

Б.К. Рахадиллов¹, М.К. Скаков¹, Т.Р. Туленбергенов¹, В.К. Виелеба²

¹Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов;

²Вроцлавский политехнический университет, Польша
(E-mail: rakhadilov@mail.ru)

Изменение поверхности вольфрама при облучении плазменным пучком

В статье представлены результаты исследования взаимодействия плазмы с поверхностью вольфрама в плазменно-пучковой установке. Экспериментально изучены изменения структуры вольфрама в результате облучения водородной плазмой. Отмечено, что электронно-микроскопический анализ показал, что при облучении водородной плазмой вольфрама происходит изменение рельефа поверхности, что приводит к эрозии, которая образуется за счет распыления, вызываемого ионной бомбардировкой. Обнаружено, что в результате облучения вольфрама стационарной плазмой в теле зерна образуются ямки травления. Помимо этого, подчеркнуто авторами, в объеме вольфрама создаются микропоры. Исследования вольфрама после облучения плазмой с различным ускоряющим потенциалом показали, что наибольшие повреждения поверхности обнаружены при больших значениях ускоряющего потенциала.

Ключевые слова: вольфрам, облучение, плазма, структура, водород.

Введение

Изучение особенностей воздействия ядерно-физических излучений на конденсированные среды вызывает пристальное внимание исследователей по целому ряду обстоятельств. Во-первых, такие работы важны с точки зрения понимания фундаментальных закономерностей взаимодействия заряженных частиц с твердыми телами с различной электронной структурой, а во-вторых, они имеют важное прикладное значение для создания термоядерных установок [1–3].

Важное значение имеют явления, связанные с изменением структуры поверхности при воздействии плазменных пучков на материалы первой стенки и диверторных пластин термоядерных установок [4, 5]. Результатом воздействия плазмы на материал являются распыление и испарение материала, изменения структуры и фазового состояния материала, образование на поверхности новых химических соединений и т.д. [6]. Сложность и многофакторность взаимодействия плазмы термоядерного реактора с материалами, а также дороговизна натуральных испытаний на полномасштабных установках определяют необходимость проведения таких экспериментов с использованием малых специализированных имитационных установок.

Одной из задач термоядерной энергетики, относящихся к управлению потоками энергии и частиц, является минимизация эрозии материалов как при нормальной работе, так и во время переходных событий, а также соответствующий выбор этих материалов [7]. На сегодняшний день в качестве материалов, обращенных к плазме, принят углеродный материал (композит) для облицовки в области сепаратрисы в диверторе и вольфрам в остальной его части.

Принимая во внимание высокие тепловые нагрузки на диверторную мишень в стационарном режиме, вызывающие возрастание теплового потока, необходимость экспериментального исследования модификации поверхности этих материалов при воздействии стационарной плазмы приобретает особую важность.

В настоящее время одним из наиболее перспективных материалов, обращенных к плазме, является вольфрам, который обладает комплексом уникальных физических свойств: низкий коэффициент физического распыления, высокая температура плавления, высокая теплопроводность, низкое накопление трития [8, 9]. В связи с этим целью настоящей работы является исследование особенности эрозии поверхности вольфрама при облучении потоком водородной плазмы в имитационной плазменной установке.

Материалы и методы исследования

В соответствии с поставленными задачами в качестве объекта исследования был выбран поликристаллический вольфрам марки СВН-1, содержащий 2 % Y, с учетом интереса к применению этой марки вольфрама в термоядерных системах. Образцы в виде цилиндра диаметром 10 мм и высотой

5 мм были вырезаны на электроэрозионном станке. Перед облучением образцы шлифовали и полировали.

Экспериментальное исследование воздействия плазмы на образцы вольфрама было проведено на имитационной плазменной установке [10, 11]. Плазменная установка представляет собой генератор плазмы, в котором для получения плазмы используется пучково-плазменный разряд. Схематическое изображение установки приведено на рисунке 1.

