

УДК [620.198: 669.725]:620.193.5

EDN GFRKPH

Некоторые особенности поведения бериллия при плазменных тепловых нагрузках, характерных для переходных процессов в ИТЭР

*И.Б. Куприянов¹, М.Д. Савельев¹, Д.А.Коробейников¹, В.Л. Подковыров²,
В.С. Ефимов³, Ю.М. Гаспарян³, А.Б. Путрик⁴*

¹АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара», Москва

²Троицкий научно-исследовательский институт инновационных технологий, Москва

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

⁴ЧУ ГК «Росатом» «Проектный Центр ИТЭР», Москва

В данной статье представлены результаты экспериментов, выполненных в АО «ВНИИНМ» на установке КСПУ-Ве, по исследованию повреждения поверхности образцов теплозащитной облицовки из бериллия при облучении импульсными потоками дейтериевой плазмы, имитирующими воздействия срывов тока плазмы в ИТЭР. Макеты теплозащитной облицовки, изготовленные из российского бериллия марки ТГП-56ПС, размером $80 \times 80 \times 8$ мм³ были подвергнуты воздействию 5 серий испытаний из 1, 3, 10, 30 и 100 выстрелов в потоках дейтериевой плазмы (6 см в диаметре) с длительностью импульса 0,5 мс при тепловой нагрузке 1,1 МДж/м². Угол между потоком плазмы и поверхностью макета составлял 90°. Представлены результаты исследования эрозии, характера и степени повреждения поверхности теплозащитной облицовки из бериллия, а также накопления дейтерия в облицовке в зависимости от количества импульсов.

Ключевые слова: бериллий, ИТЭР, первая стенка, плазма, срывы, эрозия, микроструктура, термическая десорбция, дейтерий

Some features of beryllium behavior under plasma thermal loads typical of transient processes in ITER

*I.B. Kupriyanov¹, M.D. Savelyev¹, D.A. Korobeynikov¹, V.L. Podkovyrov², V.S. Efimov³,
Yu.M. Gasparyan³, A.B. Putrik⁴*

¹JSC «A. A. Bochvar High-tech Research Institute of Inorganic Materials», Moscow

²Troitsky Scientific Research Institute of Innovative Technologies, Troitsk district, Moscow

³National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow

⁴Project Center of ITER, Moscow

This paper presents the results of experiments performed in JSC «VNIINM» at the QSPA-Be plasma gun facility to study the surface damage of beryllium protective armor mock-ups when irradiated with pulsed streams of deuterium plasma simulating the effects of plasma disruptions in ITER. Heat protective armor mock-ups made of Russian beryllium TGP-56FW, $80 \times 80 \times 8$ mm³ in dimensions, were subjected to 5 test series of 1, 3, 10, 30 and 100 shots in deuterium plasma streams (6 cm in diameter) with a pulse duration of 0.5 ms at heat loads of 1.1 MJ/m². The angle between the plasma flow and mock-ups surface was 90 degrees. The experimental results on the erosion and surface damage of the beryllium armor, as well as the deuterium retention in the armor, depending on the number of shots, are presented.

Keywords: beryllium, ITER, first wall, plasma, disruptions, erosion, microstructure, thermal desorption, deuterium.

Введение

Бериллий рассматривается в качестве перспективного материала облицовки компонентов, обращенных к плазме, для будущих термоядерных установок, а до последнего времени рассматривался в качестве основного материала облицовки первой стенки ИТЭР. Основными преимуществами при выборе бериллия как материала контактирующего с плазмой, являются его низкий атомный номер, высокое сродство к кислороду и теплопроводность, достаточно высокие механические свойства, а также относительно высокая температура плавления [1].

