

Эволюция микроструктуры бериллия после термического и плазменного воздействия

И. Соколов^{1,2,}, М. Скаков³, А. Миниязов²*

¹*НАО Университет Шакарима, Семей, Казахстан*

²*Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

³*Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан*

**igor.sokolov.kz@mail.ru*

Реферат. В рукописи представлены результаты научных исследований, связанных с изменением структуры и свойств бериллия ТГП-56, производимого в Казахстане, в результате термического и плазменного воздействия. На основе анализа литературы выбраны исходные данные для имитационных испытаний бериллия на экспериментальной установке. Построена модель распределения температуры в сегменте панели первой стенки, определяющая температуру воздействия электронного пучка и водородной плазмы. Общая продолжительность циклического воздействия на образцы бериллия составила 5000 с и 50 000 с при температурах, соответствующих тепловым потокам 2 МВт/м² и 4.7 МВт/м². Материаловедческий анализ показал, что при температуре 800 °С, соответствующей большему потоку, в структуре материала происходят существенные изменения. Результаты рукописи, наряду с имеющимися данными, показывают возможность применения испытанного бериллия в термоядерных реакторах.

Ключевые слова: бериллий, плазма, тепловая нагрузка, первая стенка.

1. Введение

К материалам внутренней облицовки термоядерных реакторов и установок предъявляются серьезные требования в процессе эксплуатации. Именно здесь протекают реакции с выходом высокой тепловой мощности, быстрых нейтронов, а также происходит плазменное воздействие на первую стенку реактора.

Выбор бериллия для изготовления панелей первой стенки в термоядерных реакторах обусловлен его специфическими преимуществами [1, 2]. Однако, бериллий имеет относительно высокую физическую скорость распыления и низкую температуру плавления [3–6].

В работе [7] проведены исследования по моделированию эрозии и миграции бериллия в ИТЭР в условиях эксплуатации. Максимальное теоретическое значение распыления бериллия при этом составило $2.35 \cdot 10^{23}$ Ве/с при угле падения 85°, энергии 50–200 эВ и концентрации $\sim 10^{18}$ м⁻³. В работе [8] построены модели сценариев срыва плазмы и потока ~ 6 МВт/м² на ППС. Авторами работы [2] проведены исследования по воздействию теплового потока, превышающего на 10% «повышенную» нагрузку (~ 800 °С; 4.7 МВт/м²) на макет с пластинами бериллия. Затронута воздействие теплового потока на кромки панелей, но детально не изучено поведение материала после термоциклических испытаний.

Таким образом для прогнозирования поведения бериллия в этой области необходимо получить физические данные о возможных изменениях бериллия в таких условиях. Данное исследование направлено на изучение изменения свойств бериллия марки ТГП-56 [9] после облучения водородной плазмой в условиях эксплуатации термоядерного реактора.

2. Материалы и методы

2.1. Процесс облучения

Экспериментальные работы по воздействию водородной плазмы на бериллий в условиях циклических термических нагрузок, соответствующих расчетным данным, проводились на плазменно-пучковой установке (ППУ). Объект исследования показан на Рис. 1а, мишенный узел с образцом и процесс облучения показаны на Рис. 1б и 1в соответственно [10].

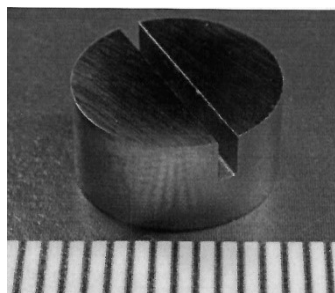


Рис. 1а. Исходный образец.



Рис. 1б. Мишенный узел.



Рис. 1в. Процесс облучения.

Измерение и контроль температуры поверхности бериллия при облучении проводились методом пирометрии с применением обратной связи для осуществления контролируемого нагрева образцов при помощи ПИД-регулирования [11]. С тыльной стороны измерение температуры обеспечено вольфрам-рениевой термопарой ВР-5/20.

