

Экспериментальное изучение циклического воздействия плазмы на вольфрам

© А.В. Воронин,¹ А.Е. Александров,¹ Б.Я. Бер,¹ П.Н. Брунков,¹ А.А. Борматов,² В.К. Гусев,¹
Е.В. Демина,³ А.Н. Новохацкий,¹ С.И. Павлов,¹ М.Д. Прусакова,³ Г.Ю. Сотникова,¹ М.А. Яговкина¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого,
195251 Санкт-Петербург, Россия

³ Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
119991 Москва, Россия
e-mail: voronin.mhd@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 15 июля 2015 г.)

Представлены экспериментальные результаты многократного воздействия на вольфрам водородной, дейтериевой и гелиевой плазмой, создаваемой плазменной пушкой и плазмой токамака Глобус-М. Измерена температура поверхности в процессе облучения двухцветным пирометром с временным разрешением $\geq 1 \mu\text{s}$. Проведены исследования морфологии поверхностного слоя и рентгеноструктурный анализ вольфрама после многократного облучения плазмой в различных условиях. Обнаружено наибольшее уменьшение параметра решетки в образце с максимальным количеством циклов облучения. Показано, что морфология поверхности вольфрама, облученного водородной плазмой пушки и дейтериевой плазмой токамака Глобус-М, изменилась — структура сглаживалась. Характерная глубина слоя, в котором накапливались примеси, превышала $0.5 \mu\text{m}$. Для образца, облученного 1000 импульсами пушки и 2370 импульсами токамака, эта глубина была наибольшей. Показано, что гелиевая струя плазменной пушки позволяет моделировать воздействия ионов гелия на материалы дивертора ИТЭР — создавался слой субмикрочастиц (пузыри).

Взаимодействие плазмы с поверхностью является важной проблемой создания защитных материалов дивертора Международного Термоядерного Экспериментального Реактора (ИТЭР). Его основные функции заключаются в поглощении теплового потока, выходящего из пристеночной плазмы и отводе гелия, который является продуктом сгорания в реакции термоядерного синтеза. Предполагается, что стенки дивертора в области выхода внешней ветви сепаратрисы будут облучаться потоком тепла в результате нестационарных периферийных неустойчивостей плазмы — Edge Localized Mode (ELM-событий) $\sim 10 \text{ MWm}^{-2}$ и потоком частиц гелия $\sim 10^{24} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ [1,2]. Существующие токамаки не могут генерировать тепловые потоки, необходимые для реактора. В настоящее время наиболее адекватное взаимодействие плазмы со стенкой в ИТЭР может быть экспериментально смоделировано и исследовано в реальных токамаках, оснащенных образцами, предварительно облученными (поврежденными) с помощью альтернативных источников тепла большой мощности. Такие эксперименты сосредоточены как на изучении свойств материалов, так и на поведении параметров плазмы токамака. Анализ свойств и характеристик поверхностных слоев вольфрама, предназначенного для использования в диверторе, подвергшихся облучению мощными потоками плазмы с различным составом рабочего газа (H, D, He), необходим для разработки защитных элементов реактора. Настоящая работа направлена на экспериментальное изучение циклического воздействия тепловых

потоков на вольфрам, создаваемых плазменной пушкой [3] и плазмой токамака Глобус-М [4]. Представлены экспериментальные результаты по взаимодействию вольфрамовых тайлов с водородной, дейтериевой и гелиевой плазмами.

Ранее авторами были представлены первые результаты исследований циклического воздействия водородной струи плазменной пушки, имитирующей нестационарные тепловые нагрузки (ELM-события) на вольфрамовые элементы, разрабатываемые для дивертора ИТЭР. В ходе исследований были обнаружены значительные изменения морфологии поверхностного слоя, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM) (рис. 1, а) [5,6]. После 100-кратного облучения образовывалась столбчатая или „хребтовая“ структура, перпендикулярная облучаемой поверхности. 1000-кратное облучение изменяло радикально характер топографии. Происходила смена механизма разрушения — утонченные „хребты“ расплавились с образованием капельных структур. Поверхность становилась грубой, формировался рекристаллизованный слой глубиной $\sim 100 \mu\text{m}$. Образовывался рыхлый слой под облучаемой поверхностью.

Разработанный IoffeLED Ltd. быстродействующий двухцветный пирометр позволил измерить температуру поверхности вольфрама в процессе облучения потоком плазменной струи (рис. 2, а) [7]. Видно, что температура поверхности нагревалась до 4000°C и быстро остывала. Весь процесс продолжался $\sim 10 \mu\text{s}$.