Во время горения плазмы в ИТЭР на материалы, контактирующие с плазмой, будут действовать высокие переходные тепловые нагрузки, такие как ELMs (краевая локальная мода), срывы тока плазмы, VDE (вертикальное смещение плазмы) и т. п., которые будут оказывать влияние на ресурс работы первой стенки. В этих условиях, из-за большого выделения тепла на обращенных к плазме элементах вакуумной камеры, ожидается повышенная эрозия поверхности бериллиевой облицовки, что будет приводить к значительным изменениям в поверхностных слоях облицовки, таких как оплавление, потеря массы материала, растрескивание, испарение и образование продуктов эрозии, а также будет приводить к накоплению изотопов водорода (дейтерия, трития) в облицовке и в продуктах эрозии. Накопление изотопов водорода в материалах облицовки термоядерного реактора может быть существенной проблемой как с точки зрения радиационной безопасности, так и из-за негативного влияния на свойства облицовки, а последующий рецилинг водорода может приводить к попаданию холодного газа в плазму и приводить к её охлаждению.

В данной статье представлены результаты последних экспериментов, выполненных в АО «ВНИИНМ» на установке КСПУ-Ве, по исследованию повреждения поверхности образцов теплозащитной облицовки из бериллия при облучении импульсными потоками дейтериевой плазмы, имитирующими воздействие срывов тока плазмы в ИТЭР. Установка КСПУ-Ве представляет собой одностадийный коаксиальный квазистационарный плазменный ускоритель. Она способна обеспечить плазменные (водородные или дейтериевые) и радиационные тепловые нагрузки на поверхности мишени, имитирующие ELMs, срывы плазмы и смягченные срывы, ожидаемые в ИТЭР [2]. Результаты ряда предыдущих экспериментов по влиянию

импульсных тепловых плазменных нагрузок на бериллий, выполненные на установке КСПУ-Ве, были опубликованы ранее в работах [2-8].

Макеты теплозащитной облицовки, изготовленные из бериллия марки ТГП-56ПС, были подвергнуты воздействию 5 серий испытаний из 1, 3, 10, 30 и 100 выстрелов в потоках дейтериевой плазмы с длительностью импульса 0,5 мс при тепловой нагрузке 1,1 МДж/м², имитирующей воздействие срывов тока плазмы в ИТЭР. Представлены результаты исследования эрозии, характера и степени повреждения поверхности теплозащитной облицовки из бериллия ТГП-56ПС, а также накопления дейтерия в облицовке в зависимости от количества импульсов.

Материалы и методика эксперимента

Для проведения экспериментов были изготовлены макеты теплозащитной облицовки (всего 5 штук) из бериллия марки ТГП-56ПС (разработан в АО «ВНИИНМ») в виде пластин размером 80×80×8 мм³. Заготовка из бериллия марки ТГП-56ПС, использовавшаяся для изготовления макетов, удовлетворяет требованиям спецификации ИТЭР Р8V6КН [9]. Основные характеристики материала представлены в таблице 1, а химический состав представлен в таблице 2. Внешний вид опытных макетов первой стенки перед испытаниями представлен на рис. 1. Макеты располагались в вакуумной камере установки КСПУ-Ве согласно принципиальной схеме, представленной на рис. 2. Направление падения потока плазмы было нормальным (90 градусов) к облучаемой поверхности бериллиевой облицовки. Облучаемая площадь поверхности Ве облицовки составляла ~64 см². Максимальная плотность тепловой нагрузки в центре плазменного шнура составляла 1.1 МДж/м². Двукратное снижение плотности энергии достигалось на расстоянии ~3.0 см от оси потока плазмы. Длительность импульса во всех экспериментах составляла 0.5 мс. В качестве плазмообразующего газа использовался дейтерий.

Макеты были подвергнуты воздействию 5 серий испытаний из 1, 3, 10, 30 и 100 выстрелов плазмы. После каждой серии испытаний проводились измерения потери массы и исследовались изменения поверхностной структуры опытных образцов. Исследовались скорость эрозии, потеря веса, морфология поверхности и характер повреждения бериллиевого покрытия из российского бериллия марки ТГП-56ПС, а также накопление дейтерия в облицовке в зависимости от количества импульсов.