Мониторинг и диагностика плазменного разряда осуществлялось с использованием оптического спектрометра HR 2000+ ES, подвижного зонда Ленгмюра, а также масс-спектрометра CIS-100. Обработка зондовых измерений с помощью собственного автоматизированного комплекса контактной диагностики плазмы.

2.2. Методы исследований бериллия

Материаловедческие исследования включали в себя следующие этапы:

- Измерение шероховатости на поверхности определены с помощью профилометра Mitutoyo SurfTest SJ-410;
- Измерение массы образцов проводилось с помощью аналитических весов MS205DU;
- Определение фазового состава поверхности образцов бериллия производилась на дифрактометре Empyrean с применением программного обеспечения для обработки и поиска HighScore;
- Изучение микроструктуры образцов выполнено на оптическом микроскопе SorTop ICX-41M;
- Исследование морфологии поверхности проведено на электронном сканирующем микроскопе Tescan Vega 3;
- Исследования тонкой структуры с использованием просвечивающего электронного микроскопа JEM 2100.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Параметры экспериментов

В результате проведены эксперименты по циклическому нагреву бериллиевых образцов в условиях плазменного воздействия. Длительность каждого импульса составляла 500 с. Параметры воздействия плазмы показаны в Таблице 1.

Спектрометрический анализ в камере взаимодействия установки проводился в режиме online при времени интеграции 500 мс и показан на Рис. 2.

Таблица 1. Параметры облучения водородной плазмой.

№ образца	Мощность нагрузки, МВт/м ²	кол-во импульсов	Концентрация ионов, м ⁻³	Электронная температура, эВ	Поток ионов, м ⁻² с ⁻¹	Флюенс ионов, м ⁻²
1	2	10	$3.09 \cdot 10^{17}$	6.02	$1.47 \cdot 10^{21}$	$7.34 \cdot 10^{24}$
2	2	100	$3.09 \cdot 10^{17}$	6.02	$1.47 \cdot 10^{21}$	$7.34 \cdot 10^{25}$
3	4.7	10	$1.58 \cdot 10^{17}$	13.36	$1.1 \cdot 10^{21}$	$5.53 \cdot 10^{24}$
4	4.7	100	$1.58 \cdot 10^{17}$	13.36	$1.1 \cdot 10^{21}$	$5.53 \cdot 10^{25}$

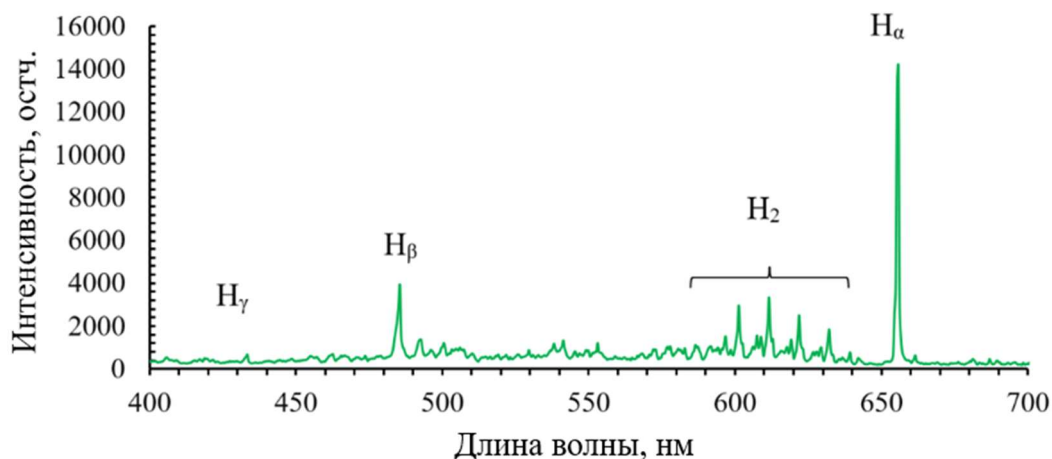


Рис. 2. Оптико-эмиссионный спектр при облучении.