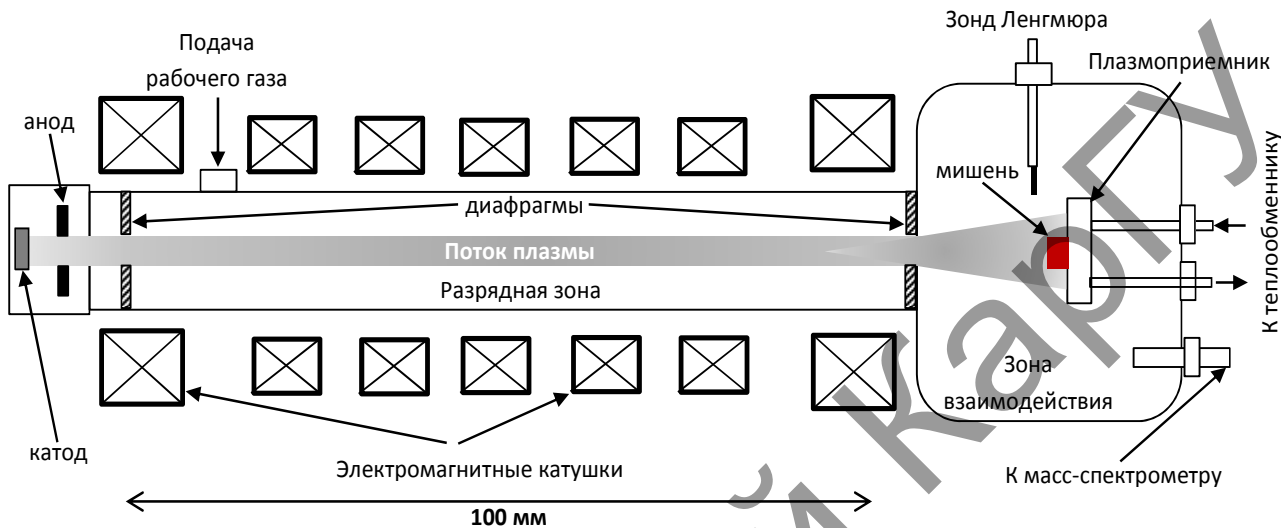


Рисунок 1. Схематическое изображение плазменной установки

Принцип работы установки состоит в следующем. Электронная пушка формирует аксиально-симметричный электронный пучок. Электронный пучок взаимодействует с рабочим газом, подаваемым в разрядную зону, образуя плазменный пучок. Фокусировка плазменного пучка осуществляется при помощи электромагнитной системы, представляющей собой систему катушек.

Облучение образцов вольфрама осуществлялось при мощности первичного пучка 2–2,5 кВт в течение 1 часа. Подаваемый на мишень потенциал варьировался от 0 В до 1600 В. Во время облучения давление в камере составило 2×10^{-3} Тор. В качестве рабочего газа использовался водород особой чистоты.

Исследование микроструктуры образцов вольфрама до и после облучения проводили при помощи оптического микроскопа OLIMPUS BX41M и растрового электронного микроскопа JSM-6390. Выявление микроструктуры осуществлялось химическим травлением в растворе, содержащем 50 % плавиковой кислоты и 50 % азотной кислоты. Химический состав образцов определялся с помощью рентгеноспектрального микроанализа.

Для исследования тонкой структуры поверхностного слоя использовали просвечивающий электронный микроскоп JEM-2100. Исследования проводились методом дифракционной электронной микроскопии тонких фольг при ускоряющем напряжении 125 кВ. Рабочее увеличение в колонне микроскопа выбиралось от 10000 до 80000 крат.

Результаты исследований и их обсуждение

Нами были проведены экспериментальные исследования влияния облучения водородной плазмой на микроструктуру вольфрама. На рисунке 2 показаны металлографические снимки поверхности вольфрама до и после облучения водородной плазмой. Металлографический анализ показал, что облучение водородной плазмой с энергией первичного пучка 2 кВт не приводит к изменению микроструктуры поверхности вольфрама. А после облучения водородной плазмой при энергии первичного пучка 2,5 кВт с потенциалом на мишень от 800 В до 1600 В наблюдается изменение микроструктуры поверхности вольфрама: выявляются границы зерен в результате бомбардировки ионами водорода и наблюдается уменьшение размера зерен.