Таблица 1

Характеристики бериллия марки ТГП-56ПС

Марка материала	Плотность, г/см ³	Средний размер зерна, мкм	σ_b , МПа		$\sigma_{0.2}$, МПа		δ , %	
			попер.	прод.	попер.	прод.	попер.	прод.
ТГП-56ПС	1.842	16	362	304	263	267	3.6	1.45

Таблица 2

Химический состав бериллия марки ТГП-56ПС, вес. %

Марка бериллия	Be	BeO	C	F	Fe	Si	Al	Cr	S(Mn+Mg+Cu+Ni)
ТГП-56ПС	99,2	0,86	0,03	<0,002	0,1	0,024	0,02	0,017	0,053



Рис. 1. Опытные макеты теплозащитной облицовки из бериллия марки ТГП-56ПС перед испытаниями

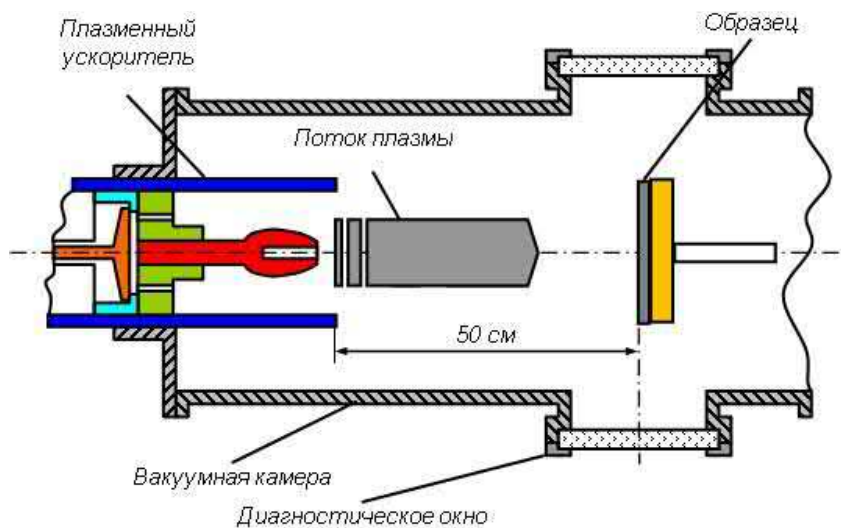


Рис. 2. Схема испытаний опытных макетов на установке КСПУ-Ве

Результаты экспериментов и их обсуждение

Внешний вид и эволюция поверхностной макро- и микроструктуры макетов теплозащитной облицовки из бериллия ТГП-56ПС после облучении импульсными потоками дейтериевой плазмы на установке КСПУ-Ве после воздействия 1, 3, 10, 30 и 100 выстрелов плазмы с максимальной поглощенной энергией 1.1 МДж/м² в центре пучка плазмы представлена на рис. 3-5.

Результаты исследования поверхностной макро- и микроструктуры бериллия с использованием оптической и сканирующей электронной микроскопии, представленные на рис. 3-5, показали, что под воздействием плазменного облучения с плотностью поглощенной энергии в центре потока 1.1 МДж/м² большая часть облучаемой поверхности бериллия в зоне воздействия плазменного потока оплавляется (рис. 3); расплавленный металл растекается во все стороны по поверхности опытных макетов на периферию плазменного пучка и за его пределы.

При этом в центре плазменного пучка (в зоне максимальной плотности энергии) на поверхности бериллия формируется кратер эрозии округлой или эллипсоидной формы умеренной глубины, а на его периферии формируются «наросты», струи и капли из перемещённого и повторно кристаллизовавшегося бериллия. Максимальной эрозии подвержены центральные области облицовки.

Поверхностная структура бериллия в зоне оплавления после 1-3 выстрелов гладкая, блестящая (рис. 3). После 10-30 выстрелов поверхность бериллия становится матовой. Это указывает на то, что поверхность бериллия в зоне оплавления имеет более дефектную структуру с более высокой шероховатостью поверхности. После 100 выстрелов макроструктура поверхности бериллия в зоне оплавления значительно модифицируется с образованием структуры «корзинчатого» типа с чередованием «наростов» и впадин в виде решетки светлых линий и темных впадин. Образовавшаяся макроструктура в какой-то мере подобна микроструктуре двухфазных (a + b) сплавов титана.

