted. It forms a molten metal bridge which exploding in the constriction zone creates the ecton giving the surface erosion.

The ecton erosion model foundation bases on the analysis of the SEM, AFM images and AFM profiles of the contact surface after switching the currents of 0.04; 0.4 and 0.8 A at a different number with 10^3 to 10^6 operations.

1. On SEM and AFM images of the anode and cathode surface of the samples after the operations the peak erosion on the cathode protrusions and corresponding recesses on the anode crater form are observed. The areas of cathode and anode new structures are approximately $1.3 \cdot 10^4 \text{ mc}^2$.

The cathode structures are flat protrusions or peak shape consisting of similar shape and diameter of the saucer-micron sized disks (2.8 and 5.4 micrometer diameter for 0.4 and 0.8 A currents accordantly, Figure 1). At the anode opposite the cathode protrusions formed the deepening which as well as the anode has a fine surface structure in the form of multiple approximately identical in shape and diameter (3 and 6 microns at currents of 0.4 and 0.8 A accordantly) microscopic craters.

2. The form and dimensions of microscopic craters anode and cathode discs is not dependent on the number of the operations and their diameters vary in direct proportion to the magnitude of current. The cumulative effect of the contact erosion during switching is the sum of the effects of erosion from individual operations. 3. The volume of the anode craters (0.36 and 9.42 mc^3) and volume of the corresponding cathode disks (0.4 and 8.5 mc^3 accordingly) from AFM profiles are defined for the current 0.4 and 0.8A. These volumes are approximately equal to each other in pairs. Consequently, the cathode disks are formed mainly from the

material transferred to the cathode from the anode craters formed microexplosions. As we suppose that it is caused by mechanical shock bursts of the ectons (electron package) on the anode surface.

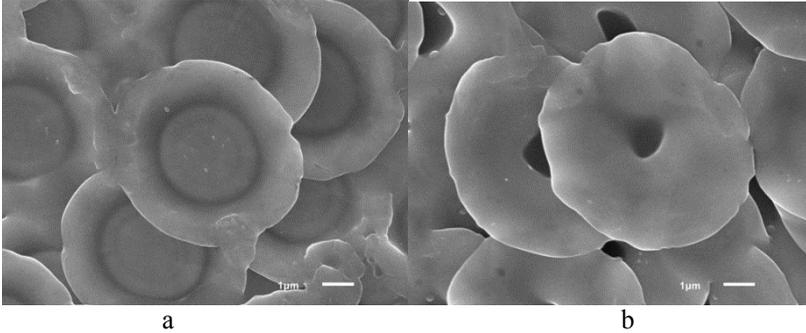


Figure.1. SEM image at a current of 0,8A: a- cathode discs, b – anode craters.

4. The formation of ecton energy impact on the cathode surface is mostly on the sublimation and ionization of matter. It is not difficult (considering the average ion charge, specific energy of sublimation and ionization energy consistent iron atom) to assess the threshold energy for the formation of one ecton ($N_e = 10^{11}$). It is inversely proportional to the mean ion charge of the cathode flame and it is directly proportional to the product of the number of the ecton electrons on the amount of the sublimation and ionization energy density values and approximately equals 10^{-8} J.

As the ecton formation time is $t_e \approx 10^{-8}$ s the threshold current source of power should be at 1 W and a current of 0.04 A. Indeed, SEM images of the contact surface erosion after switching current 0,04A is practically not observed.

Thus, it can be argued that the higher the specific energy of the material sublimation and ionization increase the erosion resistance. Then the criterion of the erosion resistance Z can be represented by the following expression:

$$Z = \gamma (E_r + E_i), \quad (1) \quad M = V_{ez} / V_{steel45}, \quad (2)$$

where $\gamma = 1$ is the universal proportionality factor for any solids, mol / kcal, E_r is the specific energy sublimation kcal / mol, E_i is the ionization energy (first ionization potential) kcal / mol. The evaluation of the metal or alloy workability experimentally found in [3]. To simplify the analysis of the electrical discharge machinability materials [3] used the relative ratio of machinability; where V_{ez} , V_{steel} are the linear metal material removal rate with the test material and the electrode made of steel45, mm /minute.

Table 1

The experimental values of the coefficient workability M for different metals

and steel 45 (English classification as 34CrNiMo6) [3].

Substance	M	substance	M
steel45	1	Ni	0,9
Cu	1,3	Mo	0,8
Al	1,5-1,7	W	0,7

The proposed criterion erosion resistance Z confirmed experimentally according to data presented in Table 2.

Table 2

Comparison criteria Z erosion resistance of materials with coefficients experimentally established workability M .

substance	E_r , kcal / mol	E_i , eV	E_i , kcal / mol	Z	Z / Z_w	M_w / M exper. [3]
Al	55	5.95	136.85	191.85	0.49	0.47
Cu	81,2	7,69	176,87	258,07	0,66	0,54
Fe	94	7.83	180.09	274.09	0.7	0.78
Mo	160	169.05	329.05	7.35	0.84	0.88
W	210	7.98	183.54	393.54	1	1

III. Summary

Thus, these presented data support a model of electron erosion by means of the mass transfer in the closing and opening of the contacts.

References

[1]. S.M. Karabanov, R.M. Mayzels, V.N. Shoffa, Magnetically contacts (reed switches) and products based on them, Dolgoprudny "Intellect" Publishing House, 408, 2011 (in Russian).

[2]. G.A. Mesyatz "Metal Acton-electron avalanche", "Advances of Physical Sciences", V. 165 (1995) 601(in Russian).

[3]. A.L. Livshits, A.T. Kravets, I.S. Rogachev, Electropulse metal processing, Moscow: Engineering, 1967(in Russian).

А.В. ЕЛЕЦКИЙ, С.Д. ФЕДОРОВИЧ, Г.С. БОЧАРОВ, О.С. ЗИЛОВА,
А.В. ЗАХАРЕНКОВ, Е.В. ТЕРЕНТЬЕВ, А.В. ЛУБЕНЧЕНКО,
Н. АБУСАИФ

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ НАНОУГЛЕРОДНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОГО НАГРЕВА

Результаты выполненных недавно исследований [1, 2], указывают на возможность существенного повышения механических характеристик стальной поверхности в результате покрытия нанокремнеземом с последующей обработкой высокоинтенсивным источником энергии (лазер, электронный пучок). Подобная обработка приводит к многократному увеличению микротвердости поверхности и существенному (на десятки процентов) снижению коэффициента трения. В работах [1, 2] в качестве упрочняющей присадки использовалась нанокремнеземная сажа, полученная в электрической дуге с графитовыми электродами в атмосфере гелия и обработанная растворителем с целью извлечения фуллеренов. В данной работе в этом качестве используются фуллерен C_{60} и восстановленный оксид графена.

Фуллерен C_{60} чистотой 99.8% был получен в Компании STS Ltd (С-Петербург). В качестве образцов, использованных в экспериментах по упрочнению, служили пластины из малоуглеродистой стали марки Армко с содержанием железа на уровне 99% размером 1,1x1,9 см и толщиной около 0,5 см. Элементный состав материала пластин определялся стандартным оптико-эмиссионным методом. В качестве источника лазерного излучения использовался коммерческий лазер типа ЛТА4-1 с длиной волны излучения 1,064 мкм, энергией импульса до 12 Дж и длительностью импульса 2 мс. Полученная зависимость микротвердости поверхности от удельной энергии лазерного облучения представлена на **рис. 1**. Как видно, эта зависимость имеет немонотонный характер с максимумом в области 100 – 150 Дж/см². При оптимальных условиях обработки достигается эффект восьмикратного увеличения микротвердости поверхности. Зависимость степени упрочнения поверхности от толщины фуллеренового покрытия имеет возрастающий характер (**рис. 2**).

На микрофотографиях стальной поверхности с фуллереновым покрытием можно видеть, что испарение растворителя приводит к образованию микрокристаллов фуллерена размером в несколько микрон.

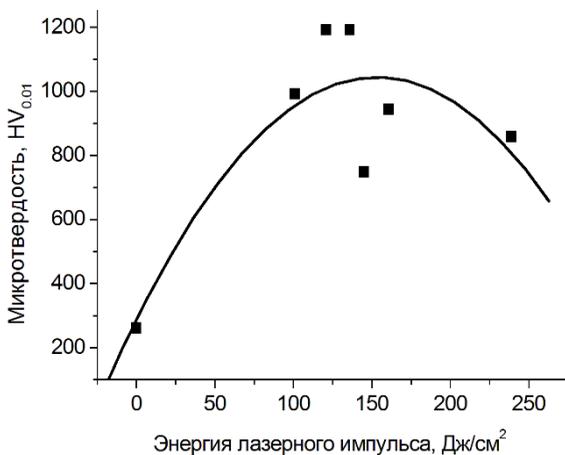


Рис. 1. Зависимость микротвердости стальной поверхности, покрытой 7 слоями фуллерена C_{60} , от энергии лазерного импульса

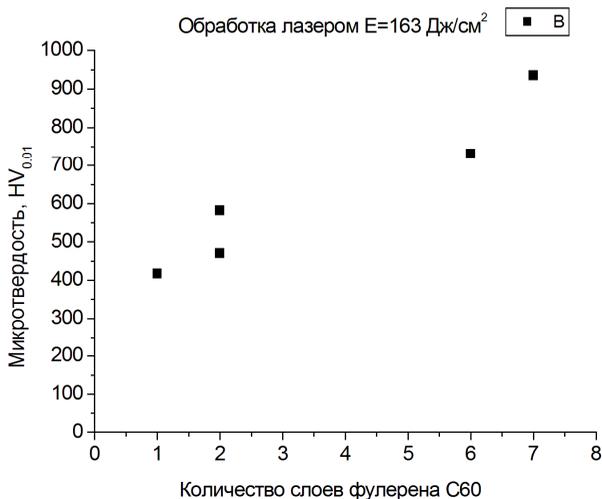


Рис. 2. Зависимость микротвердости стальной поверхности, обработанной лазерным излучением с энергией 163 Дж/см^2 , от числа слоев фуллерена C_{60}

Эти микрокристаллы беспорядочно разбросаны по поверхности и отстоят друг от друга на расстоянии до 10 микрон. Лазерное облучение поверхности приводит к разрушению этих микрокристаллов и к формированию весьма однородной пленки, содержащей фрагменты молекул фуллерена, внедренные в стальную матрицу.

Значения твердости, измеренные в зависимости от глубины и расстояния от центра лазерной дорожки на шлифе стального образца, покрытого 3 слоями фуллерена и подвергнутого лазерному облучению при энергии 220 Дж/см², монотонно убывают по мере продвижения вглубь материала и немонотонным образом зависят от расстояния до центра лазерной дорожки.

Выполнены эксперименты по упрочнению стальной поверхности в результате покрытия слоем частично восстановленного оксида графена (ОГ) с последующей обработкой лазерным излучением. В качестве упрочняющего материала использовалась пленка оксида графена толщиной около 40 мкм, подвергнутая термообработке при температуре 800 С. В качестве источника излучения использовался коммерческий лазер типа ЛТА4-1. Лазерный луч фокусировался в пятно диаметром 2,5-3 мм. Анализ микрофотографий обработанной поверхности в сочетании с измерениями на основе оптико-эмиссионным методом показывает, что содержание углерода в приповерхностной области в центре лазерного пятна не превышает 1,5 ат. %. Этот показатель убывает в 2-3 раза по мере удаления от центра лазерного пятна на расстояние 2 мм. Результаты измерений зависимости микротвердости обработанной поверхности от удельной энергии лазерного излучения приведены на рис. 3. Как видно, в этом случае указанная зависимость имеет монотонный характер. При максимальном значении удельной энергии лазерного облучения (220 Дж/см²) достигается примерно трехкратное увеличение микротвердости поверхности.

Результаты трибологических испытаний образцов показывают, что как лазерная, так и электроннолучевая обработка поверхности с фуллереновым покрытием сопровождается снижением коэффициента трения на десятки процентов. Сравнение результатов эксперимента с данными аналогичных измерений, выполненных при использовании в качестве покрытия наноуглеродной сажи, полученной при электродуговом распылении графита с последующей экстракцией фуллеренов, указывают на более высокую (примерно на 30 %) эффективность фуллерена в качестве упрочняющего материала.

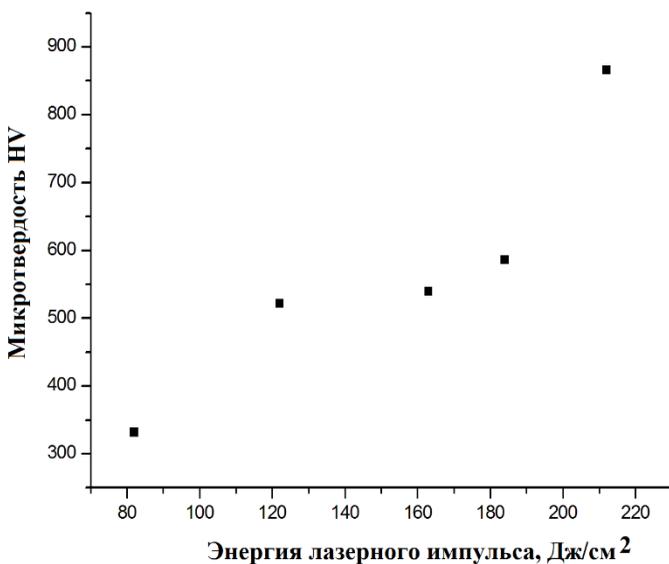


Рис.3. Зависимость микротвердости стальной поверхности с покрытием оксида графена, отожженного при температуре 800 С, от энергии лазерного облучения

Проведен химический анализ и определены относительные атомные концентрации компонентов приповерхностного упрочненного слоя методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС).

Работа выполнена в рамках проекта №16-19-10027, поддержанного Российским Научным Фондом.

Литература

1. Чудина О.В., Елецкий А.В., Федорович С.Д., Терентьев Е.В., Слива А.П., Бочаров Г.С., О.С. Зилова. «Лазерное легирование конструкционных сталей нанокремнеземными материалами». Технология машиностроения. 2017, вып. 9, с 5 – 9.

2. Бочаров Г.С., Елецкий А.В., Захаренков А.В., Зилова О.С., Слива А.П., Терентьев Е.В., Федорович С.Д., Г.Н. Чурилов. «Оптимизация упрочнения стальной поверхности углеродными наноструктурами с последующей обработкой высокоинтенсивными источниками». Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования» 2018, вып. 1, С. 33-39.

Т.Р. ТУЛЕНБЕРГЕНОВ, М.К. СКАКОВ, И.А. СОКОЛОВ,
Д.А. ГАНОВИЧЕВ

*Филиал Института Атомной Энергии
Национального Ядерного Центра, Курчатов, Казахстан*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПЛЕКСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ГЕЛИЕВОЙ И АЗОТНОЙ ПЛАЗМЫ НА КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ТЯР

В результате выполненной работы проведена серия экспериментов на имитационном стенде с плазменно-пучковой установкой, цель которых заключалась в исследовании взаимодействия гелиевой плазмы с не нитрированным вольфрамом и с предварительно нитрированной поверхностью вольфрама. В работе приведены параметры проведения экспериментов и результаты материаловедческих исследований облученного гелиевой плазмой вольфрама, а, именно, определена структура вольфрамового «пуха» нитрированной поверхности вольфрама и не нитрированного вольфрама. Выполнено сравнение результатов.