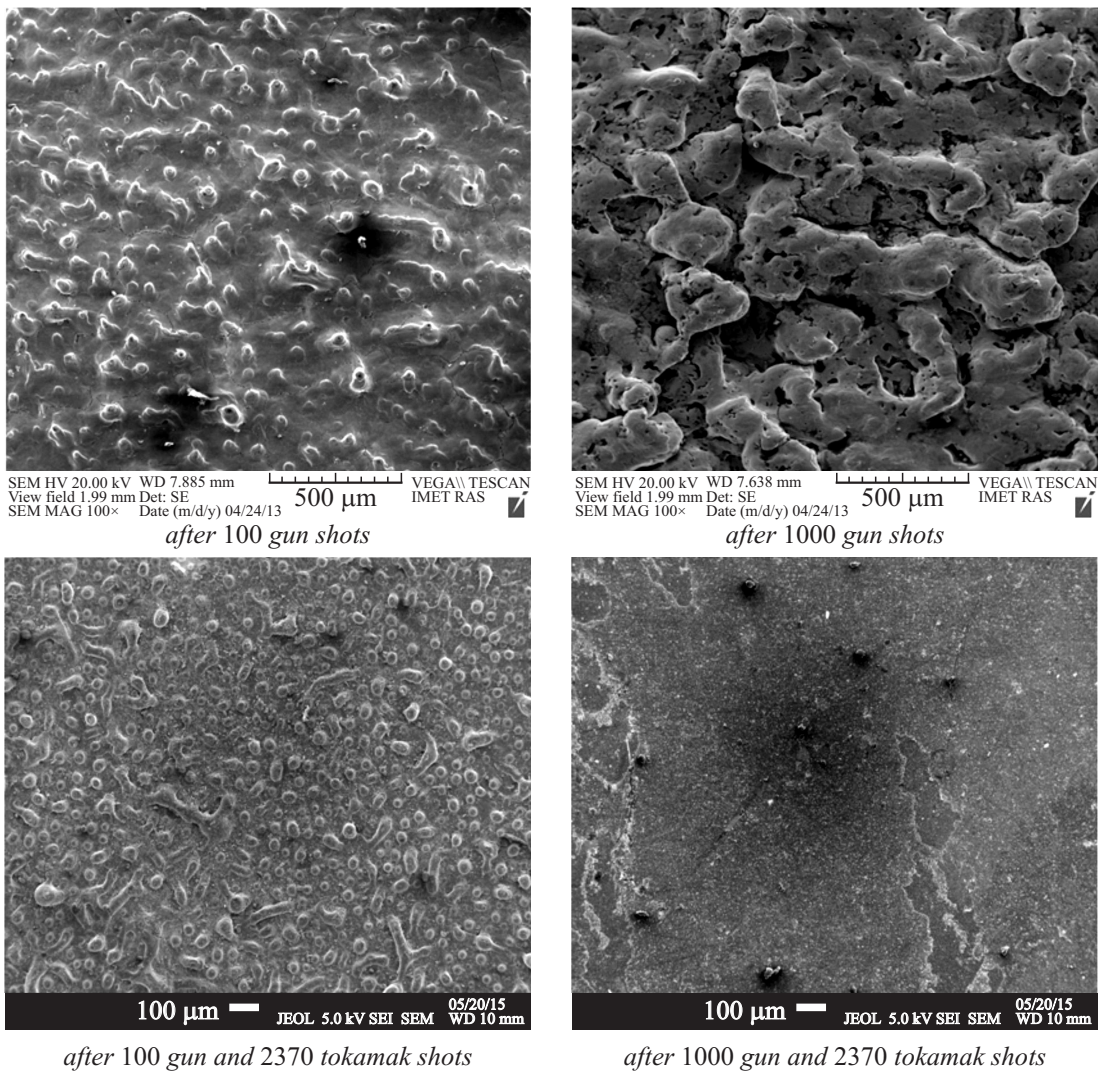


Рис. 1. Микроструктура поверхности (SEM) Plansee Double Forged вольфрама после многократного облучения потоком водородной плазменной пушки и дейтериевой плазмой токамака Глобус-М. Параметры струи плазменной пушки: длительность импульса $15 \mu\text{s}$, тепловая нагрузка $\leq 100 \text{ GW/m}^2$, тепловой фактор $\leq 230 \text{ MJ m}^{-2} \text{ s}^{-1/2}$. Параметры плазмы Глобус-М: длительностью импульса $\sim 70 \text{ ms}$, тепловая нагрузка $\leq 2.5 \text{ MW/m}^2$, тепловой фактор $\leq 1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ s}^{-1/2}$.