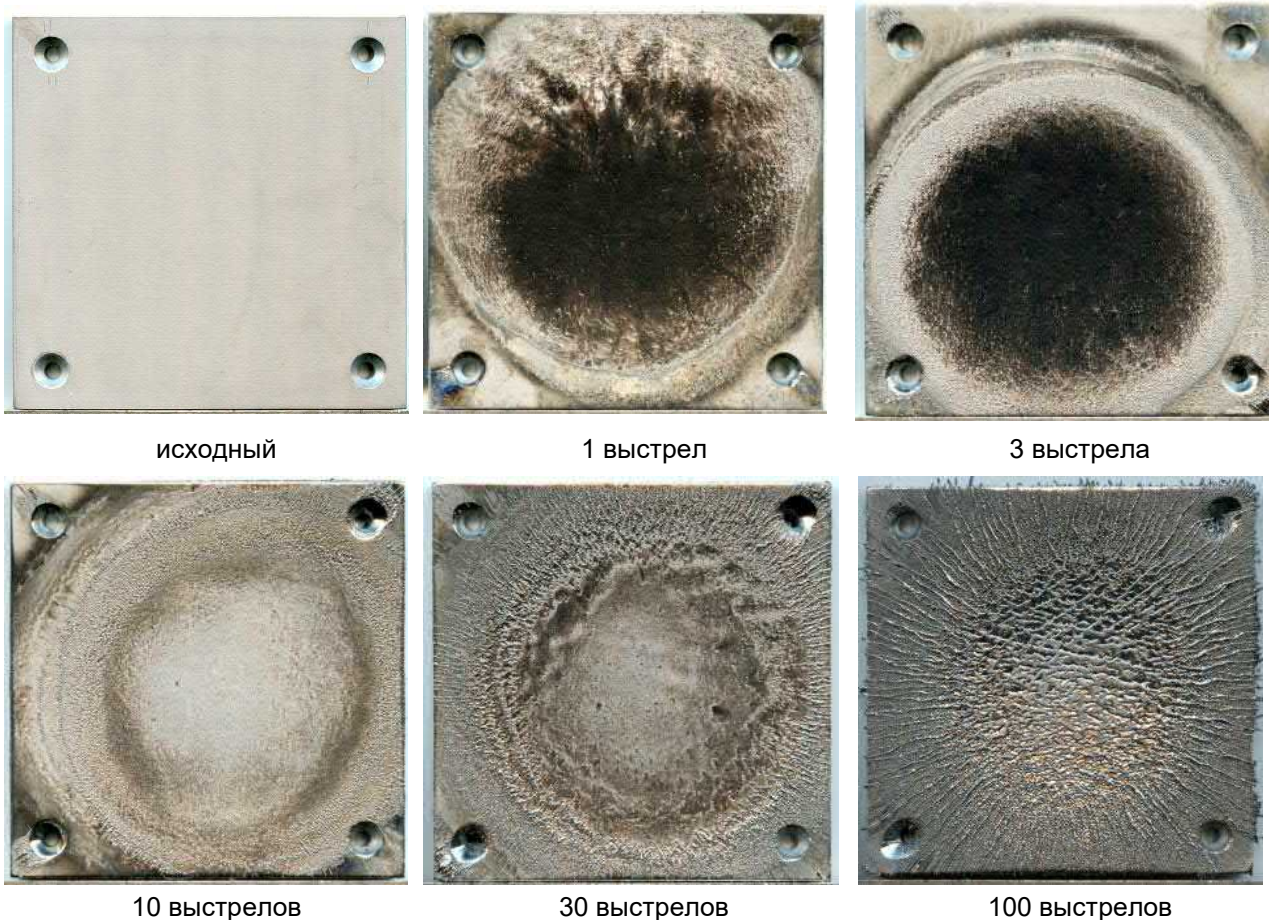


Рис. 3. Внешний вид и эволюция макроструктуры поверхности макетов теплозащитной облицовки из бериллия ТГП-56ПС до облучения и после воздействия плазмы с энергией 1.1 МДж/м² после 1, 3, 10, 30 и 100 выстрелов