С целью расширения экспериментальных возможностей имитационного стенда изготовлено специальное охлаждаемое мишенное устройство, предназначенное для качественного отвода тепла от образца при увеличении тепловых нагрузок.

Полученные результаты исследования взаимодействия плазмы с вольфрамом могут быть использованы при проектировании элементов конструкции термоядерного реактора, анализа их рабочего ресурса и влияния на параметры плазмы.

Основными элементами плазменно-пучковой установки являются электронно-лучевая пушка, камера плазменно-пучкового разряда, камеры откачки, камера взаимодействия, электромагнитные катушки, мишенное устройство, шлюзовое устройство и камера загрузки [1].

ППУ обеспечивает получение следующих параметров плазменного потока: диаметр плазменного потока перед мишенью до 30 мм; напряженность магнитного поля, создаваемая на оси камеры ППР 0,1 Тл; плотность плазмы в пучке до 10^{18} м^{-3} ; максимальная величина тока в плазме 1 А; электронная температура плазмы от 5 эВ до 15 эВ.

С целью увеличения тепловых потоков, подаваемых на испытываемые образцы конструкционных материалов, разработано и изготовлено специальное устройство охлаждения облучаемых образцов. Конструктивная схема устройства приведена на рисунке 1. Исследуемый образец (1) устанавливается в посадочное место держателя (4), изготовленного из меди,

и фиксируемого при помощи накидной гайки (3). Для улучшения теплосъема и обеспечения герметичности в держателе образца выполнена стенка толщиной 1 мм. Охлаждение образца осуществляется водой, подаваемой при помощи форсунки (2).

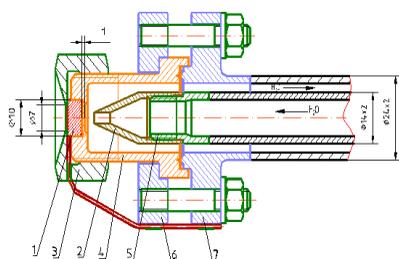


Рисунок 1 – конструктивная схема устройства охлаждения облучаемого образца

глубина проникновения азота в вольфрам после воздействия азотной плазмы.

В качестве плазмообразующего газа использовалась смесь из азота (70%) и водорода (30%). Добавка водорода используется для минимизации образования оксидов вольфрама на облучаемой поверхности. Свободный кислород вступает в реакцию с водородом, при этом образуется водяной пар, таким образом, минимизируется влияние кислорода на вольфрам.

Плотность ионного тока при азотировании вольфрама составила $\sim 12 \text{ mA/cm}^2$. Энергия ионов в тлеющем разряде постоянного тока определяется катодным падением напряжения. В проведенных экспериментах энергия ионов варьировалась 450 – 650 эВ.

По данным элементного состава образца в результате определено, что исследуемая поверхность состоит преимущественно из вольфрама массовая доля 91,94 %, с примесями элементов азота (массовая доля 6,71 %) и кислорода (массовая доля 1,34 %). Необходимо отметить, что согласно методике ЭДС-анализа полученные результаты содержания элементов имеют место для тонкого приповерхностного слоя, толщиной несколько микрон.

Для оценки глубины проникновения азота в поверхностный слой вольфрама были предприняты попытки определения азотированного слоя в поперечном сечении образца методом элементного картирования [2]. Для создания карт распределения элементов по поверхности выбраны элементы

В 2016 году были начаты экспериментальные исследования по выбору параметров режима нитрирования образцов из вольфрама. Было проведено нитрирование 3-х образцов из вольфрама W-1, W-2, W-3. В начале 2017 года для окончательного выбора параметров нитрирования на плазменно-пучковой установке был проведен заключительный эксперимент по нитрированию вольфрама W-4. Исследовался фазовый состав и

W, N, O. На рисунке 2 представлен профиль распределения элементов в поперечном сечении, полученный по результатам картирования.

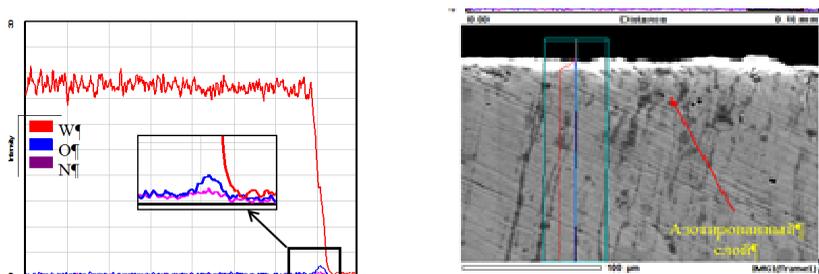


Рисунок 2 – Профиль распределения элементов в поперечном сечении образца вольфрама, $\times 500$

С целью проведения сравнительного анализа образования вольфрамового пуха на чистом вольфраме и предварительно нитрированном вольфраме было проведено 3 эксперимента по облучению чистых образцов вольфрама гелиевой плазмой (образцы W 5-7) и 2 эксперимента по облучению предварительно нитрированных образцов вольфрама гелиевой плазмой (образцы W-8 и W-9). Параметры облучения образцов вольфрама в ППР приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры облучения образцов вольфрама

№ образца	Длительность облучения, ч	Флюенс ионов, см^{-2}
W-5	2	$7 \cdot 10^{20}$
W-6	8	$2,8 \cdot 10^{21}$
W-7, 8	4	$1,4 \cdot 10^{21}$
W-9	8	$2,8 \cdot 10^{21}$

Состав газовой смеси: He $6 \cdot 10^{-6}$ Торр, H₂ $1 \cdot 10^{-6}$ Торр; давление в камере ППР: 0,001 Торр; напряжение на мишени: -300 В; ток на образце: 110 ± 10 мА; температура образца: $990 \pm 20^\circ\text{C}$ (пирометр); температура образца: $840 \pm 20^\circ\text{C}$ (термопара).

Изображения СЭМ поверхности образцов W5 – W7 после облучение представлены на рисунке 3. Обнаружено, что после бомбардировки ионами гелия поверхность образцов вольфрама покрыта специфическим наноструктурированным слоем, состоящего из тонких вольфрамовых нитей. Плотность вольфрамовых нитей увеличивается с увеличением времени облучения. На вольфрамовых образцах после облучения гелиевой плазмой зафиксировано равномерное образование пор по всей поверхности.

Образец W-5 (2 ч)	Образец W-6 (8 ч)	Образец W-7 (4 ч)	Образец W-8 (4 ч)	Образец W-9 (8 ч)
-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------

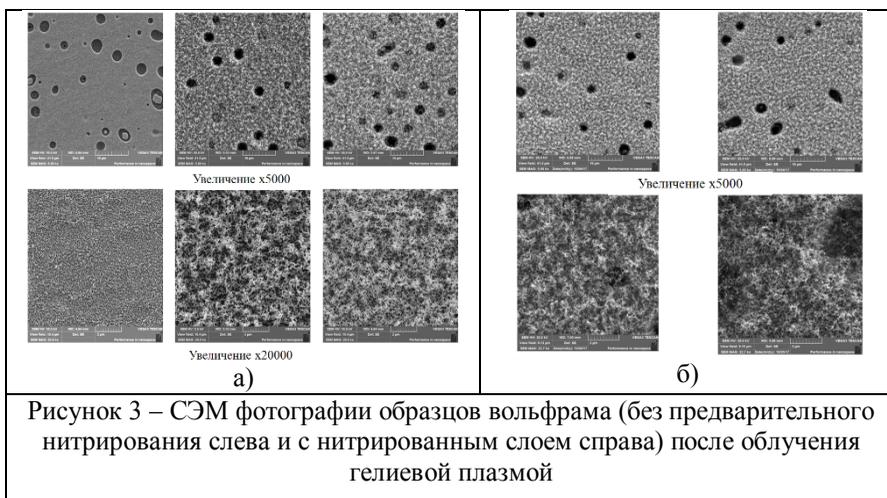


Рисунок 3 – СЭМ фотографии образцов вольфрама (без предварительного нитрирования слева и с нитрированным слоем справа) после облучения гелиевой плазмой

Обнаружено, что после бомбардировки ионами гелия предварительно нитрированной поверхности образцов вольфрама, поверхность также покрыта слоем вольфрамового пуха. Надо отметить тот факт, что после предварительного нитрирования разница в плотности вольфрамовых нитей менее зависима от времени облучения. На поверхности вольфрамовых образцов после облучения гелиевой плазмой с предварительным нитрированием наблюдается перекрывание мелких пор вольфрамовым пухом, вне зависимости от времени облучения. На поверхности вольфрама W-9 крупные поры частично перекрыты. Очевидно, это связано с увеличенным в 2 раза временем облучения образца.

На не нитрированной поверхности вольфрама структура пуха более равномерная, чем на образцах с предварительной нитритизацией.

Список литературы

1. Стенд имитационных испытаний в сопровождение исследований на токамаке КТМ (СИИ-КТМ) : итоговый отчет : 85-3-021-129: Ч.1.– М. : МИФИ, 2005.
2. О проведении материаловедческих исследований вольфрамового образца: протокол от 31.03.17 № 12-230-02/1018 / Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК.– Курчатov, 2017.

М.М. ЦВЕНТУХ

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

ВЕЛИЧИНА ИМПУЛЬСА ПЛАЗМЫ ВЗРЫВОЭМИССИОННЫХ ЯЧЕЕК КАТОДНОГО ПЯТНА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ВАКУУМЕ

Предложена простая сквозная модель взрывоэмиссионного импульса ячейки катодного пятна вакуумной дуги, включающая как инициирование, так и погасание ячейки [1]. Инициирование происходит при электрическом взрыве перешейка жидкометаллической струи, распространяющейся из кратера от предыдущего взрыва в плазму катодного пятна. Погасание происходит из-за расширения плазмы и спада ее плотности от $\sim 10^{22}$ см⁻³ до уровня фоновой плазмы $\sim 10^{18}$ - 10^{19} см⁻³. Взрыв рассматривается как переход через критическое состояние (критическую температуру).

Получены численные и аналитические решения для временных зависимостей ключевых величин – плотности, температуры, а также для таких свойств как импульс μ взрывоэмиссионной плазмы, отнесенный к протекшему заряду, и омическое электрическое поле в ней, j/σ . Установлено, что усредненные по времени взрывоэмиссионного импульса величины импульса плазмы μ , и поля, j/σ , составляют десятки г см / (с Кл) и десятки кВ/см (с учетом катодного падения ~ 20 В, размер плазмы – несколько мкм).

Данные результаты подтверждают модель первичного ускорения плазмы ячеек катодного пятна градиентом давления, а также модель омической природы катодного падения потенциала.

Импульс взрывоэмиссионной плазмы, отнесенный к протекшему заряду, μ , был определен как отношение среднего давления к средней плотности тока $\langle p \rangle / \langle j \rangle$,

$$\mu = \frac{n_0}{j_{\max}} T_{cr} \quad (1)$$

где n_0 – плотность жидкого металла, T_{cr} – критическая температура (~ 1 эВ), и j_{\max} – максимальная плотность тока, достигаемая при взрыве перешейка (несколько ГА/см²). Было получено, что токовая (дрейфовая) скорость электронов при взрыве

$$v_{1e} = \frac{J_{\max}}{Zen_0}, \quad (2)$$

(где Z – средний заряд ионов, +1, +2, +3 для Li, Cu, W) близка к ионно-звуковой скорости $(T_{cr}/M_i)^{1/2}$. Таким образом импульс плазмы при взрыве может быть оценен как

$$\mu = \frac{T_{cr}}{Zev_{1e}} \approx \frac{\sqrt{M_i T_{cr}}}{Ze}. \quad (3)$$

Величина μ , составляющая десятки $g \text{ cm} / (s \text{ C})$, согласуется с результатами измерений удельной силы отдачи и измерениями импульса катодного факела – произведению скорости ионов и ионной эрозии: $v_i \sim 10 \text{ km/s}$, $\gamma_i \sim 0.1 \text{ mg/C}$ [2-3], а также с импульсом, соответствующим жидкометаллической фракции, который можно оценить как произведение известной скорости разлета капель $v_l \sim 10^4 \text{ cm/s}$ и общей эрозии $\gamma_{liq} \sim 1 \text{ mg/C}$ [4]. Таким образом

$$v_l \times \gamma_{liq} \approx \mu \approx v_i \times \gamma_i. \quad (4)$$

Учитывая, что начальная скорость расширения плазмы составляет величину порядка $(T_{cr}/M_i)^{1/2}$, можно из соотношений размерности оценить уровень начальной эрозии $\gamma_{pl,0}$ как $\mu/(T_{cr}/M_i)^{1/2}$, то есть

$$\gamma_{pl,0} \approx \frac{M_i}{Ze}. \quad (5)$$

Эта величина примерно на порядок превышает измеряемую величину ионной эрозии γ_i , что определяется ускорением плазмы в катодном факеле. Известно [5-6], что по мере расширения плазмы катодного факела из взрывоэмиссионного центра микронного размера на 100 мкм и более, скорость ионов увеличивается примерно на порядок и достигает наблюдаемых экспериментально величин порядка $v_i \approx 5\text{--}20 \text{ км/с}$ вне зависимости от условий разряда.

Нами было установлено, что электронная токовая (дрейфовая) скорость в катодном факеле

$$v_e \approx v_i / \alpha_i \quad (6)$$

(где $\alpha_i \sim 10\%$ – отношение ионного тока на анод к электронному), может быть оценена как

$$v_e \sim \sqrt{T_{cr} / 2\pi m_e}. \quad (7)$$

Исходя из сохранения импульса взрывоэмиссионной плазмы μ (3) можно оценить уровень уносимой массы, отнесенной к протекающему заряду как μ/v_i , что с учетом (6)-(7) дает

$$\gamma_\mu = \frac{\mu}{v_i} = \frac{\sqrt{2\pi m_e M_i}}{\alpha_i Z e} \quad (8)$$

Эта величина составляет десятки мкг/Кл, что близко к измеряемым величинам ионной эрозии γ_i . При этом следует отметить, что это очень общее выражение для эрозии.

Сохранение импульса взрывоэмиссионной плазмы позволяет объяснить характер эрозии слоев вольфрамовых нановолокон W-fuzz [7]. В эксперименте было установлено, что общая дуговая эрозия увеличивается втрое от ~ 0.5 мг/С до ~ 1.5 мг/С при увеличении толщины слоя до величины более 2 мкм.

При электрическом взрыве каждого фрагмента волокна происходит передача механического импульса соседним участкам из-за высокой пористости слоя. Физическая аналогия – удар молнии в дерево в лесу, который приводит к повреждению соседних деревьев разлетающимися фрагментами.

