

На правах рукописи

Коршунов Сергей Николаевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ И
ИОННЫХ ПУЧКОВ НА ОБРАЩЕННЫЕ К ПЛАЗМЕ МАТЕРИАЛЫ
ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА**

Специальность: 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор _____

Москва – 2007 г.

Работа выполнена в Российском научном центре «Курчатовский институт»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Гусева Мария Ильинична

Официальные оппоненты: - доктор физико-математических наук,
профессор
Бондаренко Геннадий Германович
- доктор физико-математических наук,
Шарапов Валерий Михайлович

Ведущая организация: ФГУП ГНЦ РФ Институт теоретической и
экспериментальной физики (ИТЭФ)

Защита состоится «21» 02 2007 г. на заседании диссертационного
совета Д 212.130.04 в Московском инженерно-физическом институте
(государственного университета) по адресу:
115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
инженерно-физического института (государственного университета)

Автореферат разослан « 18 » 01 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.130.04,
д. ф.-м. н., профессор



Кудрявцев Е.М.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Изучение процессов, происходящих при взаимодействии плазмы с материалами, представляет научный и практический интерес для исследований в области физики плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза. К моменту начала выполнения данной работы ряд принципиальных вопросов, связанных с выбором обращенных к плазме материалов для термоядерного реактора и важных для его безопасности, были недостаточно изучены.

Бериллий, вольфрам и углеволокнистый композит предполагается использовать в качестве обращенных к плазме материалов международного термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР). Возможность использования вольфрама в качестве материала диверторного устройства вызывало сомнение, вследствие больших радиационных потерь плазмы при попадании в нее распыленных атомов вольфрама. Вольфрам характеризуется высоким энергетическим порогом физического распыления ионами изотопов водорода, который, однако, снижается приблизительно на порядок при наличии на его поверхности оксидной пленки. В связи с этим возникла задача более точного определения энергетических порогов распыления W и оксида W ионами дейтерия. Бериллий в качестве материала первой стенки реактора будет иметь наибольшую площадь контакта с плазмой. Экспериментальные значения коэффициентов распыления Be легкими ионами характеризуются большим разбросом, обусловленным образованием на его поверхности оксидной пленки, приводящей к изменению энергетического порога распыления Be. Кроме того, в литературе отсутствовали экспериментальные данные о коэффициентах распыления бериллия и пересажженных смешанных слоев Be, Be-C, Be-W ионами Be^+ . Изучение проблемы срывов плазмы имеет актуальное значение для безопасности реактора как с точки зрения ускоренной эрозии материалов, контактирующих с плазмой, так и образования продуктов эрозии. До настоящего времени не проводились исследования влияния облучения в стационарной плазме на эрозию материалов и накопление в них дейтерия при срывах плазмы и, наоборот, срывов плазмы на накопление дейтерия при работе реактора в нормальном режиме, как это ожидается в ТЯР. Все вышесказанное определяет актуальность проведения имитационных исследований эрозии материалов и накопления в них изотопов водорода при последовательном воздействии стационарной и импульсной плазмы, моделирующих условия работы ТЯР в нормальном режиме со срывами плазмы.

Актуальность диссертационной работы подтверждается также тем, что исследования выполнялись в рамках Федеральных целевых научно-технических программ «Международный термоядерный реактор ИТЭР и научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в его поддержку» на 1996-1998 годы (Постановление Правительства РФ № 1119 от 19.09.96) и на 1999-2001 годы (Постановление Правительства РФ № 1417 от 01.12.98); Федеральной целевой программы «Международный термоядерный реактор ИТЭР» на 2002-2005 годы (Постановление Правительства РФ № 604 от 21.08.01); Проекта Международного научно-технического центра (МНТЦ) № 350; Заданий Центральной Команды ИТЭР (ЦКИ): Subtask 10 G-81TT 06 T 503, G-81TT 04 T 506, G-81TT 04 T 226.A.1 и G-81TT 04 T 226.A.2.

Цель работы – выявление основных закономерностей эрозии обращенных к плазме материалов и накопления в них изотопов водорода при воздействии плазменных потоков и ионных пучков в условиях имитации нормального режима работы и срывов тока плазмы в термоядерном реакторе.

Научная новизна:

1. впервые экспериментально определены энергетическая, температурная и угловая зависимости коэффициентов распыления бериллия и энергетическая зависимость коэффициентов распыления переосажденных смешанных слоев Be, Be-C, Be-W ионами Be^+ ;
2. с использованием метода автоионной микроскопии определены энергетические зависимости коэффициентов распыления ионами D^+ бериллия, вольфрама, оксида вольфрама и смешанного вольфрам-углеродного слоя и установлены значения пороговых энергий распыления данных материалов;
3. установлен бимодальный характер распределения продуктов эрозии углеродных материалов при воздействии потоков импульсной дейтериевой плазмы и выявлено, что значительный вклад в эрозию вносит их хрупкое разрушение вследствие термонапряжений, а для легированного графита РГ-Т-91 характер эрозии зависит от рельефа поверхности, сформированного в процессе воздействия стационарной плазмы;
4. при воздействии потоков импульсной дейтериевой плазмы на вольфрам обнаружена «капельная» эрозия материала, и предложен механизм формирования пространственного распределения продуктов эрозии в зависимости от их размеров;
5. впервые получены данные о накоплении изотопов водорода при комбинированном воздействии стационарной и импульсной плазмы в углеродных материалах, вольфраме и в соосажденных углеродных

слоях на вольфраме и показано, что воздействие потоков импульсной плазмы уменьшает накопление дейтерия в вольфраме при последующей экспозиции в стационарной плазме и увеличивает накопление дейтерия в соосажденном углеродном слое.

Практическая значимость.

1. Выявлены основные закономерности радиационной эрозии и накопления изотопов водорода в обращенных к плазме материалах ИТЭР при воздействии на них плазменных потоков и ионных пучков, имитирующих нормальный режим работы и срывы плазмы в реакторе. Полученные результаты использованы для расчета времени жизни обращенных к плазме элементов ТЯР и для решения проблемы его радиационной безопасности.
2. Результаты определения энергетических порогов физического распыления металлов и их соединений ионами легких элементов (H^+ , D^+ , He^+ , N^+ , O^+) с помощью метода автоионной микроскопии имеют принципиальное значение не только для материаловедческой проблемы ТЯР, но и для широкого круга практических проблем, связанных с физикой поверхности. Полученные результаты представляют практический интерес для физической электроники и ее научно-технических приложений, основанных на эмиссии атомных частиц, в частности, для термокатодов и оксидных катодов, применяемых в термоэлектрических преобразователях, автоионных и автоэлектронных микроскопах и других приборах.

Все выполненные в диссертации исследования были заказаны ЦКИ.

На защиту выносятся:

- экспериментальные результаты определения энергетической, температурной и угловой зависимостей коэффициентов распыления бериллия, энергетической зависимости коэффициентов распыления переосажденных смешанных слоев Be, Be-C, Be-W ионами Be^+ и физическая модель влияния формирующегося при распылении микрорельефа поверхности на коэффициент самораспыления бериллия;
- экспериментальные результаты определения энергетических зависимостей коэффициентов распыления Be, W, оксида вольфрама и смешанного вольфрам-углеродного слоя ионами D^+ вблизи энергетических порогов распыления, полученные с помощью автоионного микроскопа;
- экспериментальные результаты исследования эрозии различных углеграфитовых материалов (C/C-композит, легированный графит РГ-Т-

Удалено .

