

## ИЗМЕНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМОЙ

Б.К. Рахадиллов

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. М.К. Скаков

Национальный ядерный центр Республики Казахстан,

Казахстан, г. Курчатов, ул. Красноармейская 2, 071100

E-mail.ru: [rakhadilovb@mail.ru](mailto:rakhadilovb@mail.ru)

## CHANGES OF THE TUNGSTEN SURFACE AT THE HYDROGEN PLASMA IRRADIATION

B.K. Rakhadilov

Scientific Supervisor: Prof., Dr. M.K. Skakov

National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan,

Kazakhstan, Kurchatov city, Krasnoarmeyskaya st. 2, 071100

E-mail.ru: [rakhadilovb@mail.ru](mailto:rakhadilovb@mail.ru)

***Abstract.** In this work has been investigated changes of the structure and the erosion of the tungsten surface at the hydrogen plasma irradiation. It was shown that at the irradiation observed changes of the surface as the development of the relief as a result of the nonuniform surface etch. Metallographic analysis showed after irradiation of the tungsten samples at  $T = 1000$  °C and  $1500$  °C degree of development of the relief lower compared with the sample of tungsten irradiated at  $T = 700$  °C. However, on the samples observed the fine cracks, thus with the growth of temperature the size and cracking to increases. It has been determined after the hydrogen plasma irradiation the surface roughness is changed depending on the irradiation temperature. It is shown that with the growth of the target temperature and the ion energy is increased degree of surface erosion. Noticeable erosion of tungsten due to irradiation of the plasma flow, which simulating of the stationary mode plasma occurs only at relatively high temperatures of the target.*

**Введение.** Одной из ключевых задач в создании термоядерного реактора на основе токамака является выбор обращенных к плазме материалов, которые должны противостоять как стационарному плазменно-тепловому воздействию, так и интенсивному импульсному [1]. В качестве наиболее подходящих материалов для облицовки дивертора Международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР рассматривают углеграфитовые материалы и вольфрам [2, 3].

Процессы повреждения поверхности материалов при воздействии потоков плазмы определяются, прежде всего, теплофизическими свойствами самого материала, а именно: коэффициентом температуропроводности, температурами плавления и кипения. Однако существуют и значительные различия, вызываемые широким фронтом воздействия, завихрениями потока на неровностях и выступах облучаемых деталей и узлов, а также эффектом внедрения ионов плазмы в материал. Все это приводит к эрозии, образованию специфических поверхностных структур и модифицированного приповерхностного слоя [4]. При этом, характер эрозии материалов существенным образом зависит от рабочего диапазона температур и параметров плазменного пучка. Поэтому целью настоящей работы было исследование особенности эрозии поверхности вольфрама в зависимости от температуры мишени и энергии плазменного пучка при облучении водородной плазмой.

**Материалы и методы исследования**

В соответствии с поставленными задачами в качестве объекта исследования был выбран вольфрам марки ВЧ, с учетом интереса к применению этих марок 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. Образцы облучались водородной плазмой. При этом варьировались температура мишени и энергия плазменного пучка. Облучение образцов водородной плазмой было проведено на установке плазменно-пучкового разряда. Облучение образцов вольфрама осуществлялось водородной плазмой с энергией ионов 1,5-2 кэВ в течение 180 мин. Во время облучения давление в камере составило  $2 \times 10^{-3}$  Тор. В качестве рабочего газа использовался водород особой чистоты. Эрозия поверхности вольфрама оценивалось изучением топографии и микроструктуры поверхности, а также взвешиванием образцов до и после облучения. Исследование микроструктуры образцов вольфрама до и после облучения проводили при помощи оптического микроскопа OLIMPUS VX41M и растрового электронного микроскопа JSM-6390. Для выявления микроструктуры вольфрама использовались химическое травление в растворе, содержащей 50% плавиковой кислоты и 50% азотной кислоты. Топография и шероховатость поверхности изучались на трехмерном бесконтактном профилометре «Micro Measure 3D Station».

#### **Результаты исследований и их обсуждение**

Исследования топографии поверхности вольфрама показали, что при облучении при  $T=700^\circ\text{C}$  на поверхности наблюдается изменение поверхности как развитию рельефа в результате неоднородного травления поверхности. Образующийся рельеф состоит из хаотически расположенных выступов и впадин различных форм. Развитие рельефа на поверхности вольфрама за счет разных скоростей эрозии соседних участков при плазменном облучении связано с тем, что различным образом ориентированные поверхностные кристаллы характеризуются различными коэффициентами распыления. При этом степень изменения рельефа и структуры поверхностного слоя облученных образцов зависит от температуры облучения. Металлографический анализ показал, что при облучении образцов вольфрама при  $T=1000$  и  $1500^\circ\text{C}$  степень развития рельефа невысокое по сравнению с образцом вольфрама, облученных при  $T=700^\circ\text{C}$ . В этих образцах наблюдается мелкие трещины, при этом с ростом температуры до  $1500^\circ\text{C}$  размер и количества трещин увеличивается.