Из графика можно наблюдать излучение спектральной серий атома водорода (серия Бальмера) $H\alpha$ 656.3 нм, $H\beta$ 486.1 нм, $H\gamma$ 434.1 нм, а также линии молекулярного водорода H_2 (600–650 нм).

3.2. Исследование облученных образцов

На Рис. 3а и 3б представлены бериллиевые образцы после воздействия водородной плазмы при различных тепловых нагрузках.

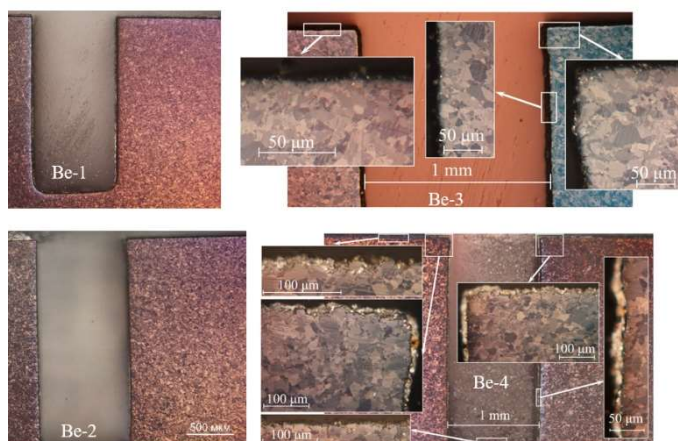


Рис. 3а. Оптическая микроскопия.

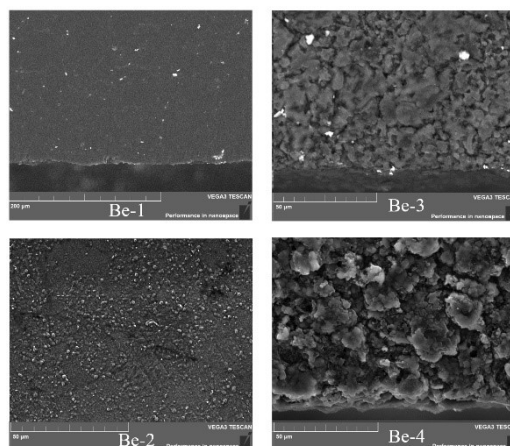


Рис. 3б. СЭМ-изображения.

У образцов Be-1 и Be-2 явных изменений поверхности и микроструктуры не обнаружено. Исследования шлифов образца 3 показали относительно неглубокую эрозию с глубиной пор до ~5 мкм. С увеличением циклов у образца Be-4 уже наблюдается более масштабная эрозия поверхности с образованием пор глубиной до 15 мкм, а также эрозия стенок и дна выреза с порами до 8 мкм.

На снимке сканирующей электронной микроскопии образца Be-1 подтверждается отсутствие изменений рабочей поверхности. Увеличение количества циклов при температуре 360°C приводит к появлению признаков эрозии на поверхности образца Be-2 в виде присутствия пор размерами 5–15 мкм с низкой дисперсностью. Поверхность образца Be-3 подверглась эрозии. Это подтверждается равномерной пористой структурой, где матрица представляет частицы округлой формы размерами 5–10 мкм и поры в виде прожилок шириной до 5 мкм. В теле матрицы присутствуют включения размерами до 5 мкм из оксида бериллия

(белые точки на Рис. 3 образец Ве-3), преимущественно округлой формы, что подтверждается результатами X-гау анализа. Практически вся поверхность образца Ве-4 эродирована и имеет равномерную, пористую структуру, аналогичную образцу Ве-3, но со сложной морфологией, схожей с фракталоподобной структурой.