91 и мелкозернистый графит МПГ-8) и сортов вольфрама при комбинированном воздействии стационарной и импульсной плазмы;

- результаты изучения накопления изотопов водорода в бериллии при ионном облучении, в углеграфитовых материалах, вольфраме и в соосажденных углеродных слоях на вольфраме при комбинированном воздействии стационарной и импульсной плазмы;
- физические модели эрозии исследованных материалов: «капельной» эрозии вольфрама, эрозии по механизму хрупкого разрушения углеграфитовых материалов, модель накопления низкоэнергетического водорода в бериллии, облученном высокоэнергетическими ионами гелия.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались и обсуждались на следующих международных и российских конференциях и семинарах: Межд. конф. по взаимодействию плазмы с поверхностью в ТЯУ (PSI-12, Сан-Рафаэль, 1996; PSI-13, Сан-Диего, 1998; PSI-14, Розенхайм, 2000; PSI-15, Гифу, 2002; PSI-16, Киото, 2004); Межд. конф. по материалам для ТЯР (ICFRM-8, Токио, 1997; ICFRM-9, Колорадо-Спрингс, 1999; ICFRM-10, Баден-Баден, 2001; ICFRM-11, Киото, 2003); Межд. семинары по бериллиевым технологиям для термоядерного синтеза (№2, Джексон-Лэйк, 1995; №3, Мито, 1997; №4, Карлсруэ; №6, Миязаки, 2003; №7, Сан-Рафаэль, 2005); Межд. семинары по водородному рециклингу в ОПМ (№ 1, Токио, 1998; № 2, С.-Петербург, 1999); Межд. симпоз. по технологиям термоядерного синтеза (SOFT-18, Карлсруэ, 1994; SOFT-20, Марсель, 1998; SOFT-21, Мадрид, 2000), VII и IX Межнац. совещ. «Радиационная физика твердого тела», Севастополь, 1997 и 1999; V Рос.-япон. симпоз. по взаимодействию быстрых заряженных частиц с твердым телом, Белгород, 1996; XII Межд. конф. по электростатическим ускорителям, Обнинск, 1999; III Межд. семинар «Радиационная физика металлов и сплавов», Снежинск, 1999; XIV, XV, XVI и XVII Межд. конф. по взаимодействию ионов с поверхностью, Звенигород, 1999, 2001, 2003 и 2005; XXXII Межд. конф. по физике плазмы и УТС, Звенигород, 2005; XXXV Межд. конф. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, 2005.

Публикации. В диссертационную работу включены результаты исследований, опубликованные в 40 печатных работах в отечественных и иностранных журналах, сборниках и тезисах докладов различных конференций, в том числе, 15 статей в рецензируемых изданиях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав с выводами в конце каждой главы, основных выводов и списка литературы. Диссертация изложена на 179 страницах, включая 98 рисунков, 20 таблиц и 257 наименований в списке литературы.

Основное содержание работы.

Во введении обоснована актуальность решаемой проблемы, определена цель работы, сформулированы научная новизна, практическая ценность и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан обзор опубликованных работ по теме диссертации, проанализированы результаты предшествующих исследований по эрозии кандидатных материалов ИТЭР'а и накоплению в них изотопов водорода. Показано, что к началу диссертации в литературе отсутствовали экспериментальные данные по энергетической, температурной и угловой зависимостям коэффициентов распыления Ве ионами Be^+ , а измерения коэффициента распыления Ве ионами дейтерия в припороговой области энергий имели большой разброс значений. Не было изучено влияние сочетания нормального режима работы ИТЭР'а со срывами, как это ожидается в ТЯР, на эрозию материалов и накопление в них дейтерия. Определены задачи работы. Практически все задачи были выданы Центральной Командой ИТЭР'а в качестве домашних заданий в течение ряда лет.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных установок, методик экспериментов, методов исследований обращенных к плазме материалов.

В настоящей работе исследовались обращенные к плазме материалы, в том числе рекомендованные в качестве экранных для ИТЭР, а именно: бериллий марок ТШП-56 и S-65С, графиты МПГ-8 и РГ-Т-91(7,5%Ti), С/С композиты SEP NB31, УАМ-92 –5D, и УАМ-92 –5D-Ti, различные сорта вольфрама W-1%La₂O₃, W-13I (сплав W-Mo-Y), W(111), W-10%Re; W-0.04%Mo.

Основные исследования по распылению Ве одноименными ионами проводились в электромагнитном изотопном сепараторе с использованием модифицированного высокотемпературного ионного источника и специально разработанных приемных устройств. Общий ток ионов Be^+ составлял 25 мА. Энергия ионов варьировалась от 0,3 до 10 кэВ. Величина потока ионов Be^+ изменялась в диапазоне $(5-20) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Максимальная площадь ионного пучка составляла 10^{-2} м^2 . Образцы имели форму круглых дисков диаметром $1,7 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ и толщиной $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Определение коэффициентов самораспыления бериллия проводилось методом взвешивания.

Приведено описание методики использования автоионной микроскопии для определения порогов распыления ионами D^+ и He^+ бериллия, вольфрама, окиси вольфрама и перемешанных слоев W-C на поверхности вольфрама, а также измерения энергетических зависимостей коэффициентов распыления указанных материалов ионами дейтерия и гелия в припороговой области

энергий. Процедура измерения коэффициентов распыления состояла из следующих основных операций: а) изготовление игольчатых образцов и их установка в автоионный микроскоп; б) вакуумная откачка микроскопа и напуск изображающего и бомбардирующего газа; в) предварительный автоионный или десорбционный микроскопический анализ исходной поверхности, г) очистка поверхности путем испарения полем с целью ее максимального сглаживания; д) импульсное облучение поверхности образцов ионами He^+ или D^+ ; е) повторный микроскопический анализ образцов на предмет образования на их поверхности единичных вакансий.

Эксперименты по изучению накопления изотопов водорода в Ве, W, графите и С/С композитах в условиях стационарной плазмы проводились в установках с пучково-плазменным разрядом ЛЕНТА и ПЛАСТ при потоках плазмы $5 \cdot 10^{21} - 10^{22} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, энергии ионов D^+ 5-6000 эВ и флюенсах до 10^{26} м^{-2} .

Эксперименты по моделированию режимов срыва тока плазмы в ТЯР проводились в электродинамическом плазменном ускорителе МКТ в ТРИНИТИ (г. Троицк). Плотность потока энергии в ускорителе МКТ варьировалась от 200 кДж/м² на имп. до 900 кДж/м² на имп., максимальная энергия ионов дейтерия составляла 1-2 кэВ, плотность плазмы $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$, длительность импульса - 60 нс. Число импульсов изменялось от 2 до 10.

Продукты эрозии в экспериментах по срывам плазмы собирались на коллекторы из базальтовой ткани, на пластины монокристаллического кремния и исследовались в просвечивающих электронных микроскопах ЭММА, JEM-100С и в растровом электронном микроскопе JSM-35CF.

Для определения профилей распределения и интегральных концентраций дейтерия применялся метод регистрации ядер отдачи. В этих экспериментах пучок ионов He^+ с энергией 2.2 МэВ падал на исследуемый образец под углом 15° к поверхности, а ядра отдачи анализировались полупроводниковым детектором под углом 30° к направлению падения ионов He^+ . Распределение дейтерия по глубине рассчитывалось по энергетическим спектрам ядер отдачи дейтерия. Компьютерные спектры сравнивались с экспериментальными, с помощью специальной программы, учитывающей разрешающую энергетическую способность метода. Для получения абсолютных значений концентрации атомов дейтерия, оборудование калибровалось с помощью стандартных тонкопленочных образцов из лавсана.