Результаты исследования образцов на оптическом профилометре показан на рисунке 1. Определено, что после облучения водородной плазмой изменяется шероховатость поверхности в зависимости от температуры облучения. Наибольшее увеличение шероховатости  $R_a=0.0623$  мкм наблюдается у образцах, облученных при  $T=1500^\circ\text{C}$ , что связано с образованием мелких трещин на поверхностном слое. А у образцах, облученных при  $T=700^\circ\text{C}$ , в которых поверхность состоит из хаотически расположенных выступов и впадин различных форм, параметр шероховатости составил  $R_a=0.0439$  мкм. Наименьшее изменение шероховатости  $R_a=0.0377$  мкм наблюдается у образцах, облученных при  $T=1000^\circ\text{C}$ . Эти результаты хорошо согласуются с результатами металлографического анализа.

Таким образом, можно утверждать что при облучении вольфрама и молибдена водородной плазмой основным рельефообразующим механизмом является распыление поверхности и эрозия характеризуется термическим травлением поверхности.

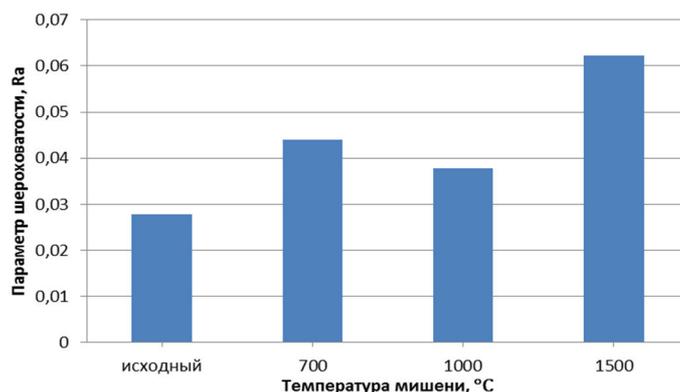


Рис. 1. Результаты исследований на оптическом профилометре

Эрозии образцов вольфрама, также, оценивали методом взвешивания образцов до и после облучения. Результаты показали, что с повышением температуры облучения степень эрозии увеличивается, что вполне закономерно. Известно, что в случае облучения металлов и сплавов ионами и плазмой инертных газов при температурах выше температуры отжига элементарных дефектов, созданных облучением, формирование рельефа происходит, в основном, благодаря распылению поверхности за счет кинетической энергии ионов по каскадному механизму.

#### Заключение

1. Таким образом, установлено, что при облучении на поверхности наблюдается изменение поверхности как развитию рельефа в результате неоднородного травления поверхности. При этом степень изменения рельефа и структуры поверхностного слоя облученных образцов зависит от температуры облучения. Металлографический анализ показал, что при облучении образцов вольфрама при  $T=1000$  и  $1500^{\circ}\text{C}$  степень развития рельефа невысокое по сравнению с образцом вольфрама, облученных при  $T=700^{\circ}\text{C}$ . Однако, на этих образцах наблюдается мелкие трещины, при этом с ростом температуры до  $1500^{\circ}\text{C}$  размер и количества трещин увеличивается.

2. Полученные результаты показали, что с увеличением температуры мишени и энергии ионов увеличивается степень эрозии поверхности. В силу своих теплофизических свойств заметная эрозия вольфрама в результате облучения потоками плазмы, имитирующих стационарный режим плазмы, наступает только при относительно высоких температурах мишени.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Loarte A., Saibene G., Sartori R. et al. Transient heat loads in current fusion experiments, extrapolation to ITER and consequences for its operation // Physica Scripta. 2007. V. 2007. Issue T128. P. 222 - 228.
2. Skinner C.H., Haasz A.A., Alimov V.Kh., Bekris N., Causey R.A., Clark R.E.H., Coad J.P., Davis J.W., Doerner R.P., May-er M., Pisarev A., Roth J., Tanabe T. — Fusion Sci. Technol., 2008, vol. 54, p. 891.
3. Pitts R.A. et al. — J. of Nuclear Materials, 2011, vol. 415, S957.
4. Позняк И.М., Климов Н.С., Подковыров В.Л. и др. - ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2012, вып. 4, с 23-33