Импульс плазмы при взрыве фрагмента нановолокна (с плотностью n_{wire} и размером r)

$$M_{pl} v_{pl} = n_{wire} r^3 \sqrt{M_i T_{cr}} \quad (9)$$

из-за высокой пористости может быть передан $\sim R^2/r^2$ соседним фрагментам (где R расстояние между фрагментами), которые в сумме имеют в $\sim R^2/r^2$ большую массу M_2 . Зная среднюю плотность волокон, n_{fuzz} (составляющую $\sim 5 - 30\%$ от n_0), можно оценить это отношение как

$$(R/r)^2 = (n_0/n_{fuzz})^{2/3} \sim 10. \quad (10)$$

Из сохранения импульса

$$M_{pl} v_{pl} = M_2 v_2 = (n_0/n_{fuzz})^{2/3} M_{pl} v_2 \quad (11)$$

следует, что соседние фрагменты приобретут скорость

$$v_2 = (n_0/n_{fuzz})^{-2/3} \sqrt{\frac{T_{cr}}{M_i}} \sim 10^4 \text{ cm/s}. \quad (12)$$

Это означает их механическое разрушение произойдет за время порядка $r/v_2 \sim 10$ ps.

Полная эрозия при горении ячеек катодного пятна на слоях нановолокон состоит из двух основных компонент – плазма, массой M_{pl} , и микрочастицы, массой M_2 . То есть эрозия к протекшему заряду q есть

$$\gamma_{total} = \gamma_i + \gamma_{dust} = (M_{pl} + M_2) / q. \quad (13)$$

Учитывая (9), (11) получим зависимость полной эрозии от средней плотности нановолокон n_{fuzz}

$$\gamma_{total} = \frac{n_{wire} r^3 M_i}{q} \left[1 + \left(\frac{n_0}{n_{fuzz}} \right)^{2/3} \right] \quad (14)$$

Как видно $d\gamma_{total}/dn_{fuzz} < 0$, что означает, что полная эрозия к протекшему заряду растет с уменьшением средней плотности нановолокон, что связано с механическим разрушением под воздействием импульса взрывоэмиссионной плазмы.

Работа поддержана РФФИ, грант 16-08-01306-а.

1. M.M. Tsventoukh, Plasma parameters of the cathode spot explosive electron emission cell obtained from the model of liquid-metal jet tearing and electrical explosion, *Phys Plasmas submitted*
2. A. Anders, E.M. Oks, G.Y. Yushkov, K.P. Savkin, I.G. Brown, and A.G. Nikolaev 2005 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **33** (5) 1532
3. G.Yu. Yushkov, A. Anders, E.M. Oks, and I.G. Brown 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 5618
4. V.F. Puchkarev and A.M. Murzakaev 1990 *J. Phys. D.: Appl. Phys.* **23**, 26
5. S.A. Barengolts, G.A. Mesyats, D.L. Shmelev 2001 *JETP* **93** 1065
6. D.L. Shmelev and S.A. Barengolts 2013 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **41**(8) 1964
7. D. Hwangbo, S. Kajita, S.A. Barengolts, M.M. Tsventoukh, S. Kawaguchi, and N. Ohno 2017, Ignition and Erosion of materials by arcing in fusion relevant conditions, *16th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices 27-29 Sep 2017 Marseille (France)* P1-20, *Contrib. Plasma Phys.*, submitted

А.В. НЕСТЕРОВИЧ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ Θ -ПИНЧЕЙ В ОКРЕСТНОСТИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ В ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ

В докладе приводятся результаты лазерного масс-спектрометрического анализа поверхности образцов, подвергших длительной обработке сильноточными разрядами в потоке жидкости (в частности, воды с примесями различного состава). Исследования проводились несколькими лабораториями (ООО «Лазер-МИФИ», Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова РАН, Институт геохимии и аналитической химии имени В. И. Вернадского РАН, Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН и др.). Установлено, что элементный состав поверхности металла, в частности, бескислородной меди, может изменяться значительно (до 35% ат.) по сравнению с первоначальным составом (99,8% ат.) на глубину до 10 мкм. Отмечено также изменение изотопного состава (содержание изотопа 65 а.е.м. может составить 38,1% при норме 30,6%). Состав воды (дистиллированная, водопроводная, насыщенная солями) не влияет на результаты. Концентрация таких элементов, как Cl, может превышать первоначальную в 3000 раз. На глубине 10 мкм состав совпадает с первоначальным (до воздействия).

Эксперименты проводились с различными металлами, кроме меди, бериллий, вольфрам и др. Установлено, что по большинству элементов состав релаксирует к исходному состоянию через время $\sim(3-6)$ недель. Обнаружено наличие элементов, не входящих в состав примесей до воздействия (P; S).

Анализ полученных результатов и результатов материаловедческих исследований и теоретических работ, посвященных изучению природы пинчевых плазмOIDов, позволяет сделать предварительный вывод о возможности образования в основании пинчей монополярных магнитных зарядов, поиск которых проводился ранее в предположении о их разделении сильными магнитными полями. В основании пинча при токах, регистрируемых в эксперименте (до нескольких килоампер) и размерах основания пинчей (диаметром ~ 30 мкм) не исключается создание вертикального магнитного поля индукцией в несколько десятков Тл, разделяющего и ускоряющего монополи. Косвенным подтверждением в такой гипотезе является наличие элементных изменений в поверхностном слое с обратной (!) стороны образца (пластина толщиной в несколько мм).

Единственным объяснением этого факта может служить распределение одноименных заряженных монополей (только «северных», или только «южных»), испытывающих взаимное отталкивание. Выход монополя за пределы образца потребует дополнительных мер (сверхсильного магнитного поля). В области локализации монополя изменение элементного состава, как правило, должно происходить, предположительно, за счет наличия вблизи него электронов сверхвысокой плотности (может превышать плотность электронов в окружающей среде на несколько порядков). При этом близлежащие ядра сливаются, образуя более тяжелые, т.к. кулоновский барьер снижается отрицательным зарядом этих электронов (пример – образование P и S из атомов воздуха и ионов водяного пара). Еще легче происходит «нейтрализация», т.е. слияние электрона и протона в ядре. Атом со временем либо релаксирует к исходному состоянию – электроны покидают поверхность в процессе бета-распада – свечение поверхности в отдельных точках (об этом сообщалось ранее), либо остается в виде нового элемента (нейтрализация ближайшего ядра-изотопа), чему, предположительно, может способствовать зондирующее лазерное излучение.

Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ, А.Н. ШЕВЕЙКО,
Д.В.ШТАНСКИЙ, А.Е. ЛЕВАШОВ

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ В СИСТЕМЕ Ti-C-(Ni,Al,Fe), ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫМ, ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДАМИ, А ТАКЖЕ ПО ГИБРИДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Сравнительное исследование покрытий Ti-C-Ni-Fe, Ti-C-Ni-Al, and Ti-C-Ni-Al/Ti-C-Ni-Fe, полученных методами электроискрового легирования (ESD) с использованием электрода TiCNi, магнетронного распыления (MS) с использованием мишени TiCNiAl, и комбинации этих методов (MS-ESD) описывается в представленной работе. Микроструктуру и элементный состав покрытий изучали с помощью рентгеновской дифракции, сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионной спектроскопии и оптической эмиссионной спектроскопии тлеющего разряда. Покрытия были испытаны с помощью современных методов диагностики поверхностных слоёв для определения твердости, модуля упругости, упругого восстановления, устойчивости к растрескиванию, коэффициента трения, и сопротивления износу при трении в режиме скольжения, ударных воздействий и в абразивных условиях. Также определялись коррозионная стойкость и жаростойкость покрытий. В работе показано, что использование гибридного метода MS-ESD позволяет получить покрытия Ti-C-Ni-Al/Ti-C-Ni-Fe с улучшенными трещиностойкостью, износостойкостью и стойкостью к окислению по сравнению с однослойными MS аналогами и пониженным коэффициентом трения, повышенной коррозионной стойкостью по сравнению ESD покрытиями.

Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ, А.Н. ШЕВЕЙКО, К.А. КУПЦОВ
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИМПУЛЬСНОГО КАТОДНО-ДУГОВОГО ТЕРМИЕСКОГО ИСПАРЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ В СИСТЕМЕ Cr-B-C-N

При получении нанокomпозиционных покрытий в системе Cr-B-C-N использован метод импульсного катодно-дугового испарения керамических мишеней, полученных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Изучено влияние технологических параметров осаждения на структуру и свойства покрытий. Для структурных исследований использовались методы рентгенофазового анализа, просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, оптической эмиссионной спектроскопии тлеющего разряда, оптической профилометрии, спектроскопии комбинационного рассеяния света и др. Свойства покрытий определялись с помощью наноиндентирования и трибологических испытаний. Показано, что керамические СВС-мишени CrB_2 могут быть применены не только в магнетронных распылительных системах, но и в системах катодно-дугового испарения, что существенно расширяет технологические возможности управления структурой и эксплуатационными характеристиками многокомпонентных нанокomпозиционных покрытий. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (госзадание 11.7172.2017/8.9).

1. Ph. V. Kiryukhantsev-Korneev, D. Horwat, J. F. Pierson, and E. A. Levashov. Comparative Analysis of Cr-B Coatings Deposited by Magnetron Sputtering in DC and HIPIMS Modes. *Technical Physics Letters*, 2014, Vol. 40, No. 7, pp. 614–617

2. Ph. V. Kiryukhantsev-Korneev, A. N. Sheveyko, K. A. Kuptsov, A. V. Novikov, and D. V. Shtansky. Ti-Cr-B-N Coatings Prepared by Pulsed Cathodic-Arc Evaporation of Ceramic TiCrB Target produced by SHS. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2013, Vol. 49, No. 6, pp. 677–681.

Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ¹, Е.Н. ШЕФТЕЛЬ², Б.С. ТЫНЫСОВ¹
В.А. ТЕДЖЕТОВ², Е.В. ХАРИН²

¹ *Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»*

² *Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН*

ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ ФЕРРОМАГНИТНЫЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ПЛЁНКИ Fe-ZrN/TiB/AIO ДЛЯ СВЧ- УСТРОЙСТВ

Одним из направлений в развитии современной электроники является создание магнитно-мягких плёнок для высокочастотных устройств записи и хранения информации. Помимо высокой намагнитченности насыщения, такие плёнки должны иметь высокие значения магнитной проницаемости на высоких частотах, вплоть до ГГц интервала. Данная работа посвящена разработке тонкоплёночных покрытий на основе железа с добавками модифицирующих керамических фаз, таких как ZrN, TiB₂, Al₂O₃, положительно зарекомендовавших себя при создании объёмных магнитно-мягких материалов.

Плёнки в системах Fe-Zr-N, Fe-Ti-B и Fe-Al-O были получены с помощью метода магнетронного напыления. В качестве катодов использовались пластины Fe с равномерно распределёнными по ним чипами из следующих материалов: Zr, TiB, TiB₂, Fe-Al₂O₃, литых, или полученных методами порошковой металлургии. Перед каждым распылением мишень перегревалась выше температуры Кюри, что делало возможным процесс распыления. Осаждение велось в газовой атмосфере Ar, Ar+N₂ или Ar+O₂ при общем давлении от 0.2 до 1 Па. В качестве подложек использовались пластины из стекла. Исследование структуры плёнок осуществлялось с применением методов рентгенофазового анализа, просвечивающей и растровой электронной микроскопии, энергодисперсионного анализа, оптической эмиссионной спектроскопии тлеющего разряда. Были оценены статические магнитные свойства (индукция насыщения, коэрцитивная сила), а также параметры магнитной структуры. Для ряда образцов определены высокочастотные магнитные свойства (магнитная проницаемость, частота ферромагнитного резонанса).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 18-03-00502А).

Д.Д. БЕРНТ¹, С.А. МАЛАНИЧЕВ², И.Д. ТРОШКИНА², А.А. ПИСАРЕВ³

¹ООО «Пилкингтон Гласс», дер. Жуково Раменского р-на МО, Россия

²Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОСАЖДЕНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ОКСИДА ТИТАНА РАСПЫЛЕНИЕМ КЕРАМИЧЕСКОЙ МИШЕНИ В ПЛАЗМЕ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА И ИХ СВОЙСТВА

В современных прикладных тонкопленочных технологиях активно используется осаждение группы материалов, совокупно именуемых ТСО – прозрачных токопроводящих оксидов (transparent conductive oxides). Являющиеся, как правило, проводниками n-типа, данные материалы обладают проводимостью, сравнимой с металлической. Так, при толщине слоя в примерно 200-300 нм можно ожидать достижения величины поверхностного сопротивления слоя меньше 10 Ом/□. Одновременно с этим, благодаря большой ширине запрещенной зоны (более 3 эВ), тонкопленочные покрытия данных материалов демонстрируют высокий уровень прозрачности по отношению к электромагнитному излучению видимых длин волн. Благодаря сочетанию высокой прозрачности и проводимости, ТСО-материалы используются в производстве прозрачных электродов жидкокристаллических экранов, органических светодиодов и сенсорных экранов. Кроме того, они применяются в фотовольтаике – в качестве тонкопленочных фотопреобразователей и для создания прозрачных электродов в фотоприёмниках; в теплозащитных тонкопленочных решениях, таких как низкоэмиссионные покрытия на архитектурном стекле; могут использоваться для создания проводящих покрытий на других материалах, что защищает от формирования электростатических зарядов. Наиболее активно и широко используемыми материалами из описываемой группы являются, в силу совокупности комплекса их оптоэлектрических качеств и стоимости, ИТО – смешанный оксид индия-олова (indium tin oxide), TiO_x – оксид титана, ЗАО – оксид легированного алюминием цинка (zinc-alumina oxide) [1].

Формирование тонкопленочных покрытий указанных материалов чаще всего осуществляется путем физического осаждения из плазмы магнетронного разряда, причем традиционно применялся т.н. реакционный процесс, когда металлические или сплавные мишени распылялись в присутствии кислородной реакционной компоненты рабочего газа с целью формирования требуемого оксида на подложке. В последние десятилетия достижения в области металлургии обеспечили возможность изготовления

керамических предоксидированных мишеней ТСО-материалов. Распыляемые в плазме инертного газа, например, аргона, они служат источником как металлических, так и кислородной компонент осаждаемого покрытия.

При осаждении ТСО-покрытий распылением предоксидированных керамических мишеней, однако, на практике наблюдается недонасыщенность получаемого субстехиометрического покрытия кислородом. Потери кислорода в разрядном промежутке происходят, прежде всего, из-за ионизации части распыленных атомов в плазме и их ухода обратно на мишень; оттока части атомов, объединившихся в летучую двухатомную молекулу, через насосную откачку камеры; и не стопроцентного сечения столкновения атомов кислорода с атомами металлических компонент мишени, в результате чего не весь распыленный с мишени кислород участвует в формировании оксидированного покрытия. Субстехиометрическое состояние осажденного покрытия приводит, в свою очередь, к заниженным значениям светопропускания для данной толщины тонкопленочного слоя, а также, в ряде случаев, его неудовлетворительной адгезии к подложке из-за большого количества некомпенсированных внутренних напряжений, вызванных дефектами нарушения кристаллической решетки покрытия. По этой причине, при осаждении ТСО-покрытий распылением керамических мишеней, в распылительную камеру зачастую донапускается небольшой поток O_2 с целью создания избыточности атомов кислорода в камере и донасыщения ими формирующихся слоев до стехиометрических состояний за счет формирования статистически большего кол-ва оксидов распыленных атомов металлов в разрядном промежутке, а также хемосорбции газа непосредственно в осаждаемое покрытие [2].