До и после экспозиции материалов в стационарной и импульсной плазме проводились исследования топографии поверхности в сканирующем электронном микроскопе JSM-35CF, рельеф поверхности изучался с помощью профилометра ALPHA-200. Химический состав

модифицированных поверхностных слоев материалов, изучался методом резерфордовского обратного рассеяния (РОР) и Оже-электронной спектроскопии. Химический состав продуктов эрозии анализировался с помощью рентгеновских микроанализаторов LINK System-860 и LINK AN 10 непосредственно в микроскопе JEM-100С.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию закономерностей физического распыления ионами D^+ , He^+ , Be^+ обращенных к плазме материалов ТЯР. В настоящей работе были определены энергетическая (рис. 1), температурная (рис. 2), угловая (рис. 3) зависимости коэффициентов распыления бериллия и энергетическая зависимость коэффициентов распыления переосажденных смешанных слоев Be , $Be-C$, $Be-W$ ионами Be^+ .

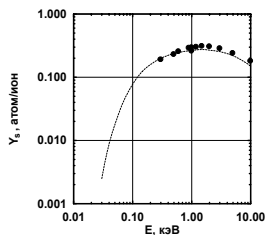


Рис. 1. Энергетическая зависимость коэффициента самораспыления Be : (- -) – расчет Экштейна, (•••) – эксперимент

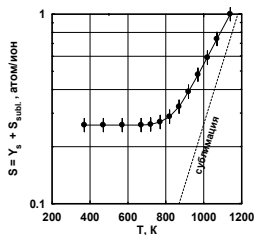
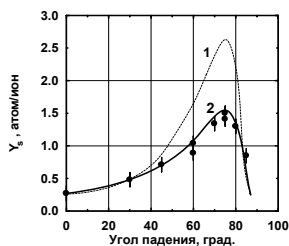


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициента эрозии Be , облученного ионами Be^+ с энергией 1 кэВ

Анализ полученных результатов показал, что: изменение коэффициента самораспыления Be с ростом энергии ионов хорошо согласуется с расчетными данными Экштейна; в интервале температур 370-720К коэффициент самораспыления Be не зависит от температуры, а при температурах выше 820К – резко возрастает до значения 1 ат.Лион при 1120К, вследствие превалирующего процесса сублимации; коэффициенты распыления переосажденных смешанных слоев определяются в основном селективным распылением бериллия. Наибольшие различия между экспериментальными и расчетными значениями коэффициента самораспыления Be обнаружены в области максимума угловой зависимости (интервал $45-85^\circ$). В этом угловом интервале на поверхности Be образуется волновой рельеф (рис. 4) в виде ряби с фронтом волны, перпендикулярным направлению падения ионного пучка.



9

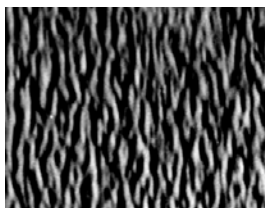


Рис. 3. Зависимости коэффициента распыления Ye от угла падения ионов Ve^+ с энергией 1 кэВ при 670К: (- -) – расчет Экштейна, (•••) – эксперимент,

Рис. 4. Поверхность бериллия, облученного ионами Ve^+ с энергией 1 кэВ при 670К и угле падения $\theta=60^\circ$

(—) – расчет с учетом микрорельефа интегральная физическая модель влияния формирующегося при распылении микрорельефа поверхности на коэффициент самораспыления бериллия. В модели рассматривается суммарный коэффициент распыления (Y_Σ), включающий две составляющие, одна из которых соответствует распылению материала с плоской поверхностью ($Y_{пл.}$), другая – распылению с рельефных структур ($Y_{р.}$), причем эти составляющие коэффициента распыления суммируются с весовыми коэффициентами, соответствующими доле занимаемой площади плоской ($\eta_{пл.}^s$) и рельефной ($\eta_{р.}^s$) поверхностей: $Y_\Sigma = \eta_{пл.}^s \cdot Y_{пл.} + \eta_{р.}^s \cdot Y_{р.}$. Угловая зависимость коэффициента распыления представляется в виде: $Y(E_o, \theta) = Y_o(E_o, \theta = 0^\circ) \cdot (\cos \theta)^{-f} \cdot \exp\{f[1 - (\cos \theta)^{-1}] \cdot \cos \theta_{opt}\}$ - формула Ямамуры, где E_o – энергия ионов, θ – угол падения ионов, Y_o – коэффициент распыления при нормальном падении ионов, f и θ_{opt} – подгоночные параметры. Выражение для интегрального коэффициента распыления рельефной области поверхности может быть представлено в общем виде, как:

$$Y_{р.} = [1 / (1 - \sin \theta_{\min})] \cdot \int_{\theta_{\min}}^{\pi/2} Y(E_o, \theta) \cdot (\cos \theta) d\theta, \quad (1)$$

где из геометрических соображений: $\sin \theta_{\min} = 1 - (t/R) \cdot \sin \alpha_o$ для ($R < H$), $\sin \theta_{\min} = 1 - [8Ht / (4H^2 + a^2)] \cdot \sin \alpha_o$ для ($R > H$). Данные численных расчетов, выполненных на основании полученных выражений с учетом геометрических особенностей развития рельефных структур, представлены на рис. 3. Видно, что наблюдается хорошее соответствие экспериментальных и расчетной данных для угловой зависимости коэффициента самораспыления бериллия, т.е. формирование микрорельефа в процессе ионной бомбардировки вполне объясняет расхождение между теорией, написанной

Удалено:

для идеальной поверхности, и экспериментом. К тому же, проведенные исследования с необработанной поверхностью Ве показали, что масштабный рельеф остается после распыления, а рельеф, созданный ионной бомбардировкой, накладывается на него и определяет реальные углы падения.

Особые трудности при определении энергетических порогов и коэффициентов распыления в припороговой области энергий возникают для химически активных материалов, к которым относятся бериллий и вольфрам, рассматриваемые в качестве кандидатных экранных материалов для первой стенки и дивертора ИТЭР и характеризующиеся большим химическим сродством к кислороду. В связи с этим экспериментальное определение коэффициентов распыления в припороговой области энергий требует использования особо чувствительных методов, позволяющих проводить очистку и исследование поверхности материала. Среди современных экспериментальных средств диагностики поверхности таким требованиям в наибольшей степени отвечает метод автоионной микроскопии. Определенные с использованием этого метода значения $E_{\text{пор}}$ для бериллия, распыляемого ионами D^+ и He^+ , составляют менее 10 эВ. Обнаружено хорошее соответствие между экспериментальными значениями коэффициентов распыления бериллия ионами D^+ и He^+ в интервале энергий 10-200 эВ, измеренных с помощью методики автоионной микроскопии, и данными компьютерного моделирования по программе TRIM SP.

Результаты измерений энергетических порогов и энергетических зависимостей коэффициентов распыления ионами D^+ W и перемешанного слоя W-C, полученные с помощью автоионной микроскопии и весовым методом, показали близкие величины измеряемых параметров, которые также хорошо согласуются с теорией. Вместе с тем, обнаружено резкое увеличение энергетического порога распыления оксида вольфрама ионами D^+ ($E_{\text{пор}} = 65$ эВ) по сравнению с величиной $E_{\text{пор}} = 18$ эВ, определенной весовым методом.

Четвертая глава посвящена исследованию эрозии и характеру повреждаемости различных углеграфитовых материалов (УГМ) и сортов вольфрама при воздействии мощных импульсных потоков дейтериевой плазмы. Вместе с тем интерес с точки зрения безопасной работы ТЯР, представляют вопросы, связанные со свойствами образующихся в процессе срывов плазмы продуктов эрозии материалов, в частности их морфологические особенности, распределения по размерам, химический составы.

Анализ продуктов эрозии УГМ показал, что морфология продуктов эрозии имеет разнообразную форму и размеры: мелкие частицы, сферические и пластинчатые чешуйки, осадок в виде частиц размером 0,03 мкм, пленки сублимированного графита. В качестве примера на рис. 5 представлено распределение уловленных на стекловолонке частиц по размерам для УАМ-92–5D.