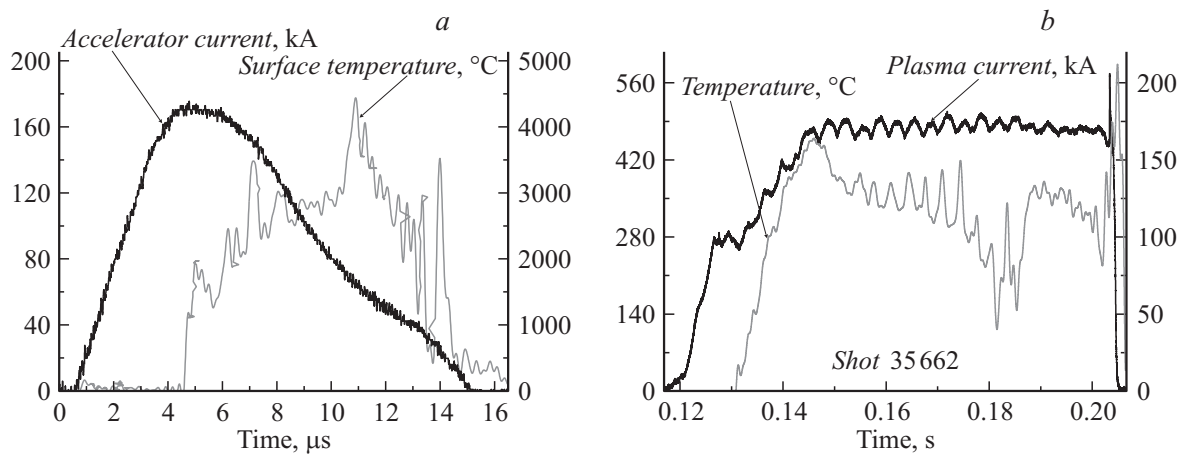


Рис. 2. Зависимости тока и температуры поверхности вольфрама от времени при облучении: *a* — потоком струи плазменной пушки, *b* — плазмой токамака Глобус-М.

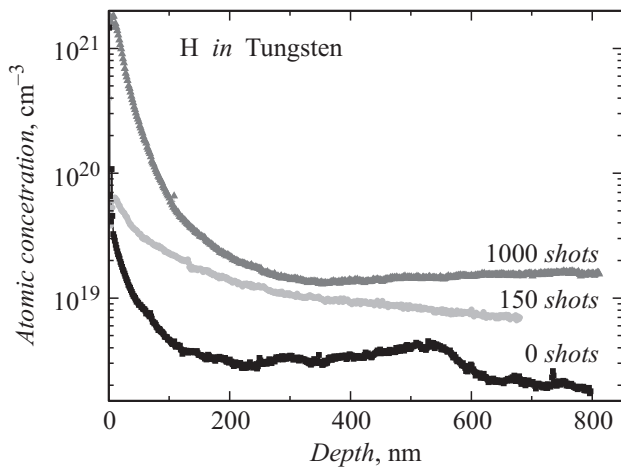


Рис. 3. Профили распределения водорода по глубине в образцах JSC POLEMA-вольфрама после многократного облучения потоком водородной плазменной пушки.

Анализ состава поверхностного слоя по глубине образцов проводился с помощью SIMS CAMECA IMS 7f. На рис. 3 представлены зависимости распределения водорода в образцах JSC POLEMA-вольфрама

после многократного облучения потоком водородной плазменной пушки. Видно, что глубина проникновения водорода в образец превышала 800 nm. Наибольшее количество водорода накапливалось в образце, облученном максимальным количеством импульсов.

Вольфрамовые образцы, предварительно облученные потоком водородной плазменной пушки, были установлены вблизи внешней ветви выхода сепаратрисы в области нижнего дивертора токамака Глобус-М. Тепловая нагрузка на дивертор достигала $\sim 2.5 \text{ MW/m}^2$. Первые результаты взаимодействия дейтериевой плазмы токамака с поверхностью тайлов, поврежденными ELM-событиями, были представлены в работах [8,9]. Инфракрасная камера регистрировала неоднородное поле температур на поверхности вольфрамовых тайлов. Измерения показали, что сразу после окончания разряда температура поверхности поврежденных образцов вольфрама увеличивалась по сравнению с температурой поверхности неповрежденных образцов. Можно предположить, что отвод тепла от поверхности поврежденных тайлов ELM-событиями оказался затрудненным из-за сформировавшегося рыхлого слоя под поверхностью.