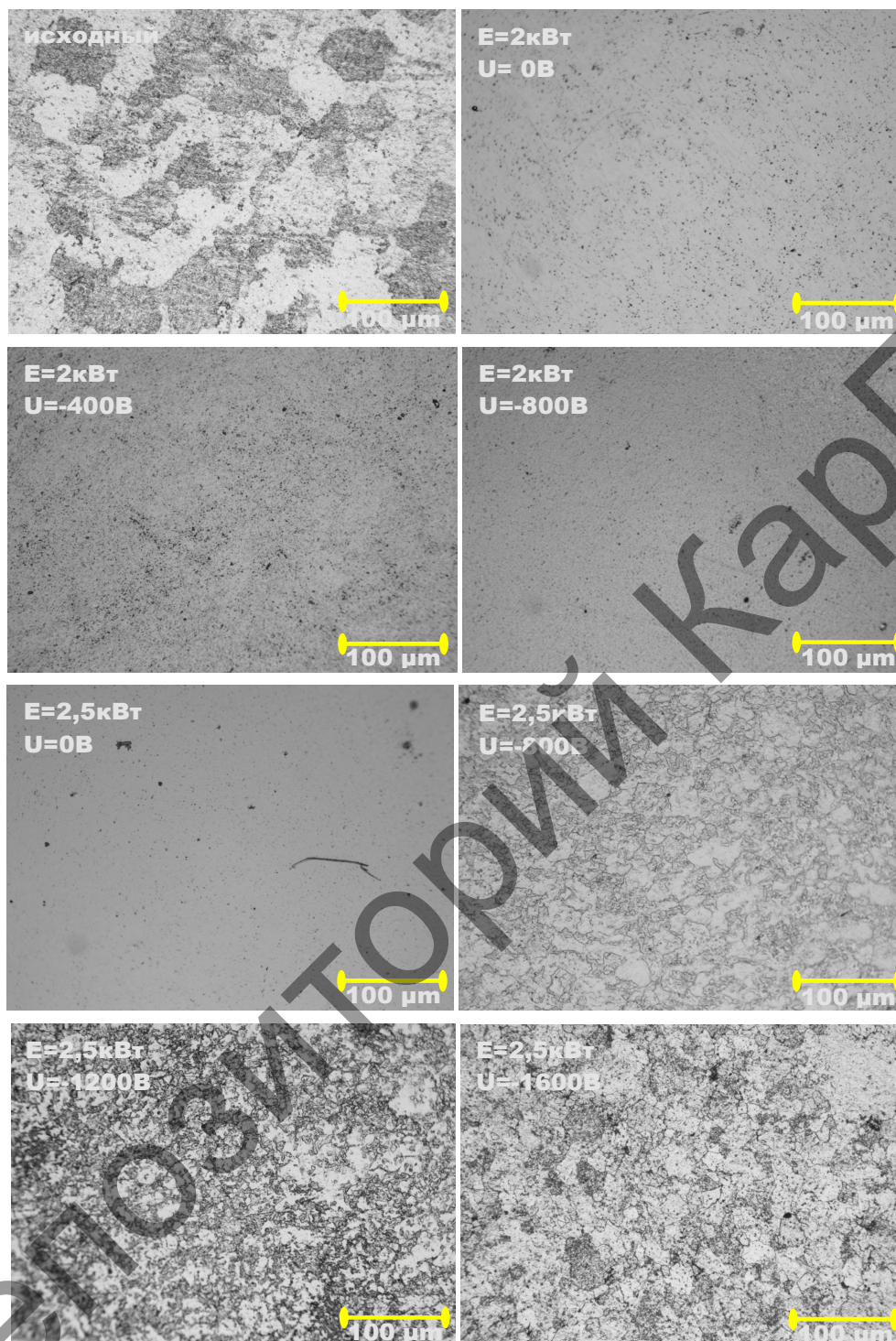
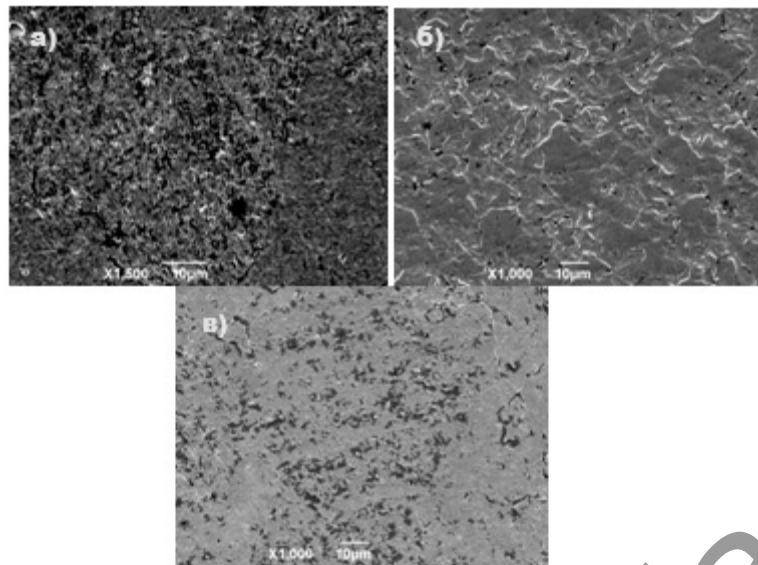