Данный эффект, однако, крайне скудно изучен в современной литературе. Донапуск кислорода в распылительную камеру зачастую осуществляется выставлением заведомо избыточных эмпирически подобранных значений, гарантирующих достаточность присутствия атомов кислорода в количествах, необходимых для стехиометрического насыщения осаждаемого покрытия. Также отсутствуют данные о связи между величиной потока газонапуска O_2 и результирующими качествами покрытия, такими как его спектрофотометрические и адгезионные свойства.

Целью данной работы было изучение зависимости оптических, электропроводящих и адгезионных свойств покрытия оксида титана, получаемого физическим осаждением при распылении предоксидированной керамической TiO_x мишени в плазме магнетронного разряда.

Эксперименты проводились на промышленной установке ионно-плазменного осаждения тонкопленочных покрытий на подложки сверхбольших площадей Von Ardenne GC330H. В качестве подложек выступали пластины кварцевого стекла для микроскопии толщиной 0,5 мм. Распыляемой мишенью служил трубчатый оборотный катод “CLATO TiO_x” от компании GfE, с чистотой 2N6 = 99.86%, $1.92 < x < 1.95$, и размером микропор $< 5.5 \mu\text{m}$, изготовленный по методу электродугового напыления на бобышку из нержавеющей стали. Осаждение осуществлялось в смешанной атмосфере рабочих газов, распылительной составляющей которой выступал аргон напускавшийся постоянным потоком 1200 sccm, а реакционной – кислород, при этом величина газонапуска для него варьировалось между образцами от 0 до 800 sccm с равным шагом. Напряжение горения разряда поддерживалось одинаковым для всех экспериментов и составляло 75 кВт. Толщина осажденного покрытия во всех экспериментах составляла 80 нм и контролировалась с помощью пьезоэлектрического датчика-спутника через время экспозиции подложки.

Для оценки стехиометрии полученных покрытий осуществлялся РФЭС анализ образцов. UV/VIS/IR-спектрофотометрия в диапазоне 250-2500 нм использовалась для изучения оптических качеств покрытий. По мере увеличения потока газонапуска O₂ наблюдалось соответствующее увеличение светопрозрачности покрытия T_{vis} со скачкообразным ростом при переходе состава покрытия в стехиометрическое состояние и последующим выходом на насыщение (Рис. 1-А).

Аналогичное поведение наблюдалось и для адгезионных качеств покрытия, оценивавшихся по тесту стандарта “Sheen” (DIN 52 347). Количество циклов истирания, которые покрытие выдерживало до образования очагов локальной деляминации увеличивалось по мере увеличения потока газонапуска O₂ со скачком при переходе покрытия в стехиометрическое состояние и дальнейшим выходом на плато (Рис. 1-Б).

В свою очередь, электросопротивление покрытия, измерявшееся посредством бесконтактной стратометрии, последовательно увеличивается с увеличением газонапуска O₂ без столь характерных особенностей, хотя также демонстрирует снижение динамики увеличения с ростом потока кислорода по мере выхода на стехиометрическое насыщение (Рис. 1-В).

Следует отметить, что контролировавшиеся параметры разряда- U, I, частота на генераторе, а также интенсивности характеристических линий

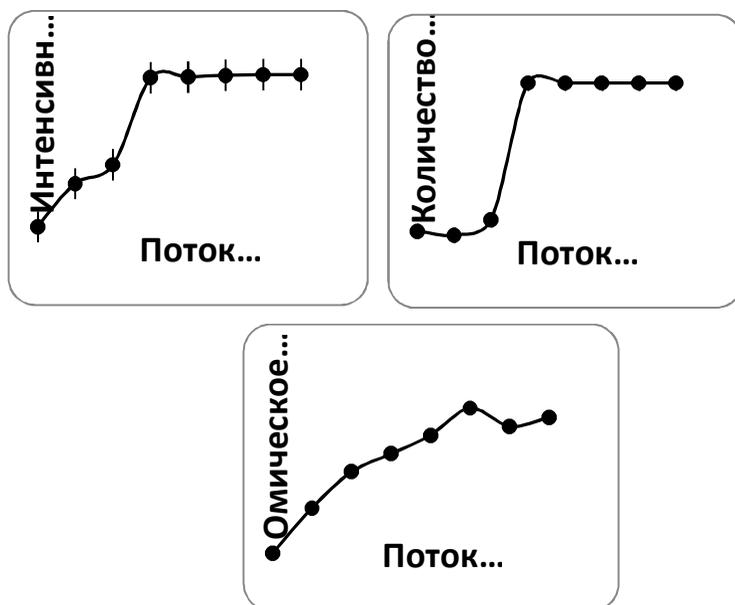


Рис.1: Зависимость от величины газонапуска O_2 для А - интегрального светопропускания; Б – адгезионной устойчивости и В - электросопротивления поверхности покрытия.

излучения плазмы – не демонстрировали сколь-нибудь заметного характерного изменения при выходе на режим работы по потоку газонапуска кислорода, обеспечивавшего стехиометрическое состояние осаждаемого покрытия. По этой причине можно сделать вывод, что наиболее надежным методом контроля химического состояния ТСО-покрытий при их осаждении распылением керамических мишеней в присутствии донапускного потока кислорода может служить единовременный контроль по толщине покрытия при помощи датчика-спутника совместно с in-situ контролем спектра пропускания покрытия.

Литература:

- [1] С. Guillen, J. Herrero, TCO/metal/TCO structures for energy and flexible electronics – Thin Solid Films, 2011, 520 (1), pp 1–17
- [2] P.-A. Cormier et.al, Titanium oxide thin film growth by magnetron sputtering: Total energy flux and its relationship with the phase constitution – Surf. and Coat. Technol., 2014, 254, pp 291-297

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ

В работе исследовался импульсный разряд в жидкости при атмосферном давлении. Разряды такого типа могут существенно модифицировать поверхности электродов, меняя как морфологию поверхности, так и ее прочностные характеристики. Охлаждение обрабатываемого образца потоком жидкости, используемой в разряде, не позволяет ей нагреваться до температур, близких к плавлению, при этом мощность, вкладываемая в разряд, составляет несколько кВт, а обрабатываемая поверхность имеет площадь несколько см².

На рисунке 1 изображена принципиальная схема установки. В ней сквозь трубчатый анод 2 подается вода из резервуара 1 так, чтобы разрядный промежуток протяженностью 0,5-1 см она проходила в капельном режиме с частотой падения капель в несколько Гц. На анод с помощью блока БП-100 подается напряжение до 7 кВ. Когда капля воды при падении перемыкает разрядный промежуток, происходит пробой, после окончания которого за время, пока промежуток не перемкнет следующая капля, происходит повторная зарядка конденсатора 5 емкостью 0,5мкФ при 20кВ.

Поскольку при работе в цепи разряда возникают наводки, препятствующие измерению параметров разряда, была предпринята попытка спектроскопического измерения плазмы разряда. Для этого был использован оптический спектрометр AvaSpec 2048x14. Типичный спектр для медного катода и анода приведен на рисунке 2. Из спектра видно, что доминирующими элементами в разряде является водород и кислород. Учитывая относительную интенсивность линий согласно базе данных NIST, в меньшем количестве присутствует азот. В спектре была зафиксирована медь в атомарном и ионизованном состоянии, что вероятно связано с эрозией электродов.

В работе были измерены оптические спектры для катодов из различных материалов (графит, алюминий, титан, медь) и для двух материалов трубчатого анода (медь и нержавеющая сталь). В случае медного анода, медные включения были зарегистрированы на поверхности образцов катодов с помощью EDS анализа в сканирующем электронном микроскопе.

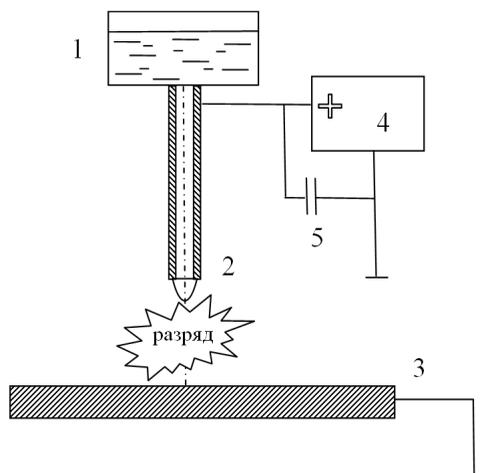


Рисунок 1. Схема установки: 1-резервуар с водой, 2- трубчатый электрод (анод), 3- обрабатываемый образец (катод), 4 -блок питания БП-100, 5- конденсатор

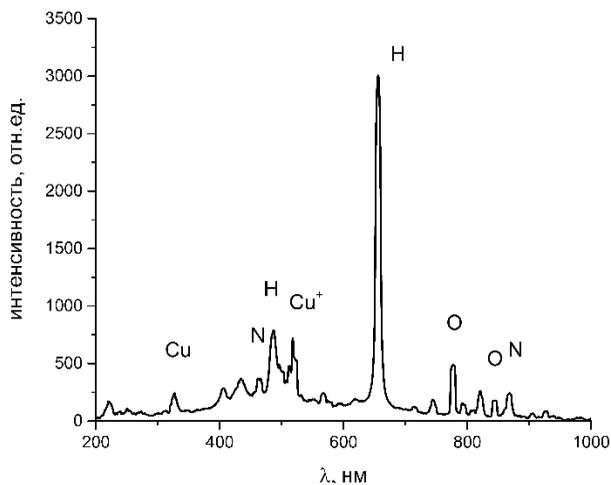


Рисунок 2. Оптический спектр разряда с медными катодом и анодом

БУДАЕВ В.П.^{1,2,3}, ФЕДОРОВИЧ С.Д.¹, МАРТЫНЕНКО Ю.В.²,
ЛУКАШЕВСКИЙ М.В.¹, ГУБКИН М.К.¹, КАРПОВ А.В.², ЛАЗУКИН
А.В.¹, ШЕСТАКОВ Е.А.², СЕРГЕЕВ Н.С.¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

²НИЦ Курчатовский институт, Москва

³ИКИ РАН, Москва

ИСПЫТАНИЯ ВОЛЬФРАМА СТАЦИОНАРНЫМИ НАГРУЗКАМИ В ПЛАЗМЕННОЙ УСТАНОВКЕ НИУ «МЭИ»

Плазменная установка [1], сооруженная в НИУ «МЭИ» в 2017 г., Рис.1., предназначена для плазменных испытаний тугоплавких металлов и материалов в обеспечение отечественной программы создания термоядерного реактора (ТИН и ДЕМО) и международного термоядерного реактора ИТЭР.

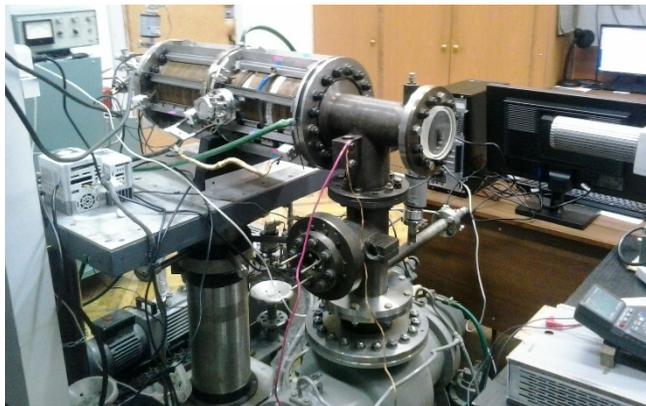


Рис. 1. Плазменная установка НИУ «МЭИ».

Установка представляет собой линейную систему с мультикасповой схемой магнитного удержания плазмы. Параметры плазменной установки:
продольное магнитное поле на оси - до 0,1 кГс ;
внутренний диаметр разрядной камеры - 0,16 м;
длина разрядной камеры - 0,72 м, камера снабжена водным контуром охлаждения, что обеспечивает стационарный режим разряда;
длительность плазменного разряда - до 100 мин и более;
ток плазменного разряда – до 30 А;
плотность плазмы – до $3 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$;

электронная температура - до 4 эВ с фракцией горячих электронов до 30 эВ;

Ионный поток из плазмы на металлический тестовый образец – до $3 \times 10^{21} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Мощность плазменно-тепловой нагрузки на испытываемые образцы-мишени - более 1 МВт/м^2 , планируются эксперименты с нагрузкой до 5 МВт/м^2 .

Рабочий газ - гелий, аргон, дейтерий.

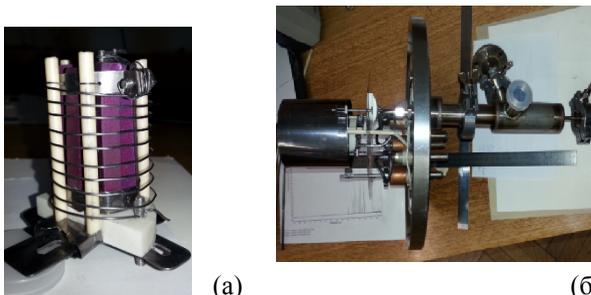


Рис. 2. Катодный узел : (а) катод, (б) общий вид - танталовый экран, фланец, токопроводы, система газонапуска в зону катода

Была разработана новая конструкция катода, которая обеспечивает высокую эмиссию тока до 30 А и надежную стационарную работу для обеспечения высоких параметров разряда. Катод, рис. 2а, изготовлен из 6 брусков гексаборида лантана, смонтированных в цилиндрической геометрии, нагреваемый радиационным способом до 1700° С от нагревателя из танталовой проволоки. Экран из тантала рис. 2б. для отражения тепла обеспечивает дополнительные возможности подъема рабочей температуры катода.

Зарегистрированный с помощью спектрометрической диагностики спектр излучения гелиевой плазмы, рис. 3, показал, что основной вклад дают линии гелия, отсутствуют пики со значительной интенсивностью, которые свидетельствовали бы о наличии примесных ионов, в том числе кислорода, в плазме, что указывает на удовлетворительное состояние поверхности камеры и отсутствие течей.

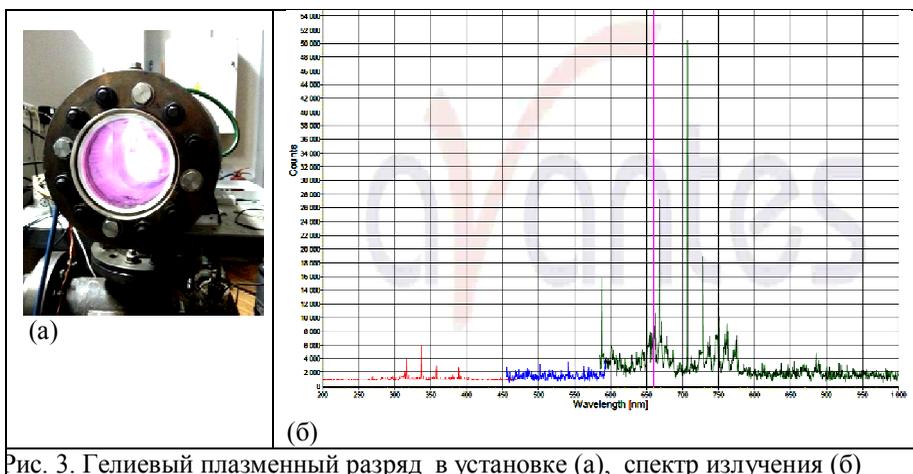


Рис. 3. Гелиевый плазменный разряд в установке (а), спектр излучения (б)

На этой установке планируются испытания материалов высокоэнергичными потоками стационарной горячей плазмы. Такие исследования позволят продвинуться в понимании физики взаимодействия горячей плазмы с материалами, такими как вольфрам, молибден, сталь, материалы стенки и дивертора ИТЭР и др. Актуальность работ на этой установке связана с наблюдением повышенной эрозии вольфрама в современных термоядерных установках, что необходимо исследовать в натуральных экспериментах для установления физических механизмов эрозии [2-4].