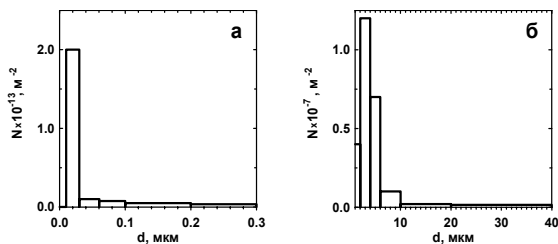


Рис. 5. Распределения частиц продуктов эрозии УАМ-92-5D по размерам после облучения импульсной дейтериевой плазмой (6 имп., 60 мкс, 0,5 МДж/м² на имп.): а – диапазон размеров (0 – 0,3) мкм; б – диапазон размеров (1 – 40) мкм

Распределение имеет бимодальный характер и протяженный хвост, простирающийся до 40 мкм. Аналогичные распределения продуктов эрозии получены для других исследуемых УГМ. Первый максимум расположен в интервале размеров частиц $0.02 \div 0.03 \text{ мкм}$, второй - в диапазоне $2 \div 4 \text{ мкм}$. Наличие продуктов эрозии размерами 10-40 мкм, свидетельствует о механизме хрупкого разрушения УГМ.

На примере графита РГ-Т-91, содержащего 7,5вес.%Ti, установлено влияние температуры облучения в стационарной дейтериевой плазме, соответствующей определенному механизму эрозии, на его последующую эрозию в экспериментах по имитации срывов плазмы. В случае физического распыления поверхности РГ-Т-91 ($T_{\text{обл.}} < 1270 \text{ К}$) в стационарной плазме, приводящего к формированию конусов на поверхности, последующий срыв тока плазмы ведет к оплавлению вершин этих конусов. Если облучение поверхности графита РГ-Т-91 в стационарной дейтериевой плазме проводится при $T_{\text{обл.}} > 1270 \text{ К}$, характерных для процесса радиационно-ускоренной сублимации (РУС), то на поверхности графита формируется периодическая структура с сотообразной морфологией террасчатого типа. Размер отдельных сот колеблется в пределах от 0,5 до 2,5 мкм. Последующее воздействие импульсной дейтериевой плазмы приводит к разрушению

периодического рельефа террасчатого типа. При этом эрозия графита увеличивается в 3 раза по сравнению с эрозией за счет оплавления конусов.

Сравнение коэффициентов эрозии исследованных в данной работе различных УГМ, измеренных по потере веса, в одном режиме облучения импульсной плазмой (0,25МДж/м² на имп., 10 имп., 60 мкс) приведено на рис. 6.

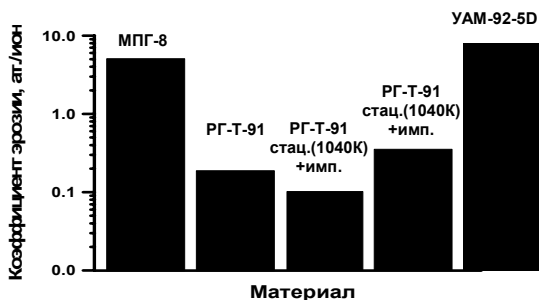


Рис. 6. Коэффициенты эрозии исследованных УГМ после облучения импульсной дейтериевой плазмой (0,25 МДж/м² на имп., 10 импульсов, 60 мкс)

Электронномикроскопические исследования микроструктуры поверхности и морфологических особенностей продуктов эрозии УГМ свидетельствуют о растрескивании и выкрашивании при воздействии потоков импульсной плазмы. Эрозия осуществляется достаточно «крупными» кусками материала, на отрыв которых тратится значительно меньше энергии, чем на их испарение. Наиболее простым предположением может быть отрыв отдельных слабосвязанных кристаллитов (кристаллических зерен для графитов или кусков углеродной матрицы для композитов). Причем определяющим фактором является их взаимная ориентация. Если кристаллит имеет n соседей, то при их хаотическом расположении (изотропные графиты) вероятность наступления соответствующих условий для разрыва межкуристаллитных связей и отрыва кристаллитов будет $P_{кр.} \sim (\Omega_{кр.}/2\pi)^n$, где $\Omega_{кр.}$ – телесный критический угол между ориентациями соседних кристаллитов, при превышении которого происходит разрыв межкуристаллитных связей и отрыв кристаллитов (зерен). Для отрыва всех кристаллитов в слое толщиной L необходимо, чтобы трещина прошла гораздо большее расстояние, которое при линейном характере движения трещины может быть представлено, как: $L \cdot (\Omega_{кр.}/2\pi)^n$, а

скорость эрозии (скорость движения поверхности) будет равна: $S \equiv v_{тр} \cdot (\Omega_{кр}/2\pi)^n$. При «диффузионном» характере распространения трещины: $S \equiv v_{тр} \cdot (\Omega_{кр}/2\pi)^{2n}$. Обе формулы при характерных значениях $n = 6$, $\Omega_{кр} = 1$ радиан дают значения $S = 10^{-1}-10^{-2}$ см/с, которые попадают в интервал значений скоростей эрозии УГМ. Телесный угол $\Omega_{кр}$ определяется разностью термоупругих напряжений между соседними кристаллитами для графита, т.е. анизотропией ($E\alpha$), и в итоге зависит от температуры мишени. Конкретный вид функции $\Omega_{кр}(T)$ определить весьма затруднительно, но при небольших мощностях падающего плазменного потока скорость эрозии можно представить эмпирически в виде: $S = S_0 \cdot (T - T_b)$, где S_0 – эмпирическая константа, которая может быть определена из значений толщины уносимого слоя в зависимости от плотности выделяемой энергии Q и длительности импульса τ . Величина T_b также подбирается эмпирически ($T_b = 2700K$). Из предлагаемой модели вытекает низкая эрозия анизотропных графитов по сравнению с изотропными. В графитах, имеющих плавящиеся включения, например, карбид бора или карбид титана, трещина может останавливаться на таких расплавленных выделениях, тем самым, снижая разрушение и эрозию легированных УГМ.

Ожидается, что вольфрамовые компоненты диверторного устройства ИТЭР^а будут подвержены эрозии только при срывах плазмы. Под воздействием имитирующих срывы потоков импульсной ($500KДж/м^2$ на имп., 10имп.) дейтериевой плазмы поверхность вольфрама расплавляется, растрескивается, на ней образуются волны, гребешки которых разбрызгиваются в виде капель (рис. 7а). При увеличении плотности энергии потока импульсной плазмы до $900KДж/м^2$ на имп., верхний слой материала полностью удаляется и образование волн и капель наблюдается в новом поверхностном слое (рис. 7б).

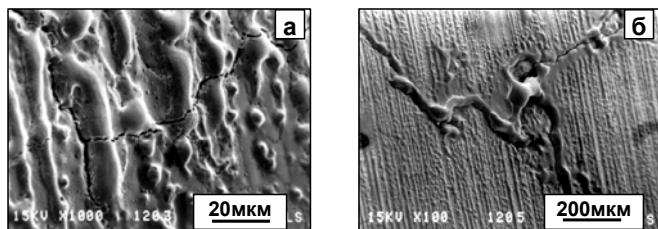


Рис. 7. Микроструктура поверхности $W - 0.04\% Mo$ после экспозиции в стационарной плазме ($D^+, 150эВ, 10^{26} м^{-2}, 770K$) и воздействия импульсной плазмой ($D^+, 60км, 10имп.$): а – $Q = 0,5MДж/м^2$ на имп.; б – $Q = 0,9MДж/м^2$ на имп.