Рисунок 2. Микроструктура поверхности образцов вольфрама до и после облучения водородной плазмой

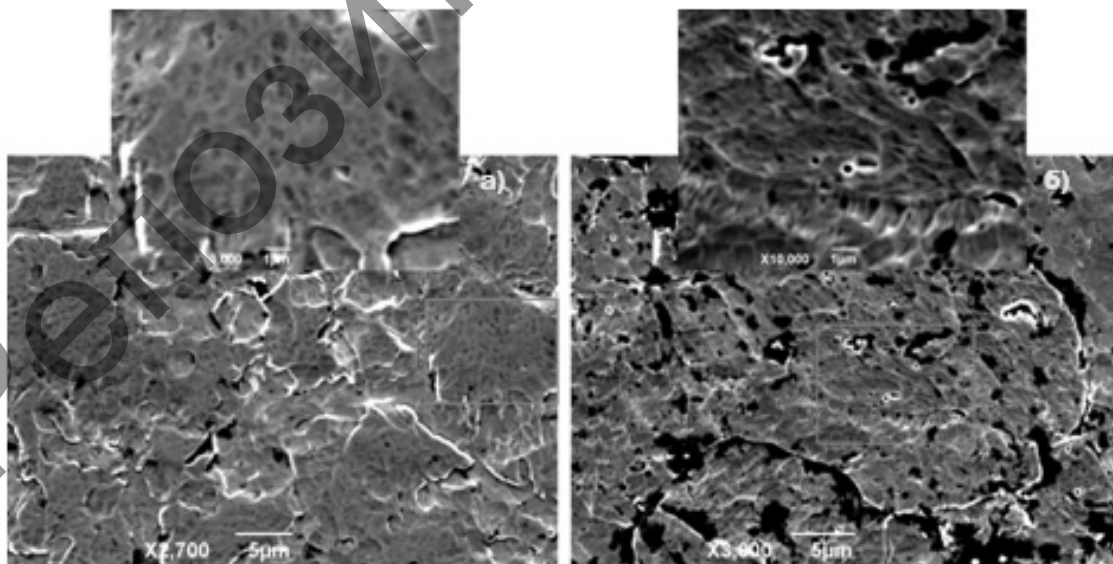
С помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) была исследована структура вольфрамовых образцов, облученных водородной плазмой с энергией 2,5 кВт при ускоряющем потенциале 1200 В (б) и 1600 В. На рисунке 3 показана микроструктура образцов вольфрама до и после облучения водородной плазмой. Обнаружено, что поверхность вольфрама эродирует при облучении водородной плазмой. При этом происходит изменение её рельефа и на поверхности наблюдаются распыленные участки, образующиеся за счет бомбардировки ионами водорода. Из рисунка видно, что на поверхности вольфрама отсутствуют разрушения в виде трещин.



a — до облучения; *б, в* — после облучения плазменным пучком в среде водорода при ускоряющем потенциале 1200 В (*б*) и 1600 В (*в*) соответственно