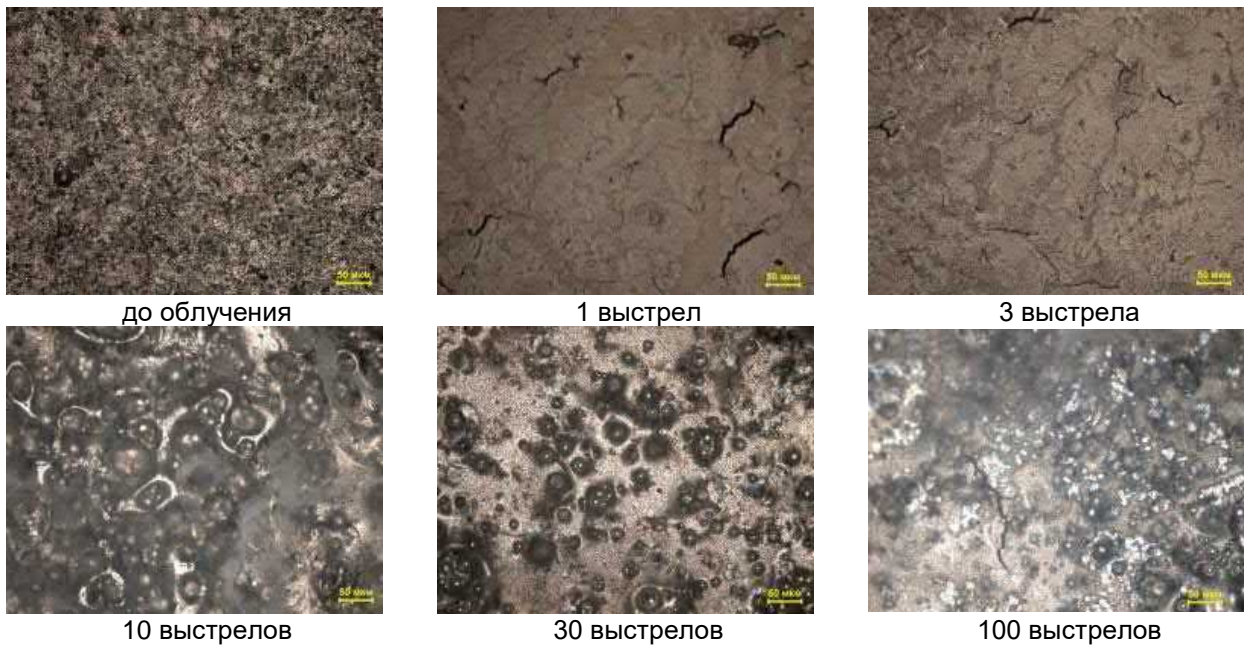


Рис. 4. Микроструктура (оптическая металлография, $\times 200$) поверхности макетов теплозащитной облицовки из бериллия ТГП-56ПС до облучения и после воздействия плазмы с энергией 1.1 МДж/м^2 после 1, 3, 10, 30 и 100 выстрелов

