

Министерство науки и высшего образования РФ  
Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»  
Национальный исследовательский ядерный университет  
«МИФИ»

**МАТЕРИАЛЫ  
XXII КОНФЕРЕНЦИИ**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ  
ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Москва, НИЯУ МИФИ, 23-24 января 2019 г.

Москва  
2019

ББК 22.333  
УДК 533.9 (06)  
В 40

Материалы XXII конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью». Москва, 23-24 января 2019 г.  
М.: НИЯУ МИФИ, 2019 г., 140 с.

Сборник содержит материалы докладов, представленных на ежегодно проводимую в НИЯУ МИФИ 22-ю конференцию по взаимодействию плазмы с поверхностью. Тематика конференции охватывает экспериментальные и теоретические исследования взаимодействия плазмы с поверхностью в установках управляемого термоядерного синтеза. Сборник сформирован по мере поступления докладов, которые опубликованы в авторской редакции при минимальной редакционной правке.

*Редакционная коллегия:*

*В.А. Курнаев,  
Ю.М. Гаспарян,  
М.И. Шутикова*

ISBN 978-5-7262-2542-5

© Национальный исследовательский ядерный университет  
«МИФИ», 2019

Программа XXII конференции  
«ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ»

Заседание №1

Среда, 23 января

начало в 09.50

Аудитория Актовый зал

Председатели – профессор КУРНАЕВ В.А., профессор ЧЕРНОВ В.М.

9.00– 9.50	Регистрация участников
9.50– 10.00	Открытие
10.00– 10.25	<b>Б.В. КУТЕЕВ</b> НИЦ «Курчатовский институт», Москва, РФ <b>Источники термоядерных нейтронов для развития материалов и гибридных технологий</b>
10.25– 10.50	<b>В.М. ЧЕРНОВ<sup>1,2</sup>, М.В. ЛЕОНТЬЕВА-СМИРНОВА<sup>1,2</sup>, М.М. ПОТАПЕНКО<sup>1</sup>, А.Н. ТЮМЕНЦЕВ<sup>3,4</sup>, А.И. БЛОХИН<sup>1,5</sup></b> <sup>1</sup> АО «Высокотехнологический НИИ неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара», Москва <sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия <sup>3</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия <sup>4</sup> Томский государственный университет, Томск, Россия <sup>5</sup> Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия <b>Малоактивируемые конструкционные материалы для ядерных реакторов деления и синтеза – вызовы и возможности</b>
10.50– 11.20	<b>А.С. КУКУШКИН</b> НИЦ «Курчатовский институт», Москва, РФ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» <b>Физические процессы в пристеночной плазме токамака и их моделирование</b>
11.20– 11.40	Кофе-брейк
11.40– 12.05	<b>S. BREZINSEK</b> Forschungszentrum Juelich <b>Status of European Roadmap in PSI</b>
12.05– 12.30	<b>В.М. САФРОНОВ</b> Частное учреждение Государственной корпорации атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», Москва <b>Повреждения обращенных к плазме материалов ИТЭР: что исследовано и что необходимо изучить</b>

перпендикулярном к плоскости базиса [4]. Целостность материала при этом обеспечивается радиационно-индуцированной пластичностью графита.

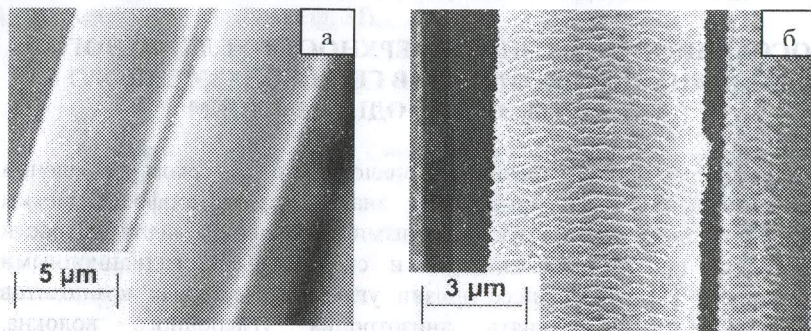


Рис.1. РЭМ-изображения углеродного волокна до (а) и после ионного облучения (б)