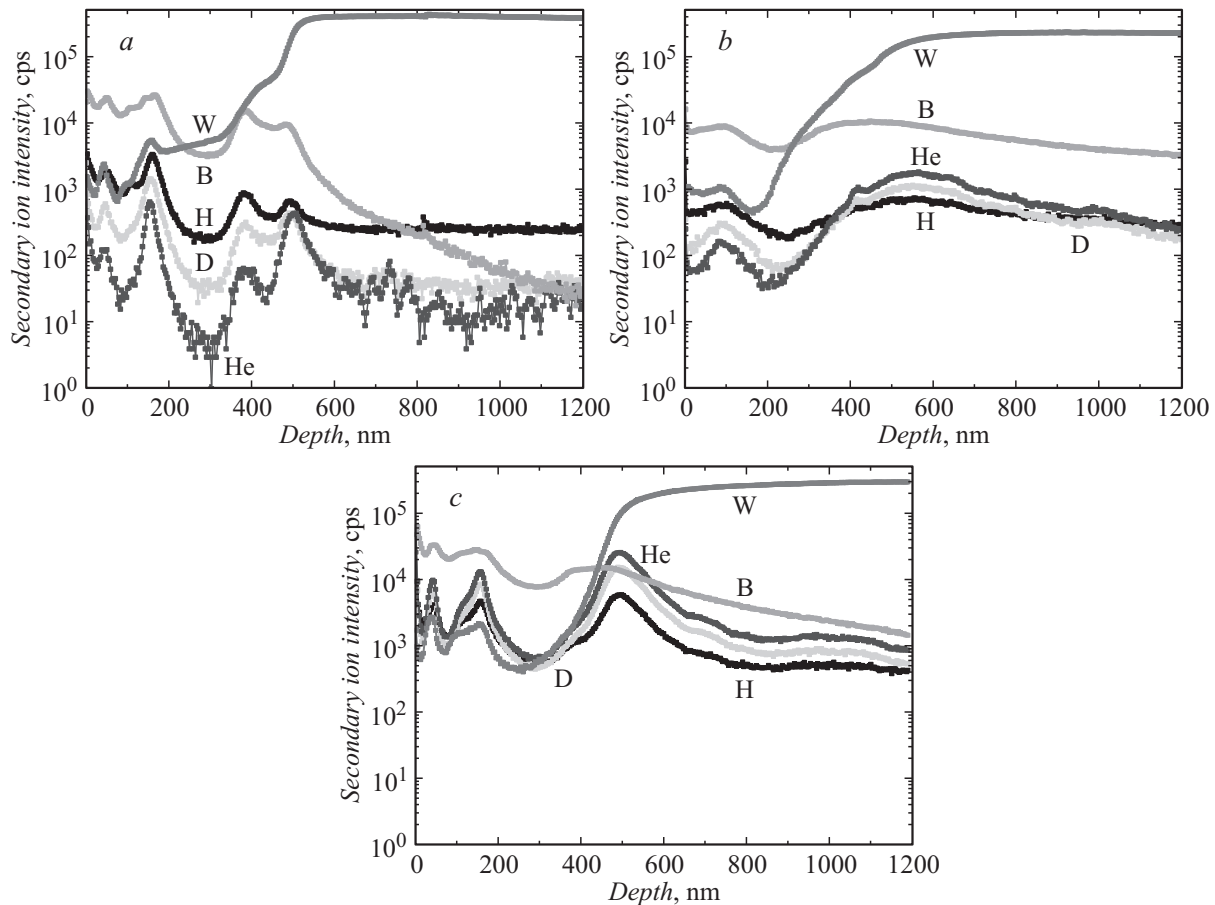


Рис. 4. Профили распределения элементов по глубине в образцах Plansee Double Forged вольфрама после облучения потоком водородной плазменной струи и дейтериевой плазмой токамака Глобус-М: *a* — 2370 tokamak shots, *b* — 100 gun+2370 tokamak shots, *c* — 1000 gun+2370 tokamak shots.