Рисунок 3. РЭМ-изображения поверхности образцов вольфрама до и после облучения

На рисунке 4 приведены РЭМ-изображения облученных образцов, полученных при больших увеличениях. Топография облученной поверхности свидетельствует о ее сильной эрозии. Видно, что в результате облучения вольфрама стационарной плазмой в теле зерна проявляются ямки травления размером 100–500 нм, как результат вытравливания этих преципитатов. Помимо этого, в объеме вольфрама создаются микротрещины и поры. В частности, при облучении с ускоряющим потенциалом 1600 В образуется большое количество мелких пор размером 0,2–1,0 мкм. Система трещин и пор создает транспортный путь между поверхностью и объемом материала, поэтому можно ожидать глубокое проникновение гелия в объем металла. Причина появления этих структурных нарушений, по-видимому, — механические напряжения в решетке вольфрама, вызванные имплантированным гелием.



Ускоряющие потенциалы: *a* — 1200 В; *б* — 1600 В

Рисунок 4. РЭМ-изображения поверхности образцов вольфрама после облучения плазменным пучком в среде водорода

До и после облучения плазменным пучком был проведен рентгеноспектральный микроанализ поверхности с помощью электронного растрового микроскопа. Результаты рентгеноспектрального микроанализа приведены на рисунке 5. Анализ показал, что в исходном состоянии в составе вольфрама, помимо самого вольфрама, наблюдается углерод, массовая доля которого составляет 8–9 %. Такое сравнительно большое количество углерода, видимо, связано с тем, что в камере микроскопа находился остаточный газ углерода.

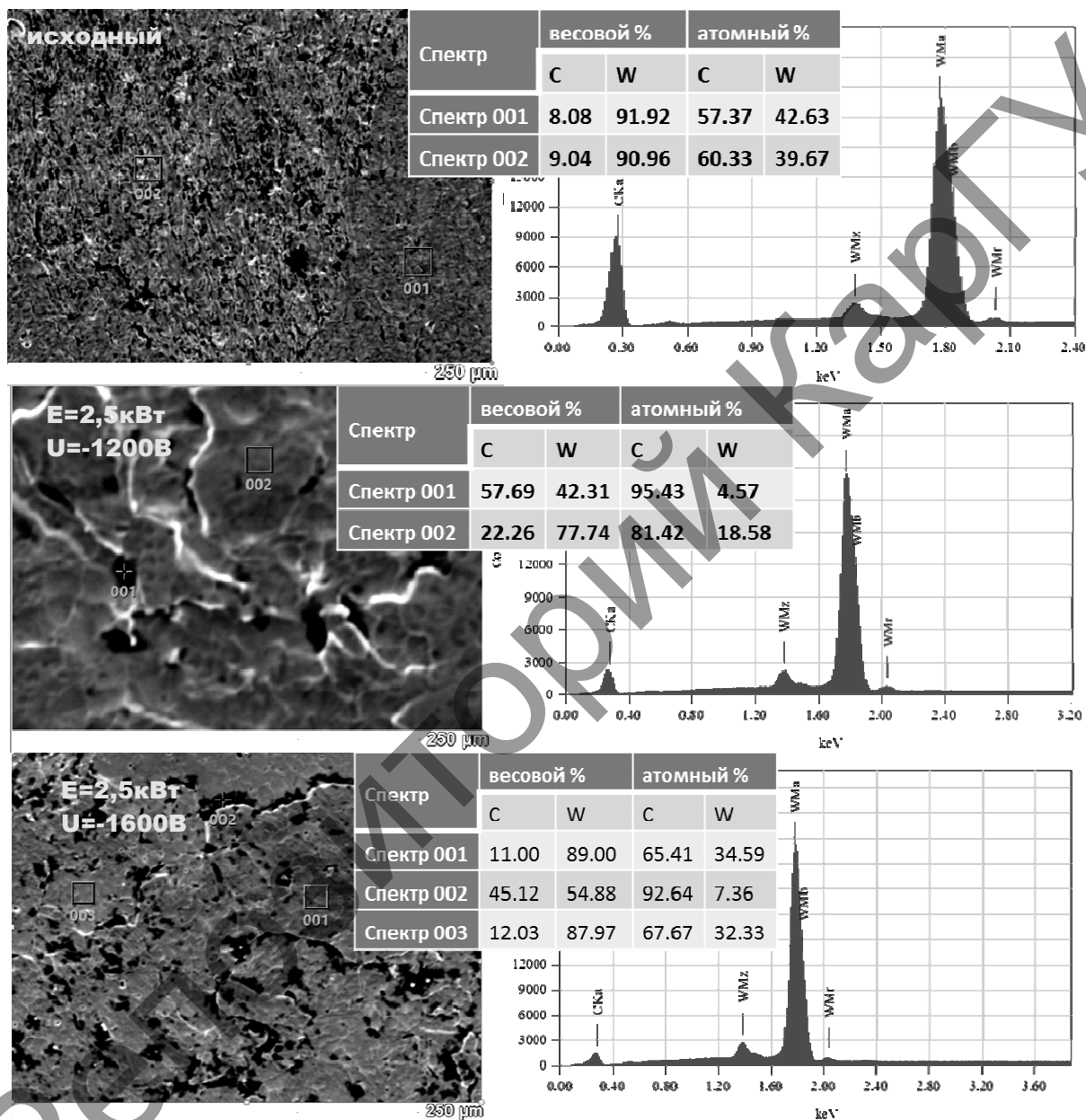
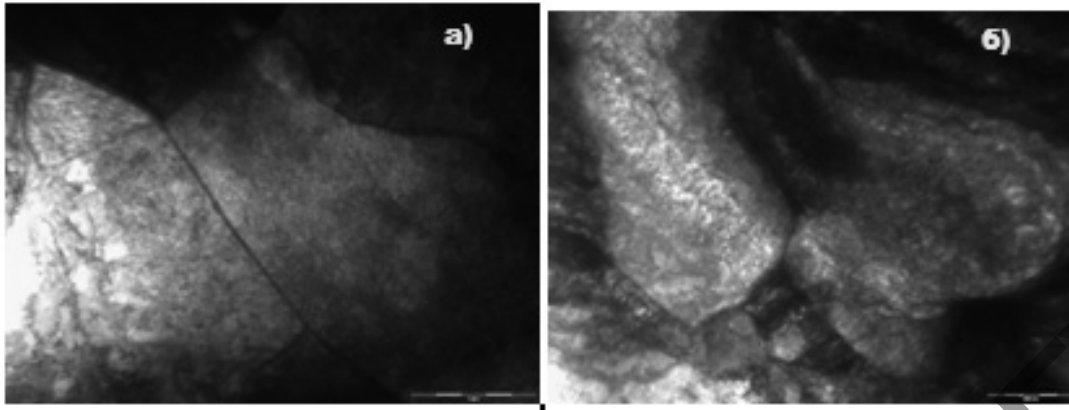