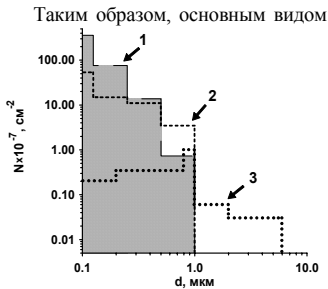


Рис. 8. Распределение по размерам капель W на Si-сборниках после облучения мишени из W-13I 10 имп. D плазмы (60мкс, 0,5МДж/м² на имп.): 1 – на краю мишени перпендикулярно облучаемой поверхности; 2 – в плоскости мишени; 3 – перед мишенью

по нормали к поверхности (кривая 3). Частицы, собранные на фильтр, расположенный перед мишенью под малым углом к нормали, имеют максимум в диапазоне $0.7 \div 1$ мкм.

На основании полученных распределений капель по размерам для различных сортов вольфрама при одном и том же режиме облучения плазмы (3 МДж/м²), проведена оценка их эрозии в экспериментах по имитации срывов. Установлено, что минимальной скоростью эрозии характеризуется монокристаллический вольфрам W(111), максимальной – сплав W-10% Re.

В работе предложены физическая модель капельной эрозии, связанная с отрывом вершущек волн, возбуждаемых на расплавленной поверхности вследствие неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, и механизм пространственного распределения продуктов эрозии в зависимости от их размеров.

Наличие видимых волн на поверхности расплавленного вольфрама после воздействия плазменных потоков, имитирующих срыв плазмы, свидетельствует о возбуждении капиллярных волн в результате тангенциальной неустойчивости Кельвина-Гельмгольца на поверхности жидкости (расплава металла), над которой движется поток паровой плазмы. Этот поток, направленный от центра к периферии мишени, обусловлен

Таким образом, основным видом эрозии W при срывах плазмы, наряду с испарением, является капельная эрозия.

На рис. 8 представлено распределение капель по размерам на коллекторах, расположенных перпендикулярно (кривая 1) и параллельно поверхности мишени (кривая 2), а также на поверхности облученной мишени из W-13I (кривая 3). Сравнение кривых 1 и 2 показывает, что размер осевших частиц и положение максимума распределения существенно зависят от месторасположения сборника. Мелкие частицы или возвращаются на мишень, или отлетают параллельно поверхности мишени. Кривые 1 и 2 имеют максимум в области диаметров $0.1 \div 0.125$ мкм. Крупные частицы отлетают в основном

по нормали к поверхности (кривая 3). Частицы, собранные на фильтр, расположенный перед мишенью под малым углом к нормали, имеют максимум в диапазоне $0.7 \div 1$ мкм.

Частицы, собранные на фильтр, расположенный перед мишенью под малым углом к нормали, имеют максимум в диапазоне $0.7 \div 1$ мкм.

градиентом давления в паровой плазме и движением плазмы над поверхностью расплавленного металла. Согласно теории капиллярных волн их частота: $\omega = k \cdot V_{п.} \cdot [\rho_{п.}/(\rho_{ж.} + \rho_{п.})]$, где $V_{п.}$ и $\rho_{п.}$ – соответственно, скорость и плотность пара над поверхностью, $\rho_{ж.}$ – плотность жидкости, k – волновой вектор. Максимальный инкремент имеют волны с волновым вектором $k_{\text{макс.}} = 2\rho_{п.} \cdot V_{п.}^2 / 3\alpha$ и $\lambda_{\text{макс.}} = 2\pi/k_{\text{макс.}} = 3\pi\alpha/\rho_{п.} \cdot V_{п.}^2$, где α – коэффициент поверхностного натяжения. При параметрах экранирующей плазмы $n_1 = 10^{17}$ см⁻³ и $V_{п.} = 3 \cdot 10^5$ см/с (численные оценки приведены для случая W мишени в экспериментах на установке МКТ) $\omega = 10^3$ с⁻¹, $\lambda = 20 - 30$ мкм, что согласуется с наблюдаемыми длинами волн.

Размеры вылетающих капель свидетельствуют о разбрызгивании лишь вершущек – гребней волн. Давление «плазменного ветра», $P = \rho_{п.} \cdot V_{п.}^2$, действует на одну сторону волны, сдвигая ее гребень. Приобретаемая валом волны скорость: $V_{\text{вал.}} = (\nabla P/\rho_{ж.}) \cdot t$ превысит скорость волны $V_{\text{волн.}} = (\rho_{п.}/\rho_{ж.}) \cdot V_{п.}$ через время: $t_1 = \lambda/2V_{п.} \approx 10^{-9}$ с. Это означает, что через время t_1 уже нет обычного волнового движения, а валы волн скользят по поверхности жидкости с продолжающимся ростом амплитуды. В течение времени $t_{\Delta} = \Delta^2/K$ (K – кинематическая вязкость) вершущка волны высотой Δ ведет себя как твердая и, если за время t_{Δ} она сдвигается «ветром» на величину, равную ширине этой вершущки $\Delta x = (\lambda/2\pi) \cdot (2\Delta/a)^{1/2}$, то она отрывается от волны и уносится в виде капли с линейным размером: $r = [\Delta \cdot (\Delta x)^2]^{1/3}$. Размер капли при первом отрыве вершущки составляет: $r_1 \approx 3.6 \cdot 10^{-5}$ см, а при последующих отрывах вершущек волн он может возрасти до $\sim 1-2$ мкм. Эти размеры хорошо совпадают с размерами капель наблюдаемых при моделировании срывов на W.

Скорость, с которой капли отлетают по нормали к поверхности, уменьшается в результате давления плазмы, действующего на одну сторону частицы в кнудсеновском слое толщиной $\lambda \cong 1/n\sigma$ (σ – сечение ион-ионных столкновений) и сообщающего ускорение, направленное к поверхности. Пока частица пролетает этот слой, на ее внешнюю поверхность, обращенную к плазме, действует давление: $p = n \cdot T$, где n – число ионов в единице объема, а T – температура ионов. В результате скорость частицы, нормальная к поверхности, уменьшается и после пролета этого слоя становится равной: $V_{\perp} = [V_{\perp 0}^2 - 1,5 \cdot p \cdot \lambda / (\rho R)]^{1/2}$. Отсюда видно, что маленькие капли будут тормозиться сильнее. Кроме того, существует минимальный размер частиц, которые могут преодолевать этот слой: $R_{\text{мин}} = 1,5 \cdot p \cdot \lambda / (\rho \cdot V_{\perp 0}^2)$. Если $\lambda \sim 10^{-4}$ м и $p \sim 10^5$ Па, то $R_{\text{мин}} \sim 10^{-6}$ м. Капли с размером $R < R_{\text{мин}}$ возвращаются давлением плазмы на поверхность. Уменьшение скорости нормальной к

поверхности приводит к тому, что наблюдаемое угловое распределение частиц имеет максимум при скользящих к поверхности углах.

Пятая глава посвящена изучению накопления изотопов водорода в обращенных к плазме материалах ТЯР. Эксперименты по исследованию накопления водорода в Ве проводились в установке ПИАСТ и ионном ускорителе ИЛУ. Режимы облучения и параметры накопления H в Ве приведены в табл. 1.