Планируется комбинированное испытание макетов водоохлаждаемых модулей дивертора ИТЭР из вольфрама в комбинированной схеме плазменно-пучковых испытаний – (1) термоциклические испытания в установке с электронным пучком с нагрузкой до 40 МВт/м^2 , и затем (2) испытание в плазменной установке стационарными плазменными нагрузками $0,5\text{-}1 \text{ МВт/м}^2$ и более. Такие комбинированные испытания будут проведены впервые. Это будет моделировать переменную нагрузку на диверторные пластины при переходных процессах в ИТЭР.

Планируется провести цикл экспериментальных работ, направленных на создание технологии получения высокопористой структуры поверхности тугоплавких металлов, таких как вольфрам, молибден и другие, в том числе с поверхностной структурой типа «пух» с уникальной структурой с размером элементов структуры до 50 нм , что в настоящее время недостижимо при промышленном производстве спецдеталей. Поверхность со структурой пуха обладает большой удельной площадью, что имеет

большое значение для адсорбции газов и катализа. На такой поверхности лучше развиваются дуги, а продуктами эрозии могут быть волоски пуха. Такая наноразмерная пыль, образованная в термоядерном реакторе, рассматривается как негативный фактор, вызывающий радиационное охлаждение плазмы.

В настоящее время об образовании пуха на поверхности вольфрама известно следующее [5]:

— для образования пуха необходимо облучение в плазме ионами He^+ с энергией более 20—30 эВ при температуре вольфрама в интервале 1000—2000 К. Температурный интервал, в котором формируется образование пуха: при $T < 1000\text{К}$ концентрация адатомов столь высока, и расстояние между ними столь мало, что скорее образуются их кластеры, а их перенос к вершине волоска невозможен; при $T > 2000\text{К}$ невозможно образование кластеров из адатомов вследствие их термического распада.

— толщина слоя пуха растёт со временем пропорционально $t^{1/2}$ и при плотности ионного тока 10^{18} — 10^{19} $\text{He}/(\text{см}^2 \text{ с})$, за время $t \sim 10^4$ с образуется слой пуха ~ 5 мкм. Поскольку структура типа «пух» образуется при высокой температуре, то на установке в плазменных экспериментах предусмотрен подогрев мишени.

Согласно проведенным теоретическим оценкам [5], для установки НИУ «МЭИ» при облучении гелиевой плазмой рекомендуется температура вольфрама от 1385К до 1680К.

Работа поддержана грантом РФФИ № 17-19-01469, работы по созданию АСНИ на установке выполнены при поддержке Мегагранта РФ № 14.Z50.31.0042.

1. Будаев В.П. и др. ВАНТ, сер. Термоядерный синтез. 2017, 40,3, 23.
2. Будаев В.П. ВАНТ, сер. Термоядерный синтез. 2015, 38, 4, 5.
3. Budaev V.P. *Physics Letters A*. 2017, V 381, 43, 3706-3713
4. Будаев В.П. Письма в ЖЭТФ. 2017, Т. 105. № 5, 284–290.
5. Мартыненко Ю.В., Нагель М.Ю. Физика плазмы. 2012, 38, № 12, 1082—1086.

В.П. БУДАЕВ^{1,2,3}

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

²НИЦ «Курчатовский институт»,

³ИКИ РАН, Москва

ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ СО СТОХАСТИЧЕСКОЙ НАНО- И МИКРОСТРУКТУРОЙ ПОВЕРХНОСТИ: УПРАВЛЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫМИ ПОТОКАМИ В ПЛАЗМЕ И АЭРОДИНАМИКЕ

В последние годы при воздействии на материал экстремальных плазменно-тепловых нагрузок обнаружены универсальные эффекты стохастической кластеризации поверхности с иерархической гранулярностью и статистическим самоподобием – фрактальностью [1-4]. Такая структура поверхности твердого тела наблюдается в лабораторных плазменных термоядерных установках при плазменно-тепловых испытаниях материалов мощными пучками и проникающим излучением, когда в процесс одновременно вовлечены множественные механизмы эрозии и переосаждения эродированного материала, плавления, движения и отвердения поверхностных слоев на масштабах от десятков нанометров до сотен микрометров. Свойства уникальной масштабной инвариантности (автомодельности) структуры таких высокопористых материалов (см. примеры на рис.1) [1-4] определяют связность образца и формирование перколяционного кластера дефектов и диссипативных структур в широком диапазоне масштабов, начиная от субмикронных масштабов, обеспечивая уникальные физико-химические свойства. Тугоплавкие металлы с высокоразвитой и высокопористой наноструктурной поверхностью востребованы для эксплуатации при экстремальных тепловых и плазменно-пучковых нагрузках [1-4], в том числе в термоядерных реакторах, для покрытия обтекаемых поверхностей летательных аппаратов с целью уменьшения аэродинамического сопротивления при сверхзвуковых и гиперзвуковых скоростях, в биомедицинских применениях.

Пористый вольфрам для управления приповерхностным плазменным слоем и турбулентностью пристеночной плазмы в токамаке. Турбулентность периферийной плазмы вблизи последней замкнутой магнитной поверхности (ПЗМП) определяет потери и ширину слоя продольного выноса энергии на диверторные пластины (несколько ионных радиусов). В ИТЭРе такая ширина - всего несколько миллиметров, ожидаются экстремально высокие нагрузки в этой зоне, приводящие к плавлению и разрушению поверхности пластин. Для обеспечения

стационарного режима тероядерного реактора требуется разработать эффективные подходы к управлению опасным процессом с целью увеличения этого радиального масштаба.

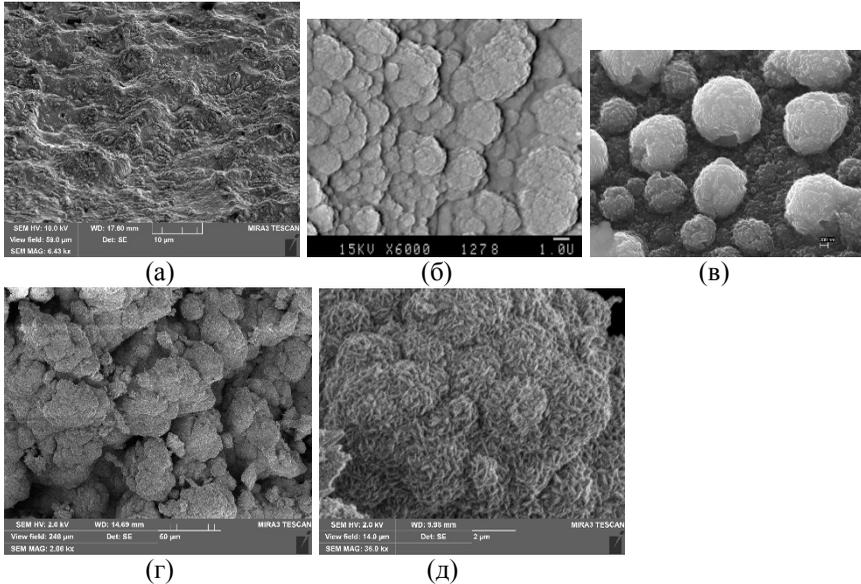


Рис.1. Стохастическая поверхностная микроструктура с иерархической гранулярностью после обработки высокотемпературной плазмой: (а) вольфрам в токамаке Т-10, (б) вольфрам в КСПУ-Т, (в) бериллий в КСПУ-Ве, (г, д) литиевые материалы в токамаке Т-10

В данной работе *предлагается управлять турбулентностью [5] вблизи ПЗМП системой электродов из пористого вольфрама путем модуляции неустойчивостей плазмы продольным электрическим полем*. В такой схеме формируется возбуждение ионно-звуковой неустойчивости - подход на основе теории В.П. Силина [6,7], в которой рассматривается длительное существование ИЗТ в плазме при действии продольного электрического поля; имеется предсказание роста температуры плазмы T с электрическим полем E , $T \sim E^2$. Схема эксперимента на токамаке Т-11М приведена на рис. 2 : радиальная ширина электродов 15 мм, полоидальная – 10 см; напряжением между электродами в диапазоне от -200В до +200 В постоянное U_{dc} или с ВЧ модуляцией $U_{вч}$ на частоте ионно-циклотронного резонанса для возбуждения флуктуаций вблизи ПЗМП. В такой схеме ожидается

изменение характеристик турбулентности и поперечного переноса плазмы в СОЛ локально вблизи ПЗМП. Отличие наших предложения от предыдущих схем: подача напряжения вдоль магнитного поля, отсутствие радиального тока; ожидается ВЧ модуляция турбулентности и локальное изменение радиального переноса плазмы вблизи ПЗМП; преимущества пористого вольфрама на управляющих электродах -увеличенная эмиссионная способность пористой поверхности и повышенная эрозионная стойкость; ожидается самоподдерживающийся процесс сохранения пористости вольфрама в условиях длительной эксплуатации в токамаке – реакторе [1-4].

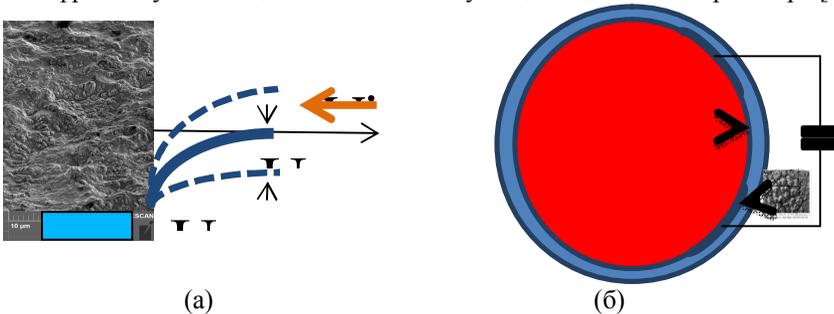


Рис. 2. (а) ВЧ модуляция потенциала плазмы в СОЛ с использованием стохастически структурированной поверхности вольфрамовых электродов. (б) Схема электродов для управления плазмой в зоне ПЗМП в токамаке с круглым сечением

Управление турбулентным погранслоем аэродинамических потоков.

Для снижения сопротивления и тепловой нагрузки на обтекаемые поверхности при сверхзвуковых и гиперзвуковых скоростях требуется покрытие летательных аппаратов материалами с высокопористой структурой. В аэродинамической трубе [8,9] проведены первые эксперименты с фрактальными поверхностями, полученными плазменной обработкой в КСПУ-Т, имеющими негауссову статистику высот от ~ 500 нанометров до ~ 200 микрометров. Преимущество такой поверхности – совпадение спектральных и статистических характеристик стохастического рельефа поверхности с характеристиками турбулентности потока, рис.3. Наблюдалось значительное затухание низкочастотного спектрального диапазона и изменение силы сопротивления в экспериментах с фрактальной поверхностной пластиной [8] как границей турбулентного потока. В широком диапазоне чисел Рейнольдса Re наблюдалось уменьшение аэродинамического сопротивления над фрактальной пластиной по сравнению с абразивной поверхностью (с гауссовой статистикой высот) той

же шероховатости. Для фрактальной поверхности индекс скейлинга ν коэффициента сопротивления $c_x \sim Re^{-\nu}$ близок к ν для гладкой пластины (стекла) [8]. Это демонстрирует потенциал фрактальной поверхности для уменьшения аэродинамического сопротивления при сверхзвуковых и гиперзвуковых скоростях.

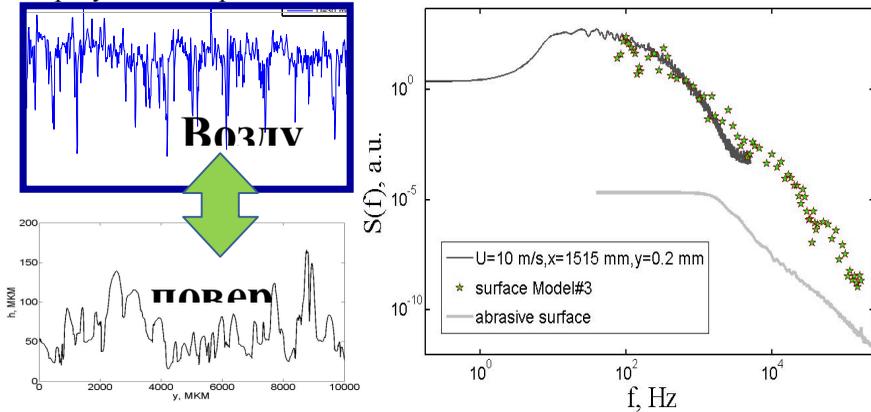


Рис. 3. Эксперимент в аэродинамической трубе с обтеканием фрактальной стохастической поверхности; совпадение спектров ТПС и фрактальной поверхности
Работа была поддержана грантом РФФ № 16-19-10531.

- [1] Budaev V.P. Physics Letters A., 381, 43, 3706-3713 (2017)
- [2] Будаев В.П. Письма в [ЖЭТФ](#), 105, [№ 5](#), 284-290 (2017)
- [3] Будаев В.П. ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез, 38 (4), 5-33 (2015)
- [4] Будаев В.П. и др. Письма в [ЖЭТФ](#), 95, [№ 1-2](#), 84-90 (2012)
- [5] Будаев В.П. и др. [Успехи физических наук](#), 181, [№ 9](#), 905-952 (2011)
- [6] Силин В.П., Физика Плазмы, 37, 739 (2011)
- [7] Silin V.P. et al, Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 43, 4, 132 (2016)
- [8] Брутян М.А., Будаев В.П., Волков А.В. и др., [Ученые записки ЦАГИ](#), XLIV, [№ 4](#), 15-30 (2013)
- [9] Budaev V P, et. al. J. Plasma Physics, 81, 06, 395810602 (2015)

П.А. БОРИСОВСКИЙ, С.В. ГАВРИЛОВ, М.Н. МАХМУДОВ, Е.Н. МООС, Г.В. КИСЕЛЕВ, А.И. КУДЮКИН, В.А. СТЕПАНОВ
Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина

ЭРОЗИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ ПЛАЗМОЙ РАЗРЯДА

Взаимодействие электродов с плазмой, приводят к необратимым изменениям состояния их поверхности [1]. При изучении эволюции состояния катодов на основе оксида алюминия с добавками атомов магния гелий-неоновых лазеров (система Al - Mg) [2], исследованиях поверхности электродов магнитоуправляемых контактов (система Fe - Ni) [3], электродов вакуумных дуговых прерывателей (система Cu - Cr) [4] остаются невыясненными причины их эрозии. Перечисленные выше вопросы входят в круг известных проблем, связанных с взаимодействием ионно-плазменных потоков с поверхностью.