Рисунок 5. Результаты рентгеноспектрального микроанализа образцов вольфрама после облучения водородной плазмой

Тонкая структура вольфрама, наблюдаемая методом просвечивающей электронной микроскопии, представлена на рисунке 6. Хорошо видно, что после облучения структура вольфрама более фрагментирована и характеризуется дефектной субструктурой. Образующаяся дефектность, по-видимому, приближается к дефектности границ зерен. Возможность формирования такой субструктуры зерен при электронно-лучевой обработке обеспечивается повышенным энергетическим состоянием поверхности и подповерхностных слоев, подвергаемых на всем протяжении обработки бомбардировке ионами и нейтральными атомами низкотемпературной плазмы.



a — до облучения; *б* — облучение при ускоряющем напряжении 1600 В

Рисунок 6. Электронно-микроскопические изображения тонкой структуры вольфрама до и после облучения водородной плазмой

Выводы

Анализируя полученные в работе результаты, можно сделать определенные выводы.

1. Экспериментально изучены изменения структуры вольфрама в результате облучения водородной плазмой. Металлографическим анализом определено, что облучение водородной плазмой при энергии первичного пучка 2 кВт не приводит к сильным изменениям микроструктуры поверхности вольфрама. А при облучении водородной плазмой с энергией первичного пучка 2,5 кВт при потенциале на мишень 1200 В и 1600 В наблюдается уменьшение размеров зерен, выявляются границы зерна за счет травления поверхности ионами водорода, а также наблюдаются мелкие дефекты.