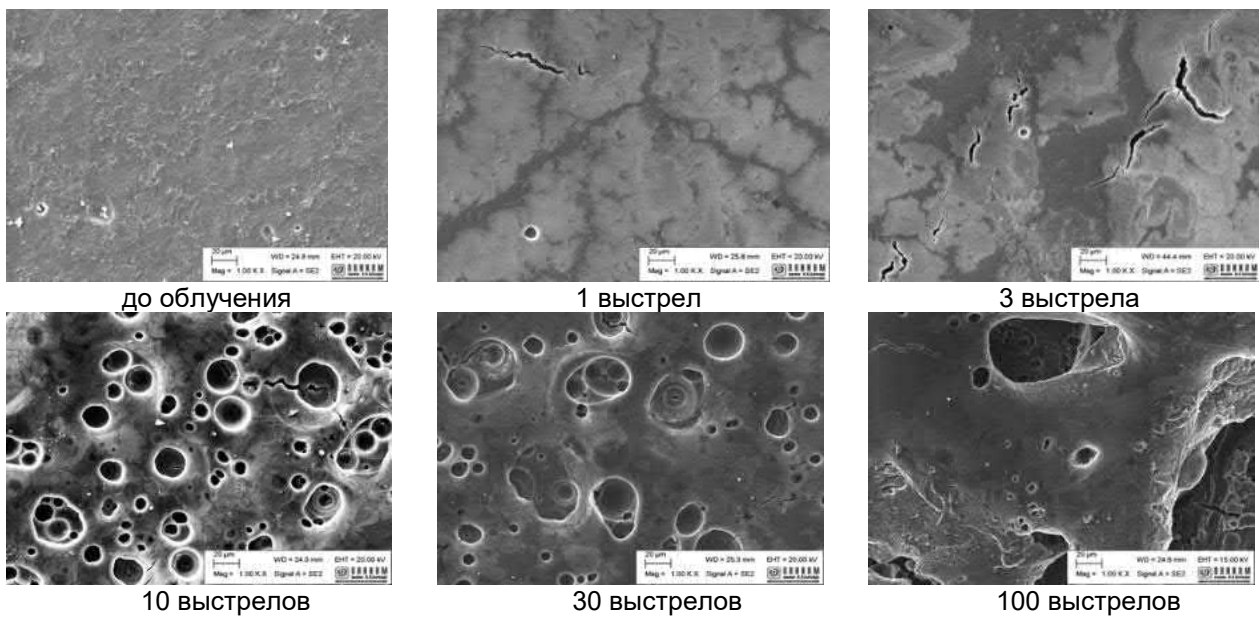


Рис. 5. Микроструктура (СЭМ, $\times 1000$) поверхности макетов теплозащитной облицовки из бериллия ТГП-56ПС до облучения и после воздействия плазмы с энергией 1.1 МДж/м^2 после 1, 3, 10, 30 и 100 выстрелов

Растрескивание в приповерхностном слое слабое. На поверхности макетов бериллия имеются микротрещины, толщина большинства из них не превышает 2 - 3 мкм. У незначительного количества микротрещин толщина достигает 5 - 6 мкм (рис. 6а). Поверхностная структура бериллия в зоне «наростов» сильно неоднородная, характеризуется высокой макро- и микро- шероховатостью, наличием пористости и микротрещин толщиной $\leq 20 \text{ мкм}$ (рис. 6б). Глубина распространения трещин, как правило,

не превышает 40 - 50 мкм. Направление распространения трещин либо перпендикулярно поверхности, либо под небольшим углом к ней. Имеются единичные трещины глубиной до 200 - 300 мкм (рис. 7).

Следует также отметить, что при использовании в данной работе тепловой нагрузки 1.1 МДж/м^2 образование макротрещин не происходило, все образцы бериллиевой облицовки полностью сохранили свою целостность.

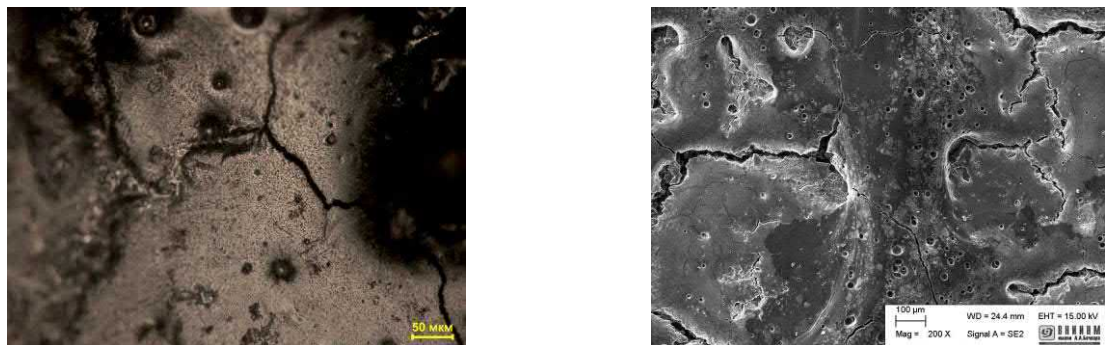


Рис. 6. Микроструктура поверхности бериллия ТГП-56ПС после 100 импульсов воздействия плазменного потока, где а – металлография; б – СЭМ