Таблица 1

Режимы облучения ионами H^+ и параметры накопления водорода в Ве

№	Е, КэВ	$J, m^{-2}c^{-1}$	Φ_H, m^{-2}	H/Ве	N_{Σ}, m^{-2}	C_{max}, m^{-3}	К, %
1	5	$1,8 \cdot 10^{20}$	$5 \cdot 10^{22}$	0,16	$3,6 \cdot 10^{21}$	$2,20 \cdot 10^{28}$	7,2
2	5	-	10^{23}	0,16	$2,6 \cdot 10^{21}$	$2,35 \cdot 10^{28}$	5,2
3	6	$4,8 \cdot 10^{20}$	$2,3 \cdot 10^{23}$	0,09	$2,2 \cdot 10^{21}$	$1,6 \cdot 10^{28}$	0,96
4	6	-	$1,2 \cdot 10^{24}$	0,09	$1,7 \cdot 10^{21}$	$1,6 \cdot 10^{28}$	0,14
5	6	-	$1,5 \cdot 10^{25}$	0,04	$1,2 \cdot 10^{21}$	$8 \cdot 10^{27}$	0,008

В табл. 1 представлены расчетные значения N_{Σ} , H/Ве, C_{max} , а также коэффициентов захвата К для исследуемых мишеней, полученные из экспериментальных профилей. Максимальное количество захваченного водорода $3,6 \cdot 10^{21} m^{-2}$ наблюдается при минимальном флюенсе облучения – $5 \cdot 10^{22} m^{-2}$. Отношение H/Ве в имплантированном слое уменьшается от 0,16 до 0,04 с увеличением флюенса до $1,5 \cdot 10^{25} m^{-2}$. Одновременно с ростом флюенса наблюдается уменьшение коэффициента захвата К. При максимальном флюенсе количество захваченного водорода в Ве составляет лишь 0,008% от числа пришедших ионов.

Для имитации влияния радиационных дефектов на накопление атомов водорода необходимо наряду с дефектами вводить в бериллий атомы гелия. С этой целью образцы Ве предварительно облучались ионами гелия с энергией 2,8 МэВ при температуре 773К и трех флюенсах: $10^{20} m^{-2}$, $5 \cdot 10^{20} m^{-2}$ и $10^{21} m^{-2}$. При указанной энергии ионы гелия проникают на глубину ~ 10 мкм, которая меньше размера зерна исследуемого бериллия. Предварительно облученные ионами He^+ мишени, а также исходный бериллий, подвергались последующей бомбардировке моноэнергетическими ионами H^+ с энергией 3 кэВ при температуре 573К и флюенсах $5 \cdot 10^{22} m^{-2}$, $10^{23} m^{-2}$.

Влияние предварительного облучения высокоэнергетичными ионами He^+ на накопление водорода в Ве продемонстрировано на рис. 9. Максимум распределения водорода смещается вглубь мишени, толщина имплантированного слоя возрастает почти в 2 раза и интегральная концентрация атомов водорода увеличивается в 2,6 раза. Влияние флюенса

облучения ионами H^+ на профили распределения водорода в бериллии, предварительно облученном ионами He^+ до дозы $5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-2}$, показано на рис. 10. Увеличение флюенса ионов H^+ от $5 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$ до 10^{23} м^{-2} приводит к увеличению интегральной концентрации водорода и смещению профиля распределения вглубь мишени.

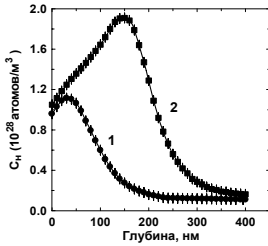


Рис. 9. Профили распределения H в Ве, облученном ионами H^+ с энергией 3 кэВ до дозы $5 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$ при $T = 573 \text{ K}$: 1 – исходный Ве; 2 – Ве, предварительно облученный ионами He^+ с энергией 2,8 МэВ до флюенса 10^{20} м^{-2} при $T = 773 \text{ K}$

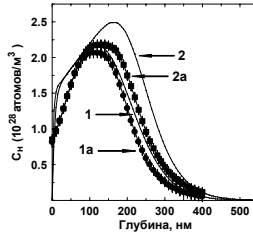


Рис.10. Экспериментальные (1а, 2а) и расчетные (1, 2) профили H в Ве, после облучения ионами He^+ с энергией 2,8 МэВ до флюенса $5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-2}$ при $T = 773 \text{ K}$ и ионами H^+ с энергией 3 кэВ при $T = 573 \text{ K}$: 1, 1а – $\Phi_H = 5 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$; 2, 2а – $\Phi_H = 10^{23}$

Для объяснения поведения водорода в Ве, облученном высокоэнергетическими ионами He^+ , предложена физическая модель, в которой основная роль в захвате атомов H отведена создаваемым ионами He^+ ловушкам в виде вакансионных и гелий-вакансионных кластеров. Предполагается, что профиль распределения ловушек $C_T(x)$ подобен профилю распределения первичных вакансий, образующихся при облучении ионами He^+ с энергией 2,8 МэВ. Распределение атомов He с линейной зависимостью $n(x) = n_{\text{max}} \cdot x/R_p$ ($x < R_p \cong 10,9 \mu\text{м}$) достигается за время $t \cong 10^2$ с ($\Phi = 10^{20} \text{ He}/\text{м}^2$). В этих условиях кинетика атомов водорода может быть описана уравнениями:

$$\partial C_H / \partial t = D_H \cdot \partial^2 C_H / \partial x^2 - \alpha \cdot D_H \cdot [C_T(x) - (a/r)^3 C_T] \cdot C_H + G(x), \quad (2)$$

$$\partial C_T / \partial t = \alpha \cdot D_H \cdot [C_T(x) - (a/r)^3 C_T] \cdot C_H, \quad (3)$$

где C_H - профиль распределения подвижных атомов водорода, C_T - профиль распределения захваченных ловушками атомов водорода, $G(x) = (j/\Delta R_p) \cdot \exp[-(x-2R_p)^2/2\Delta R_p^2]$ - функция источника, описывающая распределение имплантированных атомов водорода, R_p и ΔR_p - средний проективный пробег и разброс пробегов ионов водорода с энергией 3 кэВ; α

$= 4\pi r$, $r = 5$ нм - радиус ловушки; $C_T(x) = k \cdot x + (C_T)_0$, где $k = (C_T)_{\text{макс}}/R_p = 7 \cdot 10^{30} \text{ м}^{-2}$, $(C_T)_0 = 10^{28} \text{ м}^{-3}$ - описывает ловушки, образованные ионами He^+ . Второй член в уравнении (1) характеризует подвижные атомы H, захваченные при насыщении ловушками, а r - радиус атома H в ловушке. В качестве граничного условия принято $C_H(0) = 0$. Предложенная модель дает хорошее соответствие (рис. 10) между расчетным (кривая 1) и экспериментальным (кривая 1а) максимумами распределения H при флюенсе $\Phi_H = 5 \cdot 10^{22} \text{ Н/м}^2$. Профили распределения водорода также хорошо совпадают.

Исследования накопления дейтерия в беспримесном C/C композите (SEP NB31) и в легированном титаном (УАМ-92-5D-Ti), а также в графитах – мелкозернистом (МПП-8) и легированном Ti (РГ-Т-91) проведены в соответствии с ожидаемыми параметрами плазмы в диверторном устройстве ИТЭР^а при нормальном режиме: диапазон температур $1040 \div 1470 \text{ К}$, энергии ионов D^+ 5 эВ и 200 эВ (РГ-Т-91), плотности потока плазмы $5 \cdot 10^{21} \div 10^{22} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, флюенс облучения 10^{26} м^{-2} . Некоторые образцы подвергались воздействию потоков импульсной дейтериевой плазмы, имитирующей срыва тока плазмы.