В работе представлены результаты исследования эволюции поверхности катодов в газовом разряде He-Ne лазеров и изменений морфологии и состава двухкомпонентных электродов при развитии вакуумного дугового разряда.

Изучение этих процессов требует применения комплекса методов микронзондового анализа: рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, электронного сканирующего микронзондового анализа (в послойного и растровом режиме), а также атомно-силовой микроскопии.

При послойном анализе поверхности катода He-Ne лазера, легированного примесями магния и железа, обнаружен выраженный поверхностный слой углерода, аналитический сигнал которого убывает до фонового значения по глубине (Рис.1).

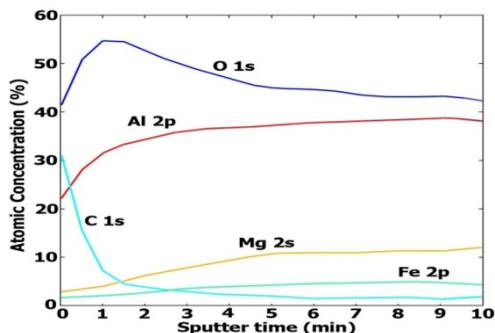


Рис.1 Распределение атомов по глубине.

При этом наблюдается выраженный рост по глубине концентрации алюминия (до стабильной величины) и кислорода. Последний спадает, выявляя слой повышенного окисления матрицы приповерхностной зоны. Одновременно (согласованно) с линией Al 2p изменяется содержание Mg 2s, что выявляет его сегрегацию к поверхности эмиссионного слоя, медленный рост аналитического сигнала Mg по сравнению с алюминием подтверждает результат работы [2]. В растровом режиме видно декорирование плазмой поликристаллической структуры катода (со средними размерами микрокристаллитов порядка 30 мкм).

В работе обнаружено образование газового пузыря с трещинами оболочки - локальное накопление Ne - при длительной экспозиции в разряде. Обычно подобные эффекты «замуровывания газа» проявляются в при энергии ионных пучков десятки и сотни кэВ. Внешний вид и атомный элементный состав этого пузыря представлен на рис. 2. Размеры купола порядка 40 мкм. В нем 2.11 ат.% Ne, а основного вещества Al – 30.52 ат.%

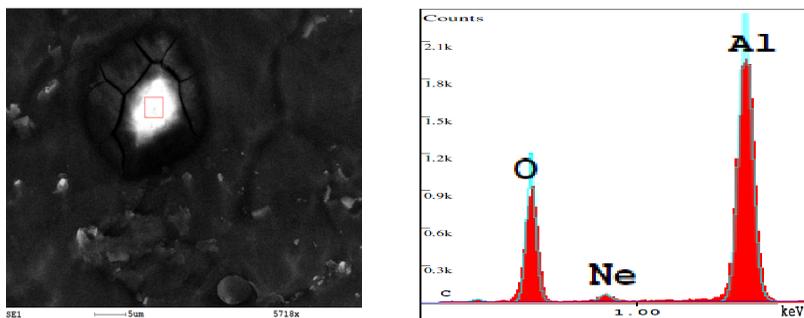


Рис. 2. Эффект накопления газа в катоде после 100 тысяч часов экспозиции в плазме (отмечена зона анализа) и состав в этой зоне.

Мощность излучения активных элементов при образовании газового пузыря уменьшается с 0,5 до 0,01 - 0,13 мВт.

Представлялось важным сопоставить также поведение катодов двойной системы Cu – Cr в условиях вакуумного дугового разряда (в лазерах - это система Al-Mg) и выяснить существование общих черт эволюции состава и морфологии таких систем при повышенных энергиях ионно-плазменных потоков в условиях вакуума и предельных разрушающих потоков.

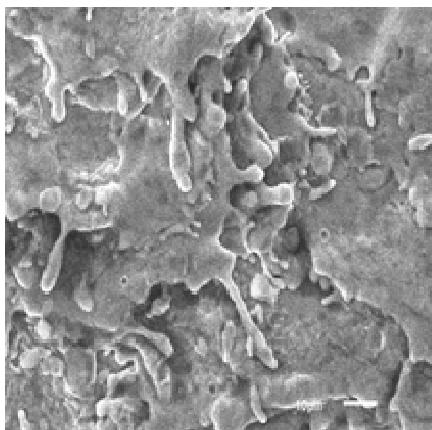


Рис 3 .Эрозия поверхности.

Моделирование воздействия плазмы дугового разряда на Cu-Cr электроды обнаруживает особенности эрозии их поверхности; найдено превышение концентрации атомов меди (основного вещества сплава) и кислорода на поверхности над их объемными значениями: снижается от 92,4 ат.% к 78,2ат.%. В зоне плавления концентрация кислорода уменьшается более чем в два раз с 4,9 ат. % до 2.2 ат. %.

В работе обсуждаются особенности наблюдаемых изменений в условиях отсутствия равновесия.

Литература

1. Беграмбеков Л.Б. Модификация поверхности твердых тел при ионном и плазменном воздействии. Учебное пособие, - М.: МИФИ, 2001.
2. Ерошкин М.В., Моос Е.Н., Киселев Г.В. //Изв. РАН. сер. физ. 2014, №78. С.686.
3. Арушанов К. А., Зельцер И. А., Карабанов С. М. и др. //Изв. РАН. сер. физ. 2012, №76. С. 750.
4. Kudyukin A.I., Moos E.N., Rott A.T. et al. In Proceeding 11-th International Vacuum Electron Sources Conference, Korea, Seoul, 2016. P.41.

С.А. РЯБЦЕВ, Ю.М. ГАСПАРЯН, В.С. ЕФИМОВ, З.Р. АРУТЮНЯН,
А.В. КАЗИЕВ, М.М. ХАРЬКОВ, А.А. ПИСАРЕВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

НАКОПЛЕНИЕ ГЕЛИЯ В ВОЛЬФРАМЕ ПРИ ИОННОМ И ПЛАЗМЕННОМ ОБЛУЧЕНИИ

Внедрение гелия (He), продукта D–T реакции, в обращенные к плазме материалы термоядерных реакторов может существенным образом влиять на структуру их поверхностного слоя и на накопление изотопов водорода в этих материалах.

Гелий практически не растворим в металлах, теплота растворения He в вольфраме (W) составляет по разным данным 5–8 эВ [1, 2]. В объеме металла атомы He легко диффундируют по междоузлиям, но сильно связываются с дефектами кристаллической решетки. Эксперименты показывают, что значительная часть He может удерживаться в W даже при температурах выше 2000 К. С другой стороны, в недавних экспериментах с облучением He плазмой [3] было показано, что значительная часть He может выходить из W при очень малых температурах. Таким образом, гелий демонстрирует очень разное поведение в зависимости от параметров облучения, и многие особенности взаимодействия гелия с вольфрамом на данный момент не имеют объяснения. Кроме того, можно заключить, что для получения наиболее полной картины десорбции и накопления He в W, необходимо обеспечить достаточную точность измерений в широком диапазоне температур.

В данной работе исследования проводились методом термодесорбционной спектроскопии (ТДС) в широком диапазоне параметров облучения. Внедрение He в материал проводилось посредством ионного и плазменного облучения на двух различных установках. В качестве образцов использовалась W фольга толщиной 25 мкм. Часть образцов была предварительно отожжена при температуре 2000 К в течение 30 мин, однако исследовались также и неотожженные образцы. В первой экспериментальной серии образцы W облучались на установке МЕДИОН (НИЯУ МИФИ, Москва) масс-сепарированным пучком ионов He⁺ с энергией 3 кэВ до доз 10¹⁹–10²² He/м² при комнатной температуре. Во второй серии проводилось облучение неотожженных образцов W плазмой He с энергией 200 эВ при температурах 900 К и 1250 К на установке с ВЧ-плазменным разрядом. Облученные на обеих установках образцы переносились в установку ТДС-стенд, где проводился ТДС-анализ. Как было сказано выше, He может удерживаться в W даже при очень высоких температурах, поэтому

перед началом экспериментальной кампании система нагрева образцов ТДС-стенда была модифицирована, что позволило провести уникальные измерения с линейным нагревом образцов вплоть до 2500 К и получить на спектрах высокотемпературные пики десорбции He из W.

Внедрение He в W при малых дозах облучения исследовалось в экспериментах с облучением ионным пучком. Полученные спектры для предварительно отожженных образцов, облученных до различных доз в диапазоне 10^{19} – 10^{21} He/ m^2 представлены на рис. 1 для образца, предварительно отожженного при 2000 К в течение 30 мин. В спектрах можно выделить три основные температурные зоны выхода He: I – низкотемпературный выход (до 1300 К), II – узкий пик, наблюдаемый на спектрах для неотожженных образцов при температурах в диапазоне 1300–1500 К, III – высокотемпературная часть ($T > 1600$ К), присутствующая, как правило, на спектрах для отожженного W.

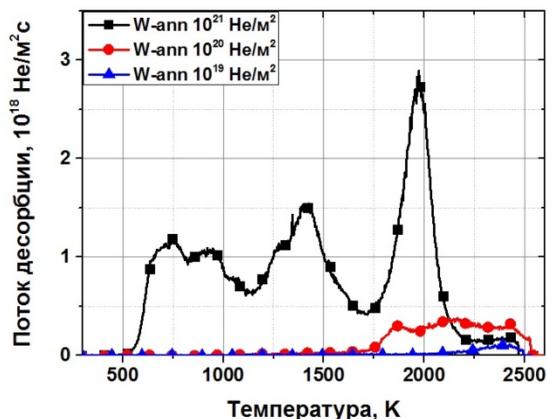


Рис. 1. ТДС-спектры выхода He из образцов W, отожженных при температуре 2000 К в течение 30 минут и облученных ионами с энергией 3 кэВ до доз 10^{19} – 10^{21} D/ m^2 .

По рис. 1 можно проследить некоторые характерные особенности трансформации спектров десорбции He из W при малых дозах облучения. В частности, видно, что при малых дозах облучения, He начинает покидать образец только при температурах свыше 1300 К, что соответствует большой энергии связи с дефектами. При увеличении дозы облучения на спектрах появляются низкотемпературные пики и десорбция начинается уже при температуре 500 К. Это свидетельствует о возникновении слабосвязанных состояний для гелия в поверхностном слое.

Облучение плазмой проводилось при существенно больших температурах, 900–1250 К. Несмотря на это, на спектрах наблюдаются те же низкотемпературные пики, что и в случае ионного облучения при комнатной температуре. Эта особенность поведения гелия в вольфраме, которая не наблюдалась в экспериментах с водородом, свидетельствует о перестроении гелия или самой структуры вольфрама при охлаждении.

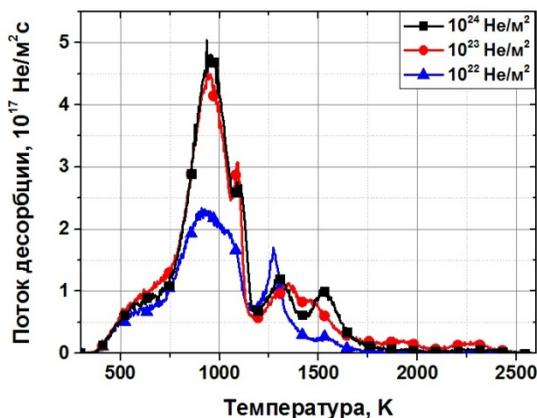


Рис. 2. ТДС-спектры выхода He из образцов W, облученных плазмой с энергией 200 эВ до доз 10^{22} – 10^{24} D/m².

Интегральное количество захваченного гелия, согласно данным термодесорбции, соответствует практически 100% захвату внедренных частиц при дозах облучения 10^{19} – 10^{20} He/m². При дальнейшем увеличении дозы наблюдается тенденция к насыщению (см. рис. 3).

Интегральное накопление гелия при плазменном облучении меньше, чем при ионном, что объясняется меньшей энергией внедряемых частиц. Кроме того, были использованы образцы без предварительного отжига, что дополнительно осложняло транспорт гелия в объем материала. Увеличение дозы облучения от 10^{22} до 10^{24} He/m² не привело к существенному увеличению накопления как при 900 К, так и при 1250 К, что свидетельствует об очень медленном распространении гелия вглубь образца. При дальнейшем увеличении дозы плазменного облучения при 1250 К происходит резкий скачок величины суммарного захвата. Это сопровождается появлением на поверхности, так называемого «вольфрамового пуха», что подтверждается данными электронной микроскопии и согласуется с наблюдениями в других работах [4, 5].

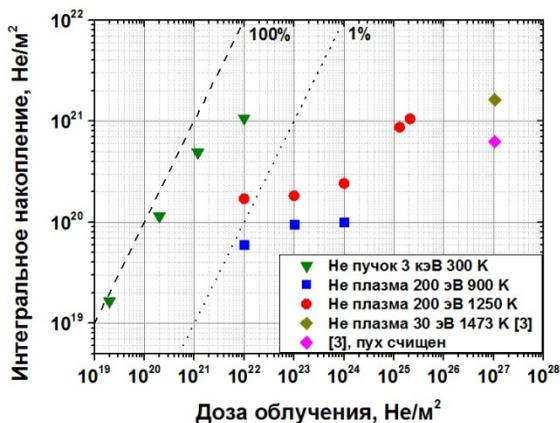


Рис. 3. Суммарное количество He, захваченного образцами W при ионном и плазменном облучении. Также приведены данные из работы [3] для образцов с «пухом», в одном случае «пучок» был счищен.

На рис. 3. приведены также данные из наших предыдущих экспериментов [3] при больших дозах облучения. В этих экспериментах анализировались, в том числе, образцы после удаления «пуха» с поверхности. Можно видеть, что большая часть гелия находится не в «пухе», а в поверхностном слое. Из этого можно сделать вывод о том, что резкое увеличение концентрации гелия в вольфраме вызвано трансформацией структуры самого слоя, которая уже далее инициирует рост пуха.

[1] H. Ullmaier, Nuclear Fusion, 24 (1984).

[2] C.S. Becquart, C. Domain, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 255 (2007) 23–26.

[3] Yu. Gasparyan, V. Efimov, K. Bystrov, Nuclear Fusion, 56 (2016) 054002.

[4] K.B. Woller, D.G. Whyte, G.M. Wright, Journal of Nuclear Materials, 463 (2015) 289–293.

[5] R.P. Doerner et. al., Nuclear Materials and Energy, 12 (2017) 372–378.

ДИФФУЗИЯ ВОДОРОДА В ВОЛЬФРАМЕ В ПОЛЕ ДЕФЕКТОВ ПРИ НАЛИЧИИ ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУРЫ

Корректное предсказание количества трития, накопленного в тайлах токамака за время его работы, является одним из принципиальных вопросов, успешное решение которых необходимо для реализации проекта термоядерного реактора ИТЭР. По этой причине исследование динамики водорода в пластинах, выстилающих вакуумную камеру установки, представляет значительный интерес.