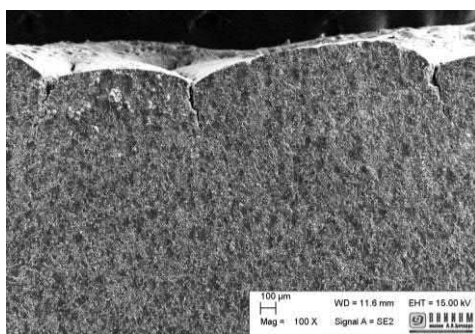


Рис. 7. Распространение трещин в приповерхностном слое бериллия ТГП-56ПС после 100 импульсов воздействия плазменного потока с энергией 1.1 МДж/м² (СЭМ, поперечное сечение)

При изучении эрозии бериллия использовались данные следующих методов измерений:

- данные по изменению массы опытных макетов;
- данные по изменению профиля поверхности опытных макетов.

Результаты измерений параметров эрозии (изменение профиля, удельной потери массы и скорости эрозии) теплозащитной облицовки из бериллия марки ТГП-56ПС при облучении импульсными потоками дейтериевой плазмы с плотностями энергии 1.1 МДж/м² представлены в таблице 3. Полученные данные показывают, что средняя удельная потеря массы бериллия, измеренная по изменению массы опытных образцов, находится в диапазоне от -0.34 г/м² импульс (после 1 выстрела) до -

2.86 г/м² импульс (после 10 выстрелов), т.е. умеренная.

Результаты измерений изменения профиля опытных макетов показывают, что максимальная глубина кратера эрозии, образовавшаяся в центральной области плазменного шнура после 100 выстрелов, измеренная по изменению профиля облицовки, не превышает 0.39 мм, что меньше 5 % от исходной толщины облицовки (8 мм). Скорость эрозии облицовки в центральной области плазменного шнура, рассчитанная по изменению профиля облицовки, находится в диапазоне от 3.9 до 20 мкм/имп. Полученные результаты свидетельствуют о том, что скорость эрозия облицовки из бериллия марки ТГП-56ПС умеренная и уменьшается ~ в 5 раз с увеличением количества выстрелов от 1 до 100.

Таблица 3
Результаты измерения эрозии теплозащитной облицовки из бериллия марки ТГП-56ПС (E = 1.1 МДж/м²)

Количество выстрелов	Угол падения потока плазмы	Максимальное изменение профиля (ΔН), мм	Скорость эрозии (V), max, мкм/имп.	Удельная потеря массы, Δm,грамм/S,м ² N,имп.
1	90°	-0,02	-20	-0,34
3		-0,045	-15	-2,86
10		-0,095	-9.5	-1,03
30		-0,16	-5.3	-1,71
100		-0,39	-3.9	-1,36

Для исследования удержания изотопов водорода в макетах из бериллия использовался термодесорбционный стенд «ТДС-Ве», работающий в АО «ВНИИИМ». Этот стенд предназначен для анализа захвата изотопов водорода в бериллии. Основные преимущества этой установки: сверхвысокий сухой вакуум (5×10^{-9} мбар), высокие характеристики квадрупольного масс-спектрометра (разрешение позволяет разделять молекулы D_2 и He), камера с двойными стенками для охлаждения водой, низкое газовыделение с окружающих конструктивных элементов в ходе ТДС, система смены образцов без открытия основной камеры на атмосферу [10]. Для проведения термодесорбционного анализа (ТДС) после проведения КСПУ-экспериментов из облученных макетов размером $80 \times 80 \times 8$ мм³ методом электроискровой резки были вырезаны образцы размером 10×10 мм² толщиной 0.9 мм согласно схеме, представленной на рис. 8.

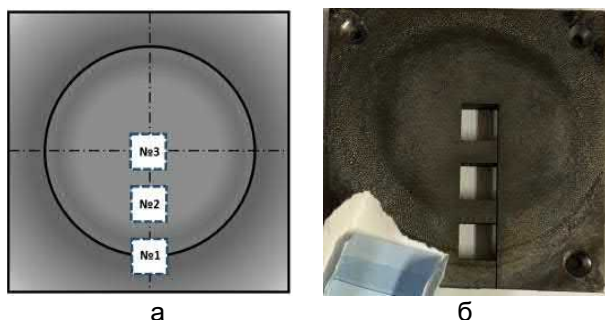


Рис. 8. Области вырезки образцов (а) и внешний вид макета после вырезки (б). Диаметр плазменного шнура (показанная окружность) ~60 мм. Исследуемые образцы - квадрат со стороной 10 мм, шаг резки 5 мм.