Микроструктура образцов вольфрама по данным рентгеновской дифрактометрии

Название образца	Количество облучений потоком водородной плазменной пушки	Количество облучений плазмой токамака Глобус-М	(Текстура) ОКР, nm 1) средние размеры ОКР, nm; 2) параметр ОЦК-решетки, Å	Нарушенная область: 1) средние размеры ОКР, nm; 2) микронапряжения	Прочее
Initial	0	0	(100), 330; (111), 120; 1) 150; 2) $a = 3.1746$	Нет	
100 gun shots	100	0	Текстура не обнаружена 2) $a = 3.1658$	1) 50; 2) 0.5	Нарушенная область составляет ~ 50% области анализа
1000 gun shots	1000	0	Текстура не обнаружена 2) $a = 3.1592$	1) 45; 2) 0.35	Нарушенная область составляет ~ 93% области анализа
2370 tokamak shots	0	2370	Текстура не обнаружена	1) 40; 2) 0.75	Нарушенная область составляет ~ 80% области анализа
100 gun+2370 tokamak shots	100	2370	Текстура не обнаружена	1) 50; 2) 0.5	Нарушенная область составляет ~ 72% области анализа
1000 gun+2370 tokamak shots	1000	2370	(100), 140; (111), 70; 1) 100;	Нарушенная область не регистрируется 2) 0.07	

Высокоскоростной двухцветный пирометр с пространственным разрешением ~ 1 см регистрировал локальную температуру поверхности в области дивертора (рис. 2, *b*). Видно, что температура поверхности тайлов достигала максимальных значений в моменты роста и срыва тока ($\geq 400^\circ\text{C}$). Радиальное смещение внешней ветви сепаратрисы в течение разряда могло определять изменение локальной температуры поверхности во времени.

После 2370 разрядов токамака (полная длительность ~ 200 s) образцы Plansee Double Forged вольфрама, облученные потоком водородной плазменной пушки, были извлечены для анализа. Было обнаружено, что поверхность вольфрама после облучения дейтериевой плазмой токамака Глобус-М изменилась — грубая столбчатая структура сгладилась или исчезла вовсе. (рис. 1, *b*). Можно предположить, что последующее облучение плазмой токамака постепенно удаляло эту нарушенную (поврежденную плазменной пушкой) область.

Проведен анализ состава поверхностного слоя облученных образцов после облучения потоком водородной плазменной струи и дейтериевой плазмой токамака. На рис. 4 представлены профили распределения элементов по глубине в образцах Plansee Double Forged вольфрама. Видно, что характерная глубина слоя, в котором накапливались примеси, превышала $0.5 \mu\text{m}$. Для образца, облученного 1000 импульсами пушки и 2370 импульсами токамака (рис. 4, *c*), эта глубина и количество примеси были наибольшими. В основном в

слое накапливалась примесь бора (боронизация камеры токамака проводилась регулярно с целью улучшения воспроизводимости разрядов). Количество других элементов в слое не превышало нескольких процентов.

Микроструктура приповерхностной области образцов Plansee Double Forged вольфрама исследовалась рентгенодифракционным методом на дифрактометре D2Phase фирмы Bruker AXS с использованием программ Topas и EVA для обработки рентгенограмм, а также на дифрактометре ДРОН-6 в $\text{CuK}\alpha$ -излучении. Полученные результаты приведены в таблице. Образцы исследованного вольфрама представляли собой одинаковые прямоугольные параллелепипеды размером $12 \times 12 \times 5$ mm. Исходный (необлученный) вольфрам представлял собой поликристаллический образец, текстурированный по плоскостям (100) и (111), со средним размером области когерентного рассеяния (ОКР), равным 150 nm, и выделенным размером ОКР (равным 120 nm) кристаллитов, расположенных кристаллографическими плоскостями (111) параллельно поверхности образца.

Образцы, подвергшиеся облучению водородной пушкой, показывали наличие нарушенной области (области перекристаллизации вольфрама), которая характеризовалась уменьшением ОКР по сравнению с исходным образцом и некоторым уменьшением параметров элементарной ячейки, что проявлялось на дифракционных кривых „затяжкой“ интенсивности в область больших углов 2θ (рис. 5, *b, c*). Пики приобретали несколько треугольную форму. Максимальное смещение в область меньших углов имело отражение от нарушенной обла-