При ионном облучении воздействию подвергается тонкий наноразмерный поверхностный слой. В текстурированной оболочке волокна на основе ПАН это приводит к сжатию слоя в направлении оси волокна, его расширению в перпендикулярном оси направлении и к большим механическим напряжениям между облучаемым слоем и остальной частью волокна. Если при нейтронном облучении радиационное формоизменение происходит для всего образца графитового материала, то при ионном облучении макроразмеры волокна измениться не могут, и аккомодация напряжений в оболочке путем пластической деформации вызывает ее гофрирование. Для пластической деформации графита характерным является двойникование с формированием морфологических элементов призматической формы.

#### Список литературы

- [1] Carter G., J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. V.34. pp. R1-R22.
- [2] Begrambekov L., Brosset C., Bucalossi J., et al., J. Nucl. Mater. 2007. V. 363-365. P. 1148-1152.
- [3] Андрианова Н.Н., Аникин В.А. Борисов А.М., Машкова Е.С., Казаков В.А., Овчинников М.А., Савушкина С.В., Изв. РАН. Сер. физич. 2018. Т. 82. С. 140–145.
- [4] Burchell T.D., MRS Bulletin. 1997. V. 22(4). P. 29-35.

А.С. АРАКЧЕЕВ<sup>1,2,3</sup>, А.В. БУРДАКОВ<sup>1,2,3</sup>, И.В. КАНДАУРОВ<sup>1,2</sup>,  
В.В. КУРКУЧЕКОВ<sup>1</sup>, В.А. ПОПОВ<sup>1,2</sup>, Л.И. ШЕХТМАН<sup>1</sup>,  
М.Р. ШАРАФУТДИНОВ<sup>4</sup>, Б.П. ТОЛОЧКО<sup>1,4</sup>, Ю.А. ТРУНЕВ<sup>1</sup>,  
А.А. ВАСИЛЬЕВ<sup>1,2</sup>, Л.Н. ВЯЧЕСЛАВОВ<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Новосибирский национальный исследовательский государственный университет"

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Новосибирский государственный технический университет"

<sup>4</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук

#### СТАТУС ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК НА ВОЛЬФРАМ В ИЯФ СО РАН

В Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН в Новосибирске был разработан испытательный комплекс ВЕТА (Beam of Electrons for material Test Applications) [1] на основе интенсивного импульсного электронного пучка. Комплекс предназначен для экспериментального моделирования воздействия на материалы интенсивных переходных тепловых нагрузок с длительностью и плотностью мощности, аналогичными этим параметрам, ожидаемым в диверторе ИТЭР. Важным отличием комплекса от многих других установок, также предназначенных для экспериментального моделирования воздействия импульсных тепловых нагрузок на материалы, является возможность исследование модификации материала во время воздействия тепловой нагрузки и непосредственно сразу после неё. Электронный пучок позволяет широко варьировать тепловую нагрузку от величины в несколько раз ниже порога плавления вольфрама, до величины, в шесть раз превышающей ее. Нагреваемая площадь порядка  $1 \text{ см}^2$ , что значительно превышает характерные размеры деструктивных процессов, таких как ячейки сети трещин, горячие области и неоднородности расплава. Использование электронного пучка для моделирования теплового воздействия на поверхность материала позволяет применить разнообразную оптическую диагностику для наблюдений in situ динамики процессов поверхностной эрозии при интенсивных термических ударах.