В табл. 2 приведены результаты измерений интегральных концентраций (N_D) дейтерия в образцах SEP NB31, УАМ-92-5D-Ti, МПП-8 и РГ-Т-91 после экспозиции в стационарной плазме и в комбинированном режиме (стационарная + импульсная плазмы). Видно, что интегральные концентрации дейтерия в материалах, легированных титаном, приблизительно на порядок превышают содержание дейтерия в нелегированных Ti УГМ. Согласно измерениям POP, поверхности УВК УАМ-92-5D-Ti и графита РГ-Т-91 после экспозиции в стационарной плазме обогащаются титаном за счет процесса радиационно-индуцированной диффузии атомов Ti к поверхности. Наличие титана в УГМ не только способствует накоплению дейтерия, но и уменьшает химическую эрозию материалов, что также ведет к увеличению накопления дейтерия в УАМ-92-5D-Ti и РГ-Т-91 по сравнению с SEP NB31 и МПП-8. Следует отметить особенности накопления дейтерия в графите РГ-Т-91 при последовательной экспозиции в стационарной и импульсной плазме. Характер распределения дейтерия в образцах графита, экспонированных в стационарной плазме, обусловлен различными процессами диффузии дейтерия в графите при исследуемых температурах – физическим распылением и межзеренной диффузией дейтерия по открытым каналам при температуре 1040К и радиационно-ускоренной сублимацией и диффузией по объему зерна при температуре 1470К. Последующее облучение графита импульсной плазмой

приводит к резкому уменьшению концентрации дейтерия в обоих образцах графита.

Таблица 2

Накопление дейтерия в углеграфитовых материалах

№	Характер плазм. обл.	Марка УГМ	Т _{обл.} , К в стац. плазме	Е _э , эВ	N _э , м ⁻²	Q, МДж/м ²	Механизм эрозии
1	Стац.	SEP NB31	1370	5	6,20·10 ¹⁸	-	Хим. расп.
2	Стац.	МПГ-8	1470	5	1,95·10 ¹⁹	-	Хим. расп.
3	Стац.	УАМ-92-5D-Ti	1370	5	9,00·10 ¹⁹	-	Хим. расп.
4	Имп. + стац.	УАМ-92-5D-Ti	1370	5	5,30·10 ¹⁹	9,0	Хр. разр.+ хим. расп
5	Стац.	РТТ-91	1040	200	1,90·10 ²⁰	-	Физ. расп.
6	Стац. + имп.	РТТ-91	1040	200	1,60·10 ¹⁹	1,5	РУС
7	Стац.	РТТ-91	1470	200	2,70·10 ²⁰	-	РУС
8	Стац. + имп.	РТТ-91	1470	200	1,16·10 ²⁰	1,5	РУС + хр. разр.

Исследования накопления дейтерия в различных сортах вольфрама проводились при комбинированного воздействия стационарной и импульсной плазмы. В табл. 3 суммированы результаты по накоплению дейтерия в W - 0.04%Mo при облучении потоками стационарной и импульсной плазмы.

Таблица 3

Накопление дейтерия в (W-0,04 % Mo) при облучении стационарной (E = 200 эВ, T_{обл.} = 770К, D = 10²⁶ м⁻²) и импульсной плазмой

№	Условия облуч.	Q, МДж/м ²	N _э , м ⁻²	Отношение D/W
1	Стац. плазма	-	1,5·10 ²⁰	0,110
2	Имп. плазма	9	0	-
3	Стац. + имп. плазма	5	2·10 ¹⁹	0,025
4	Имп. + стац. плазма	9	7·10 ¹⁹	0,032

В результате воздействия потоками импульсной плазмы происходит значительное уменьшению концентрации дейтерия в W вследствие диффузии дейтерия из поврежденного слоя поверхности наружу, а также в результате испарения и капельной эрозии W. Комбинированное воздействие стационарной и импульсной плазмы приводит к уменьшению отношения D/W в 3,5-4,5 раза по сравнению с экспонированием только в стационарной плазме при 770К.

Результаты измерений интегральных концентраций дейтерия в поверхностных слоях после дополнительного облучения образцов вольфрама

W - 13I, W - 1%La₂O₃, W - 10%Re и W(III) импульсными потоками D плазмы ($Q_2 = 4,5 \text{ МДж/м}^2$) приведены в табл. 4.

Таблица 4

Интегральные концентрации дейтерия в различных сортах W после экспозиции в стационарной плазме при 770K и последующего облучения импульсной плазмой

№	Материал	Интегральная концентрация дейтерия, м ²		
		Стац. плазма	Стац. + имп. плазма	Имп. плазма при соосаждении углерода
1	W-13I	$1,20 \cdot 10^{19}$	$1,44 \cdot 10^{19}$	$1,84 \cdot 10^{20}$
2	W-1% La ₂ O ₃	$1,30 \cdot 10^{19}$	$1,39 \cdot 10^{19}$	$2,06 \cdot 10^{20}$
3	W-10% Re	$2,20 \cdot 10^{19}$	$0,84 \cdot 10^{19}$	$1,90 \cdot 10^{20}$
4	W(III)	$2,50 \cdot 10^{19}$	$1,07 \cdot 10^{19}$	$2,57 \cdot 10^{20}$

Накопление дейтерия в вольфраме при экспозиции в стационарной плазме при температуре 770K определяется высоким коэффициентом диффузии, наличием оксидной пленки на поверхности и примесей, препятствующих диффузии кислорода в объем вольфрама (W - 10% Re, W - La₂O₃, W - 13I, W(111)). За пределами слоя толщиной 30-50 нм во всех образцах дейтерий распределен равномерно по глубине, и его концентрация составляет 0,2 ат.%. При последующем облучении образцов W потоками импульсной плазмы интегральная концентрация дейтерия не зависит от типа вольфрама и составляет $\sim 1 \cdot 10^{19} \text{ м}^2$. Образование соосажденного углеродного слоя в процессе облучения W импульсной плазмой приводит к увеличению накопления дейтерия в этом слое более, чем на порядок величины по сравнению с накоплением в условиях облучения, как стационарной, так и последовательно стационарной и импульсной плазмой. Весь дейтерий накапливается в пленках, однако уровень его концентрации снижается почти в 2 раза в тонких пленках.

Основные выводы.

1. Впервые экспериментально определены энергетическая, температурная, угловая зависимости коэффициентов распыления бериллия и энергетическая зависимость коэффициентов распыления переосажденных смешанных слоев Be, Be-C, Be-W ионами Be⁺. Показано, что коэффициент самораспыления бериллия резко возрастает до значения 1 атом/ион при температуре облучения 1120 K вследствие превалирующего процесса сублимации, а коэффициенты распыления переосажденных смешанных слоев определяются селективным распылением бериллия.
2. Установлено, что коэффициенты самораспыления бериллия существенно зависят от характера формирующегося в процессе распыления

микрорельефа поверхности. Разработана физическая модель влияния создаваемого микрорельефа распыляемой поверхности на коэффициент самораспыления бериллия, основанная на изменении фактических углов падения ионов на поверхность мишени.

3. С использованием метода автоионной микроскопии определены энергетические зависимости коэффициентов распыления ионами D^+ бериллия, вольфрама, оксида вольфрама и смешанного вольфрам-углеродного слоя и установлены энергетические пороги распыления. Обнаружено, что пороговая энергия распыления оксида вольфрама составляет ~ 65 эВ и существенно превышает значение ($E_{пор.} = 18$ эВ), известное в литературе.
4. Впервые исследована эрозия обращенных к плазме кандидатных материалов ИТЭР при комбинированном воздействии стационарной и импульсной дейтериевой плазмы и установлено, что при облучении импульсными потоками плазмы наблюдается бимодальный характер распределения продуктов эрозии углеграфитовых материалов, причем значительный вклад в эрозию вносит их хрупкое разрушение вследствие возникающих термонапряжений, а для легированного графита РГ-Т-91 характер эрозии существенно зависит от рельефа поверхности, сформированного в процессе воздействия стационарной плазмы.
5. На основе результатов исследования воздействия импульсных потоков дейтериевой плазмы на вольфрам и его сплавы показано, что основными видами эрозии являются испарение и «капельная» эрозия материала. Предложен механизм формирования пространственного распределения продуктов эрозии в зависимости от размеров частиц.
6. Выявлены закономерности накопления изотопов водорода в бериллии при ионном облучении, в углеграфитовых материалах, вольфраме и в соосажденных углеродных слоях на вольфраме при комбинированном воздействии стационарной и импульсной дейтериевой плазмы и установлено, что накопление водорода в бериллии зависит от температуры, флюенса и концентрации кислорода в поверхностном слое и возрастает после предварительного облучения высокоэнергетическими ионами гелия. Показано, что накопление дейтерия в углеграфитовых материалах увеличивается при легировании титаном и уменьшается при комбинированном облучении, а в вольфраме - определяется состоянием оксидной пленки на поверхности и характером плазменного воздействия, установлено также заметное накопление дейтерия в соосажденном слое.
7. На основе экспериментальных результатов разработаны физические модели эрозии исследованных материалов: капельной эрозии вольфрама,

Отформатировано:
выделение цветом

эрозии по механизму хрупкого разрушения углеграфитовых материалов, модель накопления низкоэнергетического водорода в бериллии после его предварительного облучения высокоэнергетическими ионами гелия.