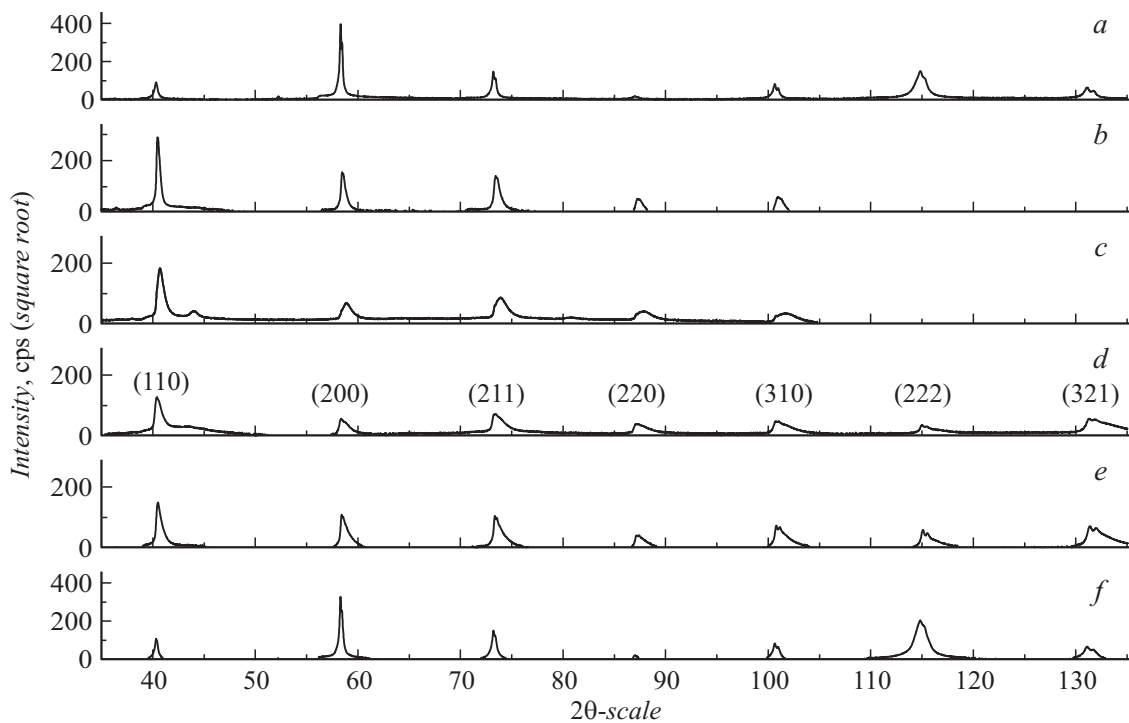


Рис. 5. Дифрактограммы интенсивностей различных отражений Plansee Double Forged вольфрамовых образцов: *a* — initial, *b* — 100 gun shots, *c* — 1000 gun shots, *d* — 2370 tokamak shots, *e* — 100 gun+2370 tokamak shots, *f* — 1000 gun+2370 tokamak shots.

сти в образце, подвергшемся 1000-кратному облучению пушки (1000 gun shots). Похожую картину демонстрировал образец, подвергшийся только облучению плазмой токамака (2370 tokamak shots) (рис. 5, *d*). Дифракционные кривые незначительно смещены относительно пиков необлученного вольфрама. Однако полученные нарушения приводили не столько к уменьшению ОКР, сколько к увеличению микронапряжений.

В образце, подвергшемся 1000-кратному облучению потоком водородной плазменной пушки и облучению плазмой токамака Глобус-М (1000 gun+2370 tokamak shots), нарушенная область не регистрировалась, и текстура вольфрама повторяла текстуру исходного образца (рис. 5, *a, f*). Подобное явление может быть связано с удалением нарушенной в процессе облучения водородной плазменной пушкой области. Все остальные проанализированные образцы показывали дифрактограммы с соотношением интенсивностей различных отражений, аналогичным данным ICDD (№ 00-004-0806) [10]. Это, вероятно, связано с перекристаллизацией вольфрама после плавления под воздействием облучения. В образце (100 gun+2370 tokamak shots) нарушенная область занимала меньший объем, чем в образце, облученном плазменной пушкой, это может свидетельствовать, что процесс удаления нарушенной области еще только начинался (рис. 5, *e*).

По фазовому составу все образцы представляли собой поликристаллический вольфрам со смещенным центром тяжести пиков в область больших углов. Различие

в параметрах решетки металлического вольфрама и нарушенной области составляло 0.0178 \AA . В образцах 2370 tokamak shots и 1000 gun shots отмечалось присутствие дополнительных фаз. В образце 2370 tokamak shots это карбид бора, а в образце 1000 gun shots — нитрид вольфрама W_2N или WN .

Таким образом, облучение потоком водородной плазменной пушки образцов Plansee Double Forged вольфрама приводило к образованию нарушенной области, характеризующейся уменьшенным значением ОКР и значительными микронапряжениями. Последующее облучение плазмой токамака Глобус-М постепенно удаляло эту нарушенную область. В свою очередь, воздействие только плазмой токамака Глобус-М также формировало нарушенную область, отличающуюся от полученной в результате воздействия плазменной пушки более значительными микронапряжениями.