Недавно на установке ВЕТА были получены первые результаты с использованием быстрой визуализации нагретой поверхности образца вольфрама в его собственном тепловом излучении и при освещении светом непрерывного лазера [2, 3]. Неравномерное распределение температуры по всей поверхности, которая нагревается равномерно, наблюдалось во время нагрева и последующего охлаждения. Сеть трещин была видна из-за их более интенсивного теплового излучения. Визуализация с лазерной подсветкой показала начало процесса плавления, которое происходило вблизи пересечений трещин и их краев [2, 3]. Движение слоя расплава под тепловой нагрузкой выше порога плавления наблюдалось в течение одного импульса нагрева с использованием четырех независимых ПЗС-камер. Четыре кадра были записаны с экспозицией 10 мкс и частотой кадров 50 кГц с разрешением 1,4 мегапикселей [1]. Динамика и распределение микрочастиц, выбрасываемых из слоя расплава, изучались с помощью многоканальной регистрацией света непрерывного лазера, дифрагированного на этих микрочастицах, а также их быстрой визуализацией с помощью ПЗС камер. Дифракция использовалась для изучения временного изменения интенсивности потока микрочастиц и характерного размера микрочастиц, выбрасываемых из расплава, в зависимости от интенсивности импульсного нагрева. Используя эту методику, был обнаружен порог интенсивности нагрева вблизи  $HFF = 170 \text{ МДж м}^{-2} \text{ с}^{-0,5}$ , начиная с которого начинает быстро расти количество вольфрама, испускаемого из расплава в виде микрочастиц размером 5-10 мкм [4, 5].

Были разработаны два новых оптических метода для наблюдения *in situ* процесса эрозии вольфрама: непрерывная регистрация рассеяния лазерного излучения от нагретой поверхности и трехмерное отслеживание микрочастиц с помощью быстрых ПЗС камер при трех разных углах обзора. Первые эксперименты с этими диагностиками выявили неожиданно большие задержки растрескивания поверхности под воздействием теплового удара и очень короткую длительность процесса растрескивания, происходящего почти одновременно на всей площади нагрева. Это явление характерно для вольфрама с параллельной и перпендикулярной ориентацией зерен и требует дальнейшего изучения как экспериментального, так и теоретического. Пространственная и временная локализация выброса микрочастиц с поверхности расплава вольфрама допускает интерпретацию с помощью ранее разработанной теоретической модели кипения перегретой жидкости. Сама

диагностическая техника полезна для исследования механизмов разбрызгивания расплава в различных экспериментальных условиях [6].

Кроме оптических диагностик для динамического измерения воздействия импульсного нагрева на материалы сейчас разрабатывается диагностика на основе рассеяния синхротронного излучения на станции “Плазма” [7]. Такая диагностика имеет три принципиальные особенности: измерения с временным разрешением, измерения внутри материала и измерения с пространственным разрешением. Для реализации этой диагностики используется схема дифракции Лауэ на вольфрамовом монокристалле толщиной до 500 мкм. Тепловая нагрузка симулируется YAG лазером с энергозапасом до 50 Дж и длительностью около 140 мкс. При тепловой нагрузке деформируется кристаллическая плоскость, на которой происходит дифракция. Из-за этого меняется положение и форма дифракционного пика. Форма и положение дифракционного пика измеряется детектором DIMEX [8]. Детектор снимает 30 кадров длительностью 10 мкс. По измерению формы пика планируется восстановить динамику распределения деформаций в материале при импульсной тепловой нагрузке. На данный момент продемонстрировано измерение динамики формы дифракционного пика.

#### Список литературы

- [1] Vyacheslavov L.N. et al. 2016 AIP Conf. Proc., 1771, 060004.
- [2] Vasilyev A.A. et al. 2016 AIP Conf.Proc., 1771, 060013.
- [3] Vasilyev A.A. et al. 2016 Nucl.Matter Energy 12 553.
- [4] Kasatov A.A. et al. 2016 AIP Conf. Proc., 1771, 060007.
- [5] Vyacheslavov L.N. et al. 2017 Nucl. Matter and Energy, 12, 494.
- [6] Vyacheslavov L.N. et al. 2018 Phys. Scr., 93, 035602.
- [7] Arakcheev A.S. et al. 2016 Physics Procedia, 84, 184.
- [8] V.M. Aulchenko et al. 2008 JINST, 3, P05005.