Тайлы токамака, как правило, имеют достаточно большую толщину, так что перепад температур, образующийся между внешней, контактирующей с плазмой, и внутренней, охлаждаемой сторонами приемной пластины при её облучении может оказываться одного порядка с температурой поверхности образца. В этих условиях диффузия захваченного водорода в тайле происходит в существенно неоднородном поле температур, что делает изучение влияния этого эффекта на динамику газа в мишени актуальной задачей.

Для изучения диффузии водорода в вольфрамовом образце (который считается плоским и содержащим дефекты лишь одного типа с фиксированной энергией связи) в работе использована следующая модель:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial y}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial y}{\partial t} = f \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \frac{u}{U} (Y - y) - f \exp\left(-\frac{Q+E}{kT}\right) y. \quad (2)$$

В этих уравнениях x – координата, отсчитываемая по нормали к поверхности образца от его внешней, облучаемой плазмой стороны, u , y – соответственно, концентрации растворенного и захваченного в ловушки водорода, $D = D_0 \exp(-Q/kT)$ – коэффициент диффузии водорода, D_0 – предэкспоненциальный фактор, Q – энергия активации диффузии, k – постоянная Больцмана, T – локальная температура образца, Y – предельная концентрация ловушек в образце, U – предельная концентрация междуузлий, где может быть находиться в растворенном состоянии водород, f – частота собственных колебаний атома водорода внутри образца, E – энергия связи водорода в дефекте, $Q+E$ – энергия активации выхода водорода из ловушки.

Для замыкания уравнений (1), (2) использованы следующие граничные условия для концентрации u на внешней ($x = 0$) и внутренней ($x = L$, где L – толщина образца) сторонах тайла. На облучаемой плазмой стороне пластины величина u фиксирована на некотором постоянном значении u_0 , определяемом балансом потока плазмы, приходящего на тайл, и рекомбинационным потоком газа, уходящего с поверхности образца (диффузионный поток атомов, идущий внутрь образца, обычно мал в условиях токамака и поэтому может быть опущен при определении u_0). На внутренней стороне вольфрамового тайла считается, что газовыделение водорода из мишени может происходить как медленно (за время, большее характерного времени диффузии водорода), так и достаточно быстро. Первый случай может реализовываться при контакте вольфрамовой пластины с охлаждаемым медным теплопроводом. При этом низкая проницаемость медной пластины для водорода может приводить к тому, что поток водорода с внутренней поверхности вольфрамового образца будет мал по сравнению с диффузионным потоком водорода внутри мишени, так что его можно приближенно положить равным нулю, или $\partial u / \partial x|_{x=L} = 0$. В случае быстрого газовыделения водорода на внутренней стороне вольфрамовой пластины, можно принять, что концентрация растворенного водорода пренебрежимо мала по сравнению с u_0 , и $u|_{x=L} \approx 0$.

В качестве начальных условий для профилей u и y предполагается, что вольфрамовый образец не содержит водорода в начальный момент времени.

В работе показано, что поскольку частота захвата/выхода водорода из ловушек значительно выше характерного времени диффузии трития, то система (1), (2) может быть представлена в виде эквивалентного ей эффективного уравнения диффузии, которое имеет вид

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial u}{\partial x} \right) \left\{ 1 + \frac{Y}{u + U \exp(-E/kT)} - \frac{uY}{[u + U \exp(-E/kT)]^2} \right\}^{-1}, \quad (3)$$

при этом выражение для концентрации захваченного в ловушки газа имеет хорошо известный вид

$$y(x, t) = \frac{uY}{u + U \exp(-E/kT)}. \quad (4)$$

При анализе уравнения (3) в работе получено, что в случае модельного линейного профиля температуры внутри образца и в предположении о быстром характере газовыделения водорода с внутренней стороны

вольфрамовой мишени решение уравнения (3) относительно стационарного профиля растворенного водорода может быть представлено как

$$u_{st}(x) = u_0 [g(L, a, b) - g(x, a, b)] / [g(L, a, b) - g(0, a, b)], \quad (5)$$

где $g(x, a, b) = \text{Ei}(p) - \exp(p)/p$ – универсальная функция приведенной энергии активации диффузии водорода $a = Q/kT$, а также разности температур между внешней (*ext*) и внутренними (*int*) стенками образца $b = 1 - T_{int}/T_{ext}$, при этом $p = a/(1 - bx)$.

В случае медленного газовыделения водорода из вольфрамового образца стационарный профиль концентрации $u(x)$ оказывается, очевидно, равным

$$u_{st}(x) = u_0. \quad (6)$$

Функции (4)-(6) определяют предельно достижимые профили растворенного и захваченного в ловушки водорода в вольфрамовом образце при наличии линейного профиля температуры внутри тайла.

Система уравнений (1), (2) использована для анализа применимости уравнения (3) при описании диффузии водорода в вольфраме. Пример расчетов в рамках двух моделей, а также с использованием уравнения диффузии в известном приближении Макнаба-Фостера представлены на рисунках 1 и 2 для концентрации подвижного и захваченного в дефекты водорода, соответственно. Для расчетов приняты следующие параметры: $T_{ext} = 1000$ К, $T_{int} = 400$ К, $D_0 = 4.1 \times 10^{-3}$ см²с⁻¹, $Q = 0.39$ эВ, $E = 1.1$ эВ, $U = 6.3057 \times 10^{22}$ см⁻³, $Y/U = 10^{-2}$, $u_0/U = 10^{-8}$, $f = 1.3 \times 10^{13}$ с⁻¹, $L = 1.0$ см. Как видно, результаты, полученные на основе строгой системы (1), (2) (“exact sys.”) хорошо согласуются с расчетами на основе уравнения (3) (effective diffusion equation - EDE) на всех расчетных временах вплоть до выхода на стационарное решение (“analytic solution”). Расчет в рамках приближения Макнаба-Фостера (McNabb-Foster effective diffusion equation - MFEDE) показал хорошее согласие с точной системой уравнений (1), (2) лишь в начальные моменты времени диффузии водорода.

Эффективное уравнение диффузии (3) также применено для изучения захвата водорода в ловушки. Возможно формирование различных типов распределения захваченного в ловушки водорода. При нулевых условиях на задней границе возможно, например, образование максимума концентрации вблизи холодной поверхности, расширяющегося во времени в холодную область или постепенное заполнение дефектов начиная с горячей области с профилем концентрации в виде ступеньки, продвигающейся от входной

поверхности к выходной. Пример развития профиля концентрации захваченного водорода представлен на рисунке 2.

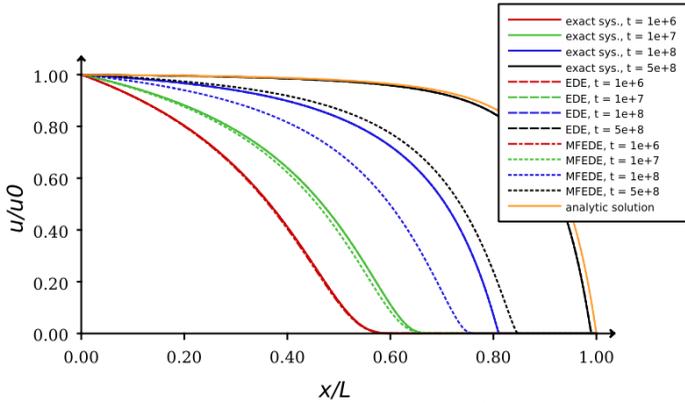


Рис. 1. Временная динамика растворенного водорода в вольфрамовом образце при нулевых условиях на обратной стороне. Показаны результаты расчета в рамках строгой системы (1), (2) (“exact sys.”), эффективного уравнения диффузии (3) (EDE) и уравнения диффузии с коэффициентом диффузии по Макнабу-Фостеру (MFEDE). Расчетное время t нормировано на характерное время диффузии $\tau_D = L^2/D_0$.

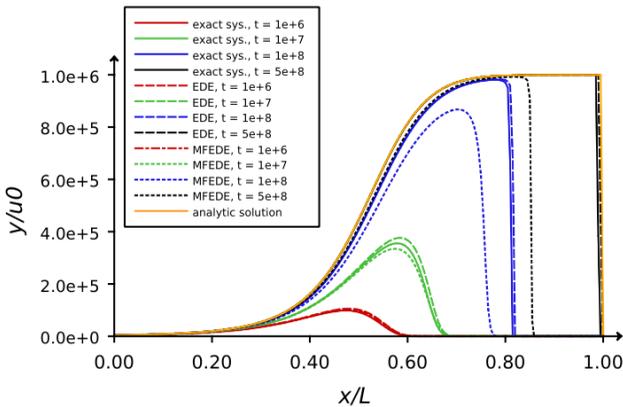


Рис. 2. Пример расчета динамики захваченного в ловушки водорода в вольфрамовом образце. Все параметры, как и на рисунке 1.

Таким образом, результаты расчета с использованием эффективного уравнения диффузии отлично согласуются с результатами расчетов по исходной системе уравнений, а использование эффективного коэффициента диффузии возможно только при малых временах.

V.I. SHYMANSKI¹, V.V. UGLOV¹, V.M. ASTASHYNSKI², H.W. ZHONG³, J. SHEN³, X.Y. LE³

¹*Belarusian State University, Minsk, Belarus*

²*A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of national academy of science of Belarus, Minsk*

³*School of Physics and Nuclear Engineering, Beihang University, Beijing, China*

TUNGSTEN SURFACE EROSION UNDER COMPRESSION PLASMA FLOW AND HIGH-INTENSE SHORT-PULSED ION BEAM IMPACTS

Nowadays tungsten is considering as a promising material for the first wall production in fusion reactors. So, a lot of strong demands are required for such materials, one of the main of them are surface erosion properties. The evaporation, ablation, cracks and craters formation of the surface should be excluded or minimized. The intensity of the mentioned processes depends on the thermophysical properties of the surface, its elastic and plastic parameters, and etc. In this regards, the previous modification of the tungsten surface can effectively influence on its physical properties and decrease the surface eruptions.

In the present work the ablation processes as well as cracks formation on the tungsten surface after the high-intense short-pulsed ion beams impact is discussed. The previous treatment of the samples by the compression plasma flows was made to modify of the surface.

The tungsten samples were plates with 10×10 mm and thickness of 2 mm. On the first step the samples were treated by compression plasma flows in magnetoplasma compressor of compact geometry. The plasma flows were formed in the residual nitrogen atmosphere. The treatment was made by three pulses with pulse duration of 100 μs. The absorbed energy density equaled to 25-30 J/cm². The treated samples were subjected to high-intense short-pulsed ions beams irradiation with pulse duration about 100 ns. The pulse number was up to 80. The absorbed energy density was varied in the range of 1 – 2 J/cm².

The surface erosion process after the combined treatment was investigated with weight lost estimation. The influence of the high-intense short-pulsed ion beams without previous compression plasma flows treatment revealed the decrease in the samples weight in 100-200 μg after the first 10 pulses. This change in mass can be contributed to the surface cleaning and different impurities deleting. After all other pulses the weight did not change. It indicates the absence of sufficient surface erosion after the impact. The investigation of the surface morphology with optical microscope revealed the signs of melting after 40 pulses. The melting process is started in the surface roughness.

The previous compression plasma flows impact allows to melt a deep layer with a thickness of several μm . The surface is characterized by big roughness arisen after moving of the melt during plasma influence. At the end of plasma pulse a solidification process with a high cooling rate takes place. It results in a lot of cracks formation due to mechanical stress distribution. The boundaries of the cracks are the places of melting process realization after high-intense short-pulsed ion beams impact. It was revealed disappear of small cracks that is a result of their melting and smoothing of the surface. The analysis of the samples weight showed the change in weight after the first 10 pulses in 100-200 μg that also can be contributed to cleaning process. But in contrast to the ion beams impact without previous treatment, the samples treated by compression plasma flows lost about 200 μg every 20 pulses of ion beams. It indicates the melting process (on the cracks boundaries) and evaporation from the melt state.

Therefore, the provided experiments showed the role of cracks formed by compression plasma flows impact on the erosion process of the surface after high-intense short-pulsed ion beam influence. The latter can be effectively used for decrease in the small cracks on the surface due to their re-melting.

А.И. КУДЮКИН, М.Н. МАХМУДОВ, Е.Н. МООС, К.Е. СЕРЁГИН, В.А. СТЕПАНОВ, Е.Я. ЧЕРНЯК

Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина

ЭРОЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ВАКУУМНЫХ ДУГОГАСИТЕЛЬНЫХ КАМЕРАХ

Сплавы Cu-Cr нашли широкое применение в современной промышленности, в частности, для производства электродов вакуумных камер. Эрозия поверхности сплавов с объемной концентрацией Cu 60 ат.% - Cr 40 ат.% в условиях развития вакуумной дуги высокой энергетической плотности разряда малоизучена. Нет сведений о теплофизических процессах, происходящих при этом в сплавах, в частности, нет информации об изменении состава и морфологии поверхности электродов при многократном дуговом испарении и разбрызгивании под действием ионно-плазменного потока (рис. 1), что позволяет лишь делать предположения о допустимых величинах взаимосвязанных напряженностей полей, температур и плотностей токов. Отсутствие такой информации не позволяет целенаправленно совершенствовать конструкционные и технологические особенности процессов производства приборов.



Рис. 1. Застывший расплав поверхности электрода.

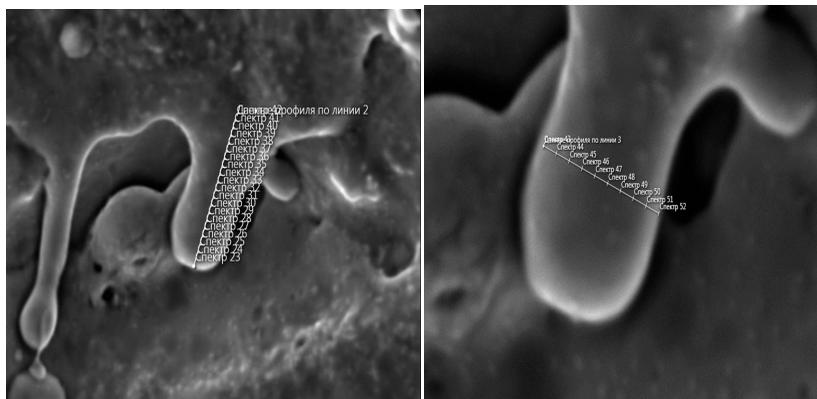


Рис.2. Зона расплавления и ее элементный анализ.

Из полученных данных сканирования состава видно, что концентрация атомов Cr характеризуется зонами повышенной и пониженной концентрации. Распределение же атомов Cu выявляет рельеф поверхности: на границе оплавленной зоны концентрация Cu значительно снижена (атомов Cr - наоборот больше). Это объясняется кристаллизацией хрома на ранних стадиях остывания.

Элементный анализ вдоль растекания сплава по двум линиям: продольной и поперечной (рис. 2) показал, что объемная концентрация меди уменьшается при движении из центра к краю оплавления от 72 % до 53,4 % (поперечное сканирование) и от 71,7 % до 61,4 % (продольное сканирование), что свидетельствует о скопление атомов хрома по краям зоны расплава. Кристаллизация электродов происходит в неравновесных условиях, а сравнение с диаграммой состояния Cu-Cr показывает, что объемная концентрация Cu - 60%, а поверхностная - 72%, т.е. атомы Cu сегрегируют к поверхности ($\Delta n = 10 - 12\%$).