2. Электронно-микроскопический анализ показал, что при облучении водородной плазмой вольфрама происходит изменение рельефа поверхности и на поверхности наблюдается эрозия, образующаяся за счет распыления, вызываемого ионной бомбардировкой. Обнаружено, что в результате облучения вольфрама стационарной плазмой в теле зерна образуются ямки травления размером от 100 нм до 500 нм, как результат вытравливания поверхности. Помимо этого, в объеме вольфрама создаются микротрещины и поры. В частности, при облучении при ускоряющем потенциале 1600 В формируется большое количество мелких пор размером от 0,2 мкм до 1,0 мкм.

3. Выявлено, что после облучения структура вольфрама фрагментирована и характеризуется более развитой дефектной субструктурой. Образующаяся дефектность, по-видимому, приближается к дефектности границ зерен. Причиной появления этих структурных нарушений, по-видимому, являются механические напряжения в решетке вольфрама, вызванные имплантированным гелием.

Таким образом, проведенные нами исследования показали перспективность и целесообразность применения имитационного стенда с плазменно-пучковой установкой для экспериментального моделирования процессов взаимодействия материалов ТЯР с плазмой.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки МОН РК на 2015–2017 гг. по программе «Грантовое финансирование научных исследований».

Список литературы

1. Скаков М.К., Ерболатулы Д., Рахадиллов Б.К. Структура и свойства сплава 67КН5Б, обработанного концентрированными потоками энергии // Вестн. НЯЦ РК. — Алматы, 2011. — № 2. — С. 102–105.
2. Дидык А.Ю., Семина В.К., Степанов А.Э., Суворов А.Л., Чеблуков Ю.Н., Халили А. Изменение структуры поверхности Ni, W и хромоникелевой стали X18Н10, облученных высокими флюенсами ионов криптона высоких энергий // Перспективные материалы. — М.: ООО «Интерконтакт Наука», 2001. — С. 58–65.
3. Комаров Ф.Ф. Эффект высокоэнергетической имплантации в металлы // Изв. высш. учеб. заведений. Физика. — 1994. — Т. 5. — С. 23–40.
4. Баязитова Ж.Т., Вертягина Е.Н., Дегтярев В.А., Карпиков А.Н., Кислицин С.Б., Лысухин С.Н. Структура поверхности молибдена, облученного ионами аргона с энергией 100 кэВ // Вестн. ЕНУ им. Гумилева. — 2011. — № 2 (81). — С. 140–146.

- 5 Tazhibayeva I.L., Kulsartov T.V., Gordienko Yu.N. et al. Investigation of parameters of interaction of hydrogen isotopes with liquid lithium and lithium capillary porous system under reactor irradiation // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2015. — Vol. 78, No. 10. — P. 1–12.
- 6 Жетбаев А., Кадыржанов К., Туркебаев Т., Русаков В., Айтманов М. Фазовые преобразования в имплантационных системах металл–металлоид. — Алматы: Ғылым, 1995. — 178 с.
- 7 Shimada V. et al. Progress in the ITER Physics Basis // *FE*. — 2007. — Vol. 47, № 6. — P. 1–8.
- 8 Хрипунов Б.И., Петров В.Б., Корниенко С.Н. и др. Исследования взаимодействия стационарной плазмы с материалами термоядерного реактора на модельных установках // *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*. — 2008. — Вып. 4. — С. 24–31.
- 9 Guseva M.I., Gureev V.M., Khripunov B.I., Kolbasov B.N., Korshunov S.N., Martynenko Yu.V., Petrov V.B., Stolyarova V.G., Strunnikov V.M., Vasiliev V.I. Tungsten erosion under simulation of ITER divertor operation // *Plasma Devices and Operations*. — 2003. — Vol. 11, No. 3. — P. 141–153.
- 10 Рахадиллов Б.К., Туленбергенев Т.Р., Соколов С.В. и др. Исследование взаимодействия плазмы с поверхностью вольфрама в плазменно-пучковой установке // *Вестн. НЯЦ РК*. — 2015. — Вып. 1. — С. 61–65.
- 11 Курнаев В.А. Стенд имитационных испытаний в сопровождение исследований на токамаке КТМ (СИИ-КТМ): Ч. 1. — М.: МИФИ, 2005. — С. 46.