Взаимодействие потока частиц гелия с поверхностью вольфрама широко исследуется с помощью линейных плазменных устройств и токамаков [11]. В настоящей работе изучалась возможность экспериментального моделирования воздействия гелиевой компоненты плазмы на дивертор реактора с помощью многократного облучения вольфрама потоком гелиевой плазменной пушки. В этом случае температура вольфрама не должна была достигать плавления и составляла $\sim 1000^\circ\text{C}$. Видно, что многократное воздействие плазменной струи формировало пузыри и поры (рис. 6). В больших блочных областях происходила трансмутация структуры,

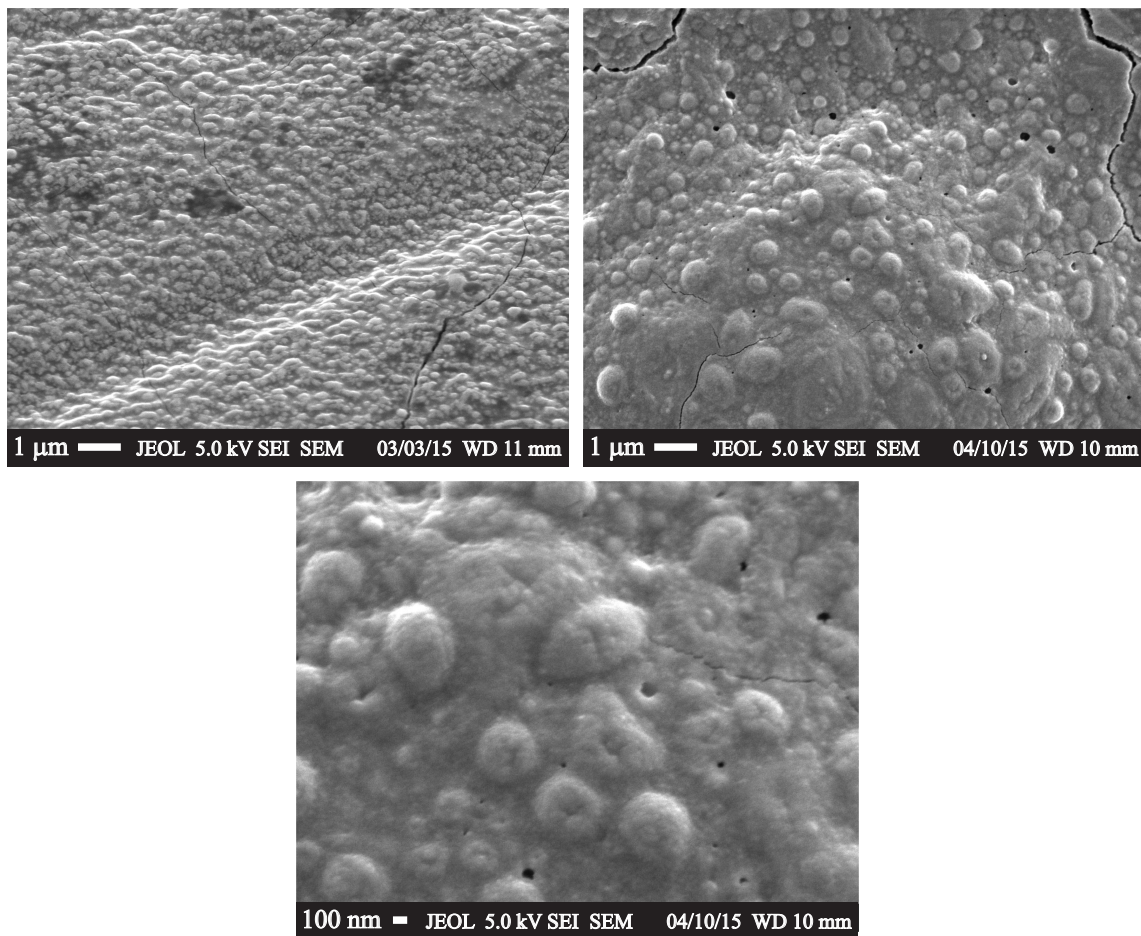


Рис. 6. Микроструктура поверхности (SEM) JSC POLEMA вольфрама после многократного облучения потоком гелиевой плазменной пушки. Количество облучений 1000, длительность импульса $15 \mu\text{s}$, расстояние между пушкой и образцом 250 мм, флюенс $10^{23} - 10^{24} \text{ n/m}^2$, тепловая нагрузка $\sim 0.2 \text{ MJ/m}^2$, тепловой фактор $\leq 50 \text{ MJm}^{-2}\text{c}^{-1/2}$.