Вакуумные дугогазовые камеры откачивались вакуумных водородных печах серии "Кристалл" до давления $\sim 10^{-4}$ Па, а затем в пространстве под колпаком, где устанавливалось несколько изделий, напускался водород до $10^{-2} - 10^{-3}$ Па. Квадрупольный масс-спектрометр КМС-250 (разработка рязанского предприятия «Шибболет») регистрировал состав остаточных и рабочих газов на всех стадиях технологии. В спектрах представлены линии рабочих газов (водород и гелий), линии, соответствующие диффузионным маслам типа C_xH_n и адсорбированных слоев молекул CO_2 , воды, азота и их полиатомных образований.

Зафиксировано изменение состава указанных компонент при осуществлении операций обезгаживания (прогрев до температуры 800⁰С. В процессе пайки элементов дугогасительных камер (температура 815⁰С) амплитуды линий водорода и воды уменьшалась, а окиси углерода и азота увеличивались. В установившемся режиме пайки наблюдалось рост всех линий масс-спектра, что вероятно обусловлено интенсивным газовыделением жидкой фазы.

В работе интерпретируются особенности развития дугового разряда и модификации поверхности электродов при испытании дугогасительных камер с учетом результатов масс-спектрометрического анализа технологического процесса.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ	3
<i>С.В. Мирнов</i> О РЕЗУЛЬТАТАХ V МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИИ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ В УСТАНОВКАХ УТС	13
<i>Л.Е. Захаров</i> ЛИТИЙ ДЛЯ ТОКАМАКОВ	15
<i>А.С. Рохманенков, А.В. Янилкин</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДЕСОРБЦИИ ВОДОРОДА ИЗ ГИДРИДА ТИТАНА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПУЧКА ИОНОВ	17
<i>Л.Б. Безграмбеков, С.С. Довганюк, А.Е. Евсин, А.С. Каплевский</i> ЗАХВАТ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В ВОЛЬФРАМ ПРИ ЕГО ПЕРИОДИЧЕСКОМ ПЛАЗМЕННОМ ОБЛУЧЕНИИ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ВОЛЬФРАМА	18
<i>Н.Н. Дегтяренко, А.А. Писарев, М.И. Шутикова</i> РАЗВИТИЕ МОДЕЛИ РАДИАЦИОННОЙ ДЕФЕКТНОСТИ	20
<i>И.В. Мазуль</i> ДИВЕРТОРНАЯ МИШЕНЬ ДЛЯ ДЕМО РЕАКТОРА	21
<i>И.М. Позняк, В.М. Сафронов, В.Ю. Цыбенко</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ РАСПЛАВЛЕННОГО СЛОЯ МЕТАЛЛА ПРИ УСЛОВИЯХ ХАРАКТЕРНЫХ ДЛЯ ELM-СОБЫТИЙ И СРЫВОВ В ИТЭР	22
<i>В.И. Бачурин, И.И. Амиров, И.В. Журавлев, М.О. Изюмов, В.В. Наумов, С.Г. Симакин</i> МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ПЛЕНОК БОМБАРДИРОВКОЙ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНЫМИ ИОНАМИ АРГОНА ПЛАЗМЫ ИНДУКЦИОННОГО ВЧ РАЗРЯДА	25
<i>В.В. Андреев</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МИКРОРАЗРЯДОВ С TiO ₂ СОДЕРЖАЩЕЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛЁНКОЙ В ЯЧЕЙКЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА	27
<i>С.А. Крат, Я.А. Васина, Ю.М. Гаспарян, А.А. Писарев</i> ИЗОТОПНЫЙ ОБМЕН ВОДОРОДА В ЛИТИЕВЫХ ПЛЁНКАХ ПРИ ВЫДЕРЖКЕ В ГАЗЕ	29
<i>В.Л. Буховец, А.Е. Городецкий, Р.Х. Залавутдинов, А.В. Маркин, В.И. Золотаревский, И.А. Архипушкин, Л.П. Казанский, Т.В. Рыбкина, А.М. Дмитриев, А.Г. Раздобарин, Е.Е. Мухин</i> ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ОКОН В УСЛОВИЯХ ОЧИСТКИ В ВЧ РАЗРЯДЕ В D ₂ , Ne И ИХ СМЕСЯХ	31
<i>А.Г. Посакалов, Н.С. Климов, Ю.М. Гаспарян, О.В. Огородникова, В.С. Ефимов</i> ИЗМЕНЕНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ВОЛЬФРАМА И НАКОПЛЕНИЕ ДЕЙТЕРИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ НАГРУЗКАХ	33
<i>А.Н. Щербак, С.В. Мирнов, В.Б. Лазарев, Я.А. Васина, И.Е. Люблинский, А.В. Вертков, М.Ю. Жарков</i>	37

СРАВНЕНИЕ ЗАХВАТА ДЕЙТЕРИЯ И ВОДОРОДА ЛИТИЕВЫМИ КОЛЛЕКТОРАМИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ КОЛЛЕКТОРА НА ТОКАМАКЕ T-11M

<i>А.Я. Лейви, А.П. Яловец</i>	40
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ МИШЕНИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ	
<i>А.М. Дмитриев, Н.А. Бабинов, А.Н. Баженов, И.М. Букреев, Л.А. Вваршавчик, А.Н. Коваль, Г.С. Курскиев, А.Е. Ллитвинов, С.В. Масюкевич, Е.Е. Мухин, А.Г. Раздобарин, Д.С. Самсонов, В.А. Соловей, В.В. Солоха, С.Ю. Толстяков, И.Б. Терещенко, А.Е. Городецкий, В.Л. Буховец, А.В. Маркин, А.П. Захаров, Р.Х. Залавутдинов, Ал.П. Чернаков, Ан.П. Чернаков, П.В. Чернаков, А.С. Смирнов, Т.В. Черношюзская, А.А. Кобелев, И.А. Марциновский</i>	44
ЧИСТКА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ЕМКОСТНОМ РАЗРЯДЕ В БЛАГОРОДНОМ ГАЗЕ	
<i>М.М. Харьков, А.В. Казиев, Ю.М. Гаспарян, Д.В. Данилюк, А.А. Писарев</i>	48
ПОЛУЧЕНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ПУХА НА ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ В ПЛАЗМЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА	
<i>А.С. Пришвицын, В.Б. Лазарев, С.В. Мирнов</i>	49
ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛИТИЯ В ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА T-11M ПО ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕЧЕНИЯ ЕГО НЕЙТРАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ	
<i>В.П. Афанасьев, А.С. Грязев, П.С. Капля, О.Ю. Ридзель, Н.Ю. Субботин, М. Кӧрреп</i>	52
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСЛОЙНЫХ ПРОФИЛЕЙ ДЕЙТЕРИЯ В БЕРИЛЛИИ НА ОСНОВЕ СПЕКТРОСКОПИИ ПИКОВ УПРУГО ОТРАЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ СКАНИРОВАНИЕМ	
<i>Д.Д. Бернт, В.О. Пономаренко, А.А. Писарев</i>	56
ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ НАНОРАЗМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ РЕАКЦИОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ БИНАРНЫХ СПЛАВОВ ПЛАЗМОЙ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА	
<i>С.В. Савушкина, М.Н. Полянский, Е.А. Высотина</i>	60
ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ГРАДИЕНТНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ГАФНИЯ	
<i>V.Kh. Alimov, O.V. Ogorodnikova, A.V. Spitsyn, N.P. Bobyr, Y. Hatano, J. Roth, K. Sugiyama, M. Baldwin, R. Doerner, M.H.J.'T Hoen, H.T. Lee, Y. Ueda, T. Hayashi</i>	62
HYDROGEN ISOTOPE RETENTION IN REDUCED-ACTIVATION FERRITIC/MARTENSITIC STEELS	
<i>Н.Н. Черенда, В.В. Углов, Г.М. Дзагнидзе, В.М. Асташинский, А.М. Кузьмицкий</i>	66
МНОГОЭЛЕМЕНТНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ	
<i>А.Н. Щербак, С.В. Мирнов, Н.Т. Джигаило</i>	70
НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АБСОЛЮТНОГО КОЛИЧЕСТВА ЛИТИЯ В	

ЛИТИЙСОДЕРЖАЩИХ ПЛЕНКАХ НА ПОВЕРХНОСТИ
 ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МИШЕНЕЙ (ОБРАЗЦОВ-СВИДЕТЕЛЕЙ) В КАМЕРЕ
 ТОКАМАКОВ

<i>М.А. Ларченко, И.М. Позняк</i>	74
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДУКТОВ ЭРОЗИИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ВОЛЬФРАМА ИНТЕНСИВНЫМИ ПОТОКАМИ ПЛАЗМЫ	
<i>I. Borodkina, D. Douai, D. Borodin And Jet Contributors</i>	77
PLASMA-WALL INTERACTION STUDIES AT JET-ILW IN A VIEW OF UPCOMING D, H AND T EXPERIMENTAL CAMPAIGNS	
<i>М.Ю. Жарков, А.В. Вертков, И.Е. Люблинский, В.А. Вершков, С.В. Мирнов, В.А. Шумский</i>	81
УСТРОЙСТВА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПОВЕДЕНИЯ ЛИТИЕВЫХ ВНУТРИКАМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТОКАМАКОВ	
<i>В.А. Аникин, А.М. Борисов, А.В. Макунин, Е.С. Машкова, М.А. Овчинников</i>	85
ИОННО-ИНДУЦИРОВАННОЕ ГОФРИРОВАНИЕ И ЭРОЗИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИАКРИЛОНИТРИЛЬНОГО УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА	
<i>В.П. Будаев, Л.Н. Химченко</i>	87
ВЛИЯНИЕ ДУГООБРАЗОВАНИЯ НА ЭРОЗИЮ МАТЕРИАЛОВ В ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ	
<i>I.A. Zeltser, E.N. Moos</i>	91
ELECTRODOPING SURFACE NITROGEN	
<i>I.A. Zeltser, E.N. Moos</i>	95
EROSION MODEL OF SURFACE	
<i>А.В. Елецкий, С.Д. Федорович, Г.С. Бочаров, О.С. Зилова, А.В. Захаренков, Е.В. Терентьев, А.В. Лубенченко, Н. Абусаиф</i>	99
СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ НАНОУГЛЕРОДНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОГО НАГРЕВА	
<i>Т.Р. Туленбергенов, М.К. Скаков, И.А. Соколов, Д.А. Гановичев</i>	103
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПЛЕКСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ГЕЛИЕВОЙ И АЗОТНОЙ ПЛАЗМЫ НА КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ТЯР	
<i>М.М. Цвентух</i>	107
ВЕЛИЧИНА ИМПУЛЬСА ПЛАЗМЫ ВЗРЫВОЭМИССИОННЫХ ЯЧЕЕК КАТОДНОГО ПЯТНА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ВАКУУМЕ	
<i>А.В. Нестерович</i>	111
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ Θ -ПИНЧЕЙ В ОКРЕСТНОСТИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ В ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ	
<i>Ф.В. Кирюханцев-Корнеев, А.Н. Шевейко, Д.В. Штанский, А.Е. Левашов</i>	113
СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ В СИСТЕМЕ TiC- (Ni,Al,Fe), ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫМ, ИОННО- ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДАМИ, А ТАКЖЕ ПО ГИБРИДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ	

<i>Ф.В. Кирюханцев-Корнеев, А.Н. Шевейко, К.А. Купцов</i>	114
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИМПУЛЬСНОГО КАТОДНО-ДУГОВОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ИСПАРЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ В СИСТЕМЕ Cr-B-C-N	
<i>Ф.В. Кирюханцев-Корнеев, Е.Н. Шефтель, Б.С. Тынысов,</i>	115
<i>В.А. Теджетов, Е.В. Харин</i>	
ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ ФЕРРОМАГНИТНЫЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ПЛЁНКИ Fe-ZrN/TiB/AlO для СВЧ-УСТРОЙСТВ	
<i>Д.Д. Бернт, С.А. Маланичев, И.Д. Трошкина, А.А. Писарев</i>	116
ОСАЖДЕНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ОКСИДА ТИТАНА РАСПЫЛЕНИЕМ КЕРАМИЧЕСКОЙ МИШЕНИ В ПЛАЗМЕ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА И ИХ СВОЙСТВА	
<i>Д.Н. Синельников, Д.Г. Бугадарян, Г.О. Буянов</i>	120
ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ	
<i>Будаев В.П., Федорович С.Д., Мартыненко Ю.В., Лукашевский М.В.,</i>	122
<i>Губкин М.К., Карлов А.В., Лазукин А.В. Шестаков Е.А., Сергеев Н.С.</i>	
ИСПЫТАНИЯ ВОЛЬФРАМА СТАЦИОНАРНЫМИ НАГРУЗКАМИ В ПЛАЗМЕННОЙ УСТАНОВКЕ НИУ «МЭИ»	
<i>В.П. Будаев</i>	126
ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ СО СТОХАСТИЧЕСКОЙ НАНО- И МИКРОСТРУКТУРОЙ ПОВЕРХНОСТИ: УПРАВЛЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫМИ ПОТОКАМИ В ПЛАЗМЕ И АЭРОДИНАМИКЕ	
<i>П.А. Борисовский, С.В. Гагрилов, М.Н. Махмудов, Е.Н. Моос, Г.В. Киселев,</i>	130
<i>А.И. Кудюкин, В.А. Степанов</i>	
ЭРОЗИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ ПЛАЗМОЙ РАЗРЯДА	
<i>С.А. Рябцев, Ю.М. Гаспарян, В.С. Ефимов, З.Р. Арутюнян, А.В. Казиев,</i>	133
<i>М.М. Харьков, А.А. Писарев</i>	
НАКОПЛЕНИЕ ГЕЛИЯ В ВОЛЬФРАМЕ ПРИ ИОННОМ И ПЛАЗМЕННОМ ОБЛУЧЕНИИ	
<i>А.А. Степаненко, Н.М. Орешникова, А.А. Писарев</i>	137
ДИФФУЗИЯ ВОДОРОДА В ВОЛЬФРАМЕ В ПОЛЕ ДЕФЕКТОВ ПРИ НАЛИЧИИ ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУРЫ	
<i>V.I. Shymanski, V.V. Uglov, V.M. Astashynski, H.W. Zhong, J. Shen, X.Y. Le</i>	141
TUNGSTEN SURFACE EROSION UNDER COMPRESSION PLASMA FLOW AND HIGH-INTENSE SHORT-PULSED ION BEAM IMPACTS	
<i>А.И. Кудюкин, М.Н. Махмудов, Е.Н. Моос, К.Е. Серёгин, В.А. Степанов,</i>	143
<i>Е.Я. Черняк</i>	
ЭРОЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ВАКУУМНЫХ ДУГОГАСИТЕЛЬНЫХ КАМЕРАХ	

**МАТЕРИАЛЫ
XXI КОНФЕРЕНЦИИ**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Москва, НИЯУ МИФИ, 24-25 января 2018 г.