Основные публикации по теме диссертации.

1. Korshunov S.N., Guseva M.I., Stoljarova V.G. Experimental Investigation of the Energy and Temperature Dependence of Beryllium Self-Sputtering // Proc. of the 2nd IEA International Workshop on Beryllium Technology for Fusion. CONF-9509218, Jackson Lake Lodge, Wyoming, USA. – 1995. - P. 285-293.
2. Investigation of the Ion Beryllium Surface Interaction / Guseva M.I., Birukov A.Yu., Gureev V.M., Danelyan L.S., Korshunov S.N. et al. // Proc. of the 2nd IEA International Workshop on Beryllium Technology for Fusion, CONF-9509218, Jackson Lake Lodge, Wyoming, USA. – 1995. - P. 315-331.
3. Self-sputtering of beryllium and sputtering and erosion of C-C composite in the experiments on plasma disruption simulation / Gureev V.M., Guseva M.I., Korshunov S.N. et al. // J. Nucl. Mater. - 1995. - V. 220-222. - P. 957-960.
4. Investigation of the beryllium ion-surface interaction / Guseva M.I., Birukov A.Yu., Gureev V.M., Danelyan L.S., Korshunov S.N. et al. // J. Nucl. Mater. - 1996.-V.233-237.-P. 681-687.
5. Особенности накопления ионов водорода в бериллии при больших дозах облучения / Бирюков А.Ю., Гуреев В.М., Гусева М.И., Коршунов С.Н. и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. -1996.-№1.-С. 94-97.
6. Investigation of Beryllium Self-Sputtering / Guseva M.I., Korshunov S.N., Gureev V.M. et al. // J. Nucl. Mater. - 1997. - V. 241-243. - P. 1117-1121.
7. Гусева М.И., Коршунов С.Н. Исследование распыления бериллия ионами бериллия // Материалы VII Международного совещания «Радиационная физика твердого тела». Севастополь, 1997. - М.: МИЭМ (ТУ). - 1997. - С. 104-106.
8. Energy dependences of sputtering yields of Be, Be-C and Be-W films by Be⁺ ions / Korshunov S.N., Guseva M.I., Gureev V.M. et al. // Proc. of 3^d IEA International Workshop on Beryllium Technology for Fusion. JAERI-Conf 98-001, Mito City, Japan.–1998.–P.216-220.
9. Investigation of the elemental composition of beryllium surface after ion self-sputtering at different angles of irradiation / Guseva M.I., Danelyan L.S., Korshunov S.N. et al. // Surface Investigation. - 1998. - V. 13. - P. 1039-1042.
10. Deuterium behaviour in tungsten and graphite at combined stationary and power pulse plasma flow action / Korshunov S.N., Vasiliev V.I., Guseva M.I. et al. // Proceedings of International Workshop on Hydrogen Recycle at Plasma Facing Materials. Tokyo, Japan. - 1998. - P. 162-176.
11. Guseva M.I., Suvorov A.L., Korshunov S.N., Lazarev N.E. Sputtering of beryllium, tungsten, tungsten oxide and mixed W-C layers by deuterium ions in the near-threshold energy range // J. Nucl. Mater. – 1999. – V. 266-269. – P. 222-227.

12. Коршунов С.Н. Особенности накопления дейтерия в вольфраме и перепыленных слоях W-C при воздействии потоков стационарной и мощной импульсной плазмы // Труды IX Междунац. совещ. "Радиационная физика твердого тела". Севастополь, 1999. – М.: МГИЭМ (ТУ).–1999.– С.562-571.
13. The Effect of Radiation Damage and Helium on Hydrogen Trapping in Beryllium / Guseva M.I., Gureev V.M., Danelyan L.S., Korshunov S.N. et al. // Proc. of Intern. Workshop on Hydrogen Recycle at Plasma Facing Materials. S. Petersburg – 1999. Kluwer Academic Publishers, Netherlands. –2000.– P.265-272.
14. Fusion safety studies in Russia from 1996 to 2000 / Kolbasov B.N., Biryukov A.Yu., Davydov D.A., Guseva M.I., Khripunov B.I., Korshunov S.N. et al. // Fusion Engineering and Design. – 2001. – V. 54. – P. 451-464.
15. Peculiarity of deuterium ions interaction with tungsten surface in the condition imitating combination of normal operation with plasma disruption in ITER / Guseva M.I., Vasiliev V.I., Gureev V.M., Danelyan L.S., Khripunov B.I., Korshunov S.N. et al. // J. Nucl. Mater. – 2001. – V. 290-293. – P. 1069-1073.
16. Имитация влияния нейтронного облучения на накопление водорода в бериллии / Гусева М.И., Гуреев В.М., Данелян Л.С., Коршунов С.Н. и др. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2001. – Вып. 1. – С. 44-50.
17. Study of co-deposited carbon layers and of mixed (W+C) layers on tungsten and graphite in a plasma accelerator / Guseva M.I., Gureev V.M., Danelyan L.S., Korshunov S.N. et al. // Vacuum. – 2002. – V. 67. – P. 253-260.
18. Эрозия вольфрама в экспериментах по имитации работы дивертора реактора ИТЭР / Гусева М.И., Гуреев В.М., Данелян Л.С., Коршунов С.Н. и др. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2002. – Вып. 3-4. – С. 20-30.
19. Tungsten erosion under simulation of ITER divertor operation / Guseva M.I., Gureev V.M., Danelyan L.S., Kolbasov B.N., Korshunov S.N. et al. // Plasma Devices and Operations. – 2003. – V. 11. – No. 3. – P. 141-153.
20. Guseva M.I., Martynenko Yu.V., Korshunov S.N. Investigation of plasma interaction with carbon based and mixed materials related to next-generation fusion devices // Atomic and Plasma-Material Interaction Data for Fusion (Supplement to J. Nucl. Fusion). – 2003. – V. 12. – P. 31-66.
21. Эрозия материалов ИТЭР и продукты их эрозии в экспериментах по имитации нормального режима ИТЭР с учетом срывов плазмы / Гусева М.И., Гуреев В.М., Данелян Л.С., Колбасов Б.Н., Коршунов С.Н. и др. // ВАНТ. Сер. Электрофизическая аппаратура. – 2004. – Вып. 2(28). – С. 51-59.
22. Deuterium accumulation in beryllium exposed to stationary deuterium plasma / Guseva M.I., Gureev V.M., Danelyan L.S., Kolbasov B.N., Korshunov S.N. et al. // Proc. of the 7th IEA International Workshop on Beryllium Technology for Fusion. INL/EXT-06-01222, Santa Barbara, USA. – 2006. - P. 71-75.