4. Заключение

На основании условий эксплуатации и теплового моделирования для покрытия первой стенки из бериллия в ИТЭР были проведены испытания при воздействии водородной плазмы с температурой поверхности образцов 360 °С и 800 °С. Максимальный флюенс ионов водорода за время воздействия в данной работе составил $\sim 5 \cdot 10^{25}$ и $\sim 7 \cdot 10^{25}$ соответственно.

По результатам микроструктурного анализа образцов после плазменного облучения установлено, что при воздействии ионов водорода в приповерхностных слоях бериллия при температуре 800 °С происходит формирование пористой структуры микронного и субмикронного размеров. Увеличение количества циклов приводит к развитию линейных размеров пористой структуры. При температуре 360 °С значительных изменений не обнаружено.

В результате проведенных ПЭМ-исследований установлено, что в материале есть окислы, а зерна характеризуются низкой плотностью дислокаций. Структура образцов сформирована зернами бериллия, зернами (субзернами) окиси бериллия и характеризуется наличием большого количества нано-субмикроразмерных частиц второй фазы, различного элементного состава. Частицы располагаются как в объеме зерен, так и по их границам.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Научного комитета Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP08856026).

5. Список литературы

- [1] M. Merola, F. Escourbiac, A. Raffray, et al., Engineering challenges and development of the ITER Blanket System and Divertor, *J. Fus. Eng. and Des.*, vol. **96-97**, 2015; doi: 10.1016/j.fusengdes.2015.06.045
- [2] R. Mitteau, R. Eaton, A. Gervash, et al., Allowable heat load on the edge of the ITER first wall panel beryllium flat tiles, *J. Nucl. Mat. and Energy*, vol. **12**, 2017; doi: 10.1016/j.nme.2017.02.001
- [3] B. Spilker, J. Linke, T. Loewenhoff, et al., Performance estimation of beryllium under ITER relevant transient thermal loads, *J. Nucl. Mat. and Energy*, vol. **18**, 2019; doi: 10.1016/j.nme.2018.12.026
- [4] I. Kupriyanov, G. Nikolaev, L. Kurbatova, et al., Erosion of beryllium under ITER – Relevant transient plasma loads, *J. of Nucl. Mat.*, vol. **463**, 2015; doi: 10.1016/j.jnucmat.2015.01.050
- [5] G. Temmerman, K. Kheinola, D. Borodin, et al., Data on erosion and hydrogen fuel retention in Beryllium plasma-facing materials, *J. Nucl. Mat. and Energy*, vol. **27**, 2021; doi: 10.1016/j.nme.2021.100994
- [6] S. Brezinsek, M. Stamp, D. Nishijima, et al., Study of physical and chemical assisted physical sputtering of beryllium in the JET ITER-like wall, *JET EFDA Contributors Nucl. Fusion*, vol. **54**, 2014; doi: 10.1088/0029-5515/54/10/103001
- [7] J. Romazanov, S. Brezinsek, R. Pitts, et al., A sensitivity analysis of numerical predictions for beryllium erosion and migration in ITER, *J. Nucl. Mat. and Energy*, vol. **26**, 2021; doi: 10.1016/j.nme.2021.100904

- [8] H. Anand, R. Pitts, P. Vries, et al., A framework for the assessment and control of ITER main chamber heat loads, *Nucl. Fusion*, vol. **60**, 2020; doi: 10.1088/1741-4326/ab6150
- [9] Beryllium billets/articles [online], Retrieved Jun. 20, 2024;
http://www.ulba.kz/ru/production2_06.htm
- [10] G. Zhanbolatova, V. Baklanov, M. Skakov, et al., Influence of temperature on tungsten carbide formation in a beam plasma discharge, *J. of Phys.: Conf. Ser.*, vol. **2064**, January 2021; doi: 10.1088/1742-6596/2064/1/012055
- [11] И. Соколов и др., Способ высокотемпературного отжига металлов и сплавов методом электронно-лучевого воздействия в вакуумной и газовой среде, Патент на изобретение № 35911, бюллетень № 42, 2022;
<https://gosreestr.kazpatent.kz/Invention/Details?docNumber=346518>