Б.К. Рахадиллов, М.К. Скаков, Т.Р. Туленбергенев, В.К. Виелеба

Плазмалық шокпен сәулеленген кезде вольфрам бетінің өзгеруі

Мақалада плазмалық шокпен сәулелендіру қондырғысында плазманың вольфрамның беткі қабатымен әрекеттесу нәтижелері келтірілген. Су текті плазмамен сәулелендіру нәтижесінде вольфрам құрылымының өзгеруі экспериментті түрде зерттелді. Электронды микроскопиялық талдау вольфрамды су текті плазмамен сәулелендіру барысында беткі құрылысында өзгерістер және беткі қабатында тозандандыру әсерінен эрозия пайда болатынын көрсетті. Авторлар вольфрамды стационарлық плазмамен сәулелендіру кезінде түйіршік құрамында өңделген орындар және вольфрам құрамында қуыстар туындайтыны жайлы қорытынды жасаған. Зерттеу нәтижелері вольфрамды әр түрлі үдемелі потенциалға ие плазмалық сәулелендіруден кейін ең жоғары беткі зақымдану үдемелі потенциалдың жоғары мәндерінде орын алатынын көрсетті.

B.K. Rakhadilov, M.K. Skakov, T.R. Tulenbergenov, W.K. Wieleba

Change the tungsten surface when irradiated by plasma beam

In article show results of research interaction of plasma with a tungsten surface are presented to to a plasma beam installation. Changes of structure of tungsten as a result of radiation are experimentally studied by hydrogen plasma. The electron microscopic analysis showed that at radiation change of a relief of a surface happens hydrogen plasma of tungsten and on a surface the erosion which is formed due to dispersion, caused by ionic bombing is observed. It is revealed that as a result of tungsten radiation stationary plasma in a body of grain forms etching poles. In addition, in volume of tungsten micropores are created. Researches of tungsten after radiation by plasma with various accelerating potential showed that the greatest damages of a surface are found at great values of the accelerating potential.

References

- 1 Skakov M.K., Erbolatuly D., Rahadilov B.K. *Bull. of NNC RK*, Almaty, 2011, 2, p. 102–105.
- 2 Didyk A.Yu., Semina V.K., Stepanov A.E., Suvorov A.L., Cheblukov Yu.N., Halili A. *Perspective materials*, Moscow: Interkontakt Nauka, 2001, p. 58–65.
- 3 Komarov F.F. *News of Higher Schools. Physics*, 1994, 5, p. 23–40.
- 4 Bayazitova Zh.T., Vertyagina E.N., Degtyarev V.A., Karpikov A.N., Kisilitsin S.B., Lysuhin S.N. *Bull. of Gumilev ENU*, 2011, 2(81), p. 140–146.
- 5 Tazhibayeva I.L., Kulsartov T.V., Gordienko Yu.N. et al. *Physics of Atomic Nuclei*, 2015, 78, 10, p. 1–12.
- 6 Zhetbaev A., Kadyrzhhanov K., Turkebaev T., Rusakov V., Aitmanov M. *Phase transformations in the implant systems metal–metalloid*, Almaty: Gylym, 1995, 178 p.
- 7 Shimada V. et al. *FE*, 2007, 47, 6, p. 1–8.
- 8 Hripunov B.I., Petrov V.B., Kornienko S.N. et al. *VANT Ser. Thermonuclear fusion*, 2008, 4, p. 24–31.
- 9 Guseva M.I., Gureev V.M., Khripunov B.I., Kolbasov B.N., Korshunov S.N., Martynenko Yu.V., Petrov V.B., Stolyarova V.G., Strunnikov V.M., Vasiliev V.I. *Plasma Devices and Operations*, 2003, 11, 3, p. 141–153.
- 10 Rahadilov B.K., Tulenbergenov T.R., Sokolov S.V. et al. *Bull. of NNC RK*, 2015, 1, p. 61–65.
- 11 Kurnaev V.A. *Stand simulation tests in support of tokamak KTM (SII-KTM) research*, part 1, Moscow: MIFI, 2005, p. 46.