связанная с накоплением энергии, происходили перестроечные процессы рекристаллизационного характера на уровне субмикрочастиц вольфрама. Поврежденные гелиевой плазменной пушкой образцы планируется установить в диверторе токамака Глобус-М для проведения дальнейших исследований.

Заключение

Проведено многократное облучение вольфрама импульсным потоком водородной, дейтериевой и гелиевой плазм. Измерена температура поверхности в процессе облучения потоком плазменной струи (около 4000°C) и плазмой токамака ($\geq 400^\circ\text{C}$) с временным разрешением $\geq 1 \mu\text{s}$. Проведены исследования морфологии поверхностного слоя и рентгеноструктурный анализ вольфрама после облучения плазмой в различных условиях. Облучение потоком водородной плазменной пушки приводило к образованию области перекристаллизации вольфрама, характеризующейся уменьшенным значением ОКР и значительными микронапряжениями. После-

дующее облучение плазмой токамака Глобус-М постепенно удаляло эту нарушенную область.

Проведен анализ состава поверхностного слоя образцов. Характерная глубина слоя, в котором накапливались примеси, превышала $0.5 \mu\text{m}$. Для образца, облученного наибольшим количеством импульсов пушки и токамака, эта глубина была максимальной. В основном в слое накапливалась примесь бора. Количество других элементов в слое не превышало нескольких процентов. Показано, что гелиевая струя плазменной пушки позволяет моделировать воздействия ионов гелия на материалы дивертора ИТЭР — образовывались пузыри и поры. Результаты последовательного облучения вольфрама плазмой пушки и токамака подтверждают возможность моделирования условий взаимодействия плазмы со стенкой в диверторе ИТЭР.

Работа выполнена при частичной поддержке МАГАТЭ (контракты № 16939, 16960) с использованием оборудования ЦКП „МДТ“, поддержанного Министерством образования и науки РФ (соглашение № 14.621.21.0007, идентификатор RFMEFI62114X0007).

Список литературы

- [1] *Pitts R.A., Carpentier S., Escourbiac F., Hirai T., Komarov V., Lisgo S.* et al. // *J. Nucl. Mater.* 2013. Vol. 438. P. 48.
- [2] *Ueda Y., Coenen J.W., De Temmerman G., Doerner R.P., Linke J., Philipps V., Tsitron E.* // *Fusion Eng. Des.* 2014. Vol. 89. P. 901–906.
- [3] *Воронин А.В., Гусев В.К., Герасименко Я.А., Судьенков Ю.В.* // *ЖТФ.* 2013. Т. 83. Вып. 8. С. 36.
- [4] *Gusev V.K.* et al. // *Proc. of the 25th IAEA FEC.* Saint Petersburg, Russia, 2014. OV/P-03.
- [5] *Воронин А.В., Гусев В.К., Демина Е.В., Новокацкий А.Н., Прусакова Н.Д.* // *Письма в ЖТФ.* 2014. Т. 40. Вып. 24. С. 120.
- [6] *Voronin A.V., Gusev V.K., Demina E.V., Ibyaminova A.D., Lepikhov S.A., Miroshnikov I.V., Minaev V.B., Mukhin, Novokhatsky A.N., Petrov Yu.V., Prusakova M.D., Sakharov N.V., Tolstyakov S.Yu.* // *Proc. of the 41th European Physical Society Conference on Plasma Physics,* Berlin, Germany, 2014. P4-035.
- [7] электронный ресурс. Режим доступа: http://www.ioffeled.com/index.php?option=com_content&view=article&id=31&Itemid=80.
- [8] *Анкудинов А.В., Воронин А.В., Гусев В.К., Герасименко Я.А., Демина Е.В., Прусакова М.Д., Судьенков Ю.В.* // *ЖТФ.* 2014. Т. 84. Вып. 3. С. 36.
- [9] *Novokhatsky A.N.* et al. // *Proc. of the 25th Fusion Energy Conference* St. Petersburg, Russia, 2014. MPT/P8-15.
- [10] *Уманский Я.С., Скаков Ю.А., Иванов А.Н., Расторгуев Л.Н.* Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. М.: Металлургия, 1982. 631 с.
- [11] *Ueda Y., Peng H.Y., Lee H.T., Ohno N., Kajita S., Yoshida N., Doerner R., De Temmerman G., Alimov V., Wright G.* // *J. Nucl. Mater.* 2013. Vol. 442. S267–S272.