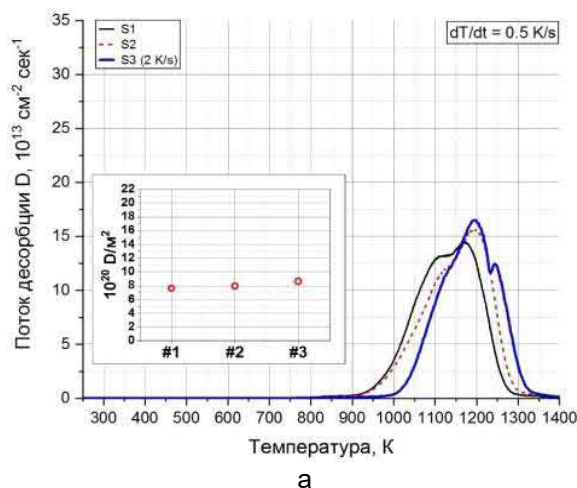
Все эксперименты по термодесорбции проводились при скорости нагрева, равной 0.5 K/сек, до максимальной температуры, равной 1400 K, что соответствует $\sim 0.9 \cdot T_{пл}$ для бериллия. При проведении термодесорбции с помощью квадрупольного масс-спектрометра регистрировалось изменение следующих m/z : 2 - H_2^+ , 3 - HD^+ , 4 - D_2^+ , 16 - O^+ , 18 - H_2O^+ , 19 - HDO^+ , 20 - D_2O^+ , 28 - CO^+ , 32 - O_2^+ , 40 - Ar^+ и 44 - CO_2^+ .

На рис. 9 показаны спектры термодесорбции и данные по накоплению дейтерия в составе ($HD+D_2$) после воздействия плазмы с энергией 1.1 МДж/м² после 1, 3, 10, 30 и 100 выстрелов. Данные по термодесорбции показывают, что основное газовыделение дейтерия в образцах начинается примерно с 730 K (около $0.47 \cdot T_{пл}$) и длится на протяжении всего нагрева до максимальной температуры 1400 K (около $0.9 \cdot T_{пл}$).

После преодоления термодесорбционного максимума с температурой 1180-1220 K из образцов десорбируется от 62 до 83% всего содержащегося дейтерия. Данный термодесорбционный пик является типичным для исследованных образцов и, вероятно, связан с десорбцией дейтерия из макродефектов (пузырьков газа), возникающих из-за плавления бериллия и большого давления плазмы.

Зависимости изменения накопления дейтерия от числа импульсов плазмы представлены на рис. 10.

Данные рис. 9,10 показывают, что после $n = 1$ имп. накопление дейтерия на периферии мишени составило 7.6×10^{20} D/м², а в центре - 8.6×10^{20} D/м², т.е. разница составила $\sim 13\%$. После $n = 3$ имп. накопление дейтерия в периферийной и промежуточной областях мишени выросло на $\sim 12.5\%$, однако в центральной части мишени накопление дейтерия выросло скачкообразно в ~ 2 раза. С увеличением количества импульсов до $n = 10$ происходит дальнейшее увеличение накопления по всем областям макета: для периферийной и промежуточной точек - на 30 %, достигая максимума (~ 30 ppm), а для центральной области рост составил 10%. С увеличением количества импульсов до $n = 30$ наблюдается дальнейшее увеличение (на 4.7%) накопления дейтерия в центральной области макета с достижением максимума, составившее ~ 83.5 ppm ($HD + D_2$). Однако в двух других точках накопление дейтерия уменьшилось. С увеличением количества импульсов до $n = 100$ происходит уменьшение накопления дейтерия во всех областях мишени. Таким образом, при $n = 30$ импульсам наблюдается эффект насыщения роста содержания дейтерия в бериллии с последующим постепенным его снижением при увеличении количества импульсов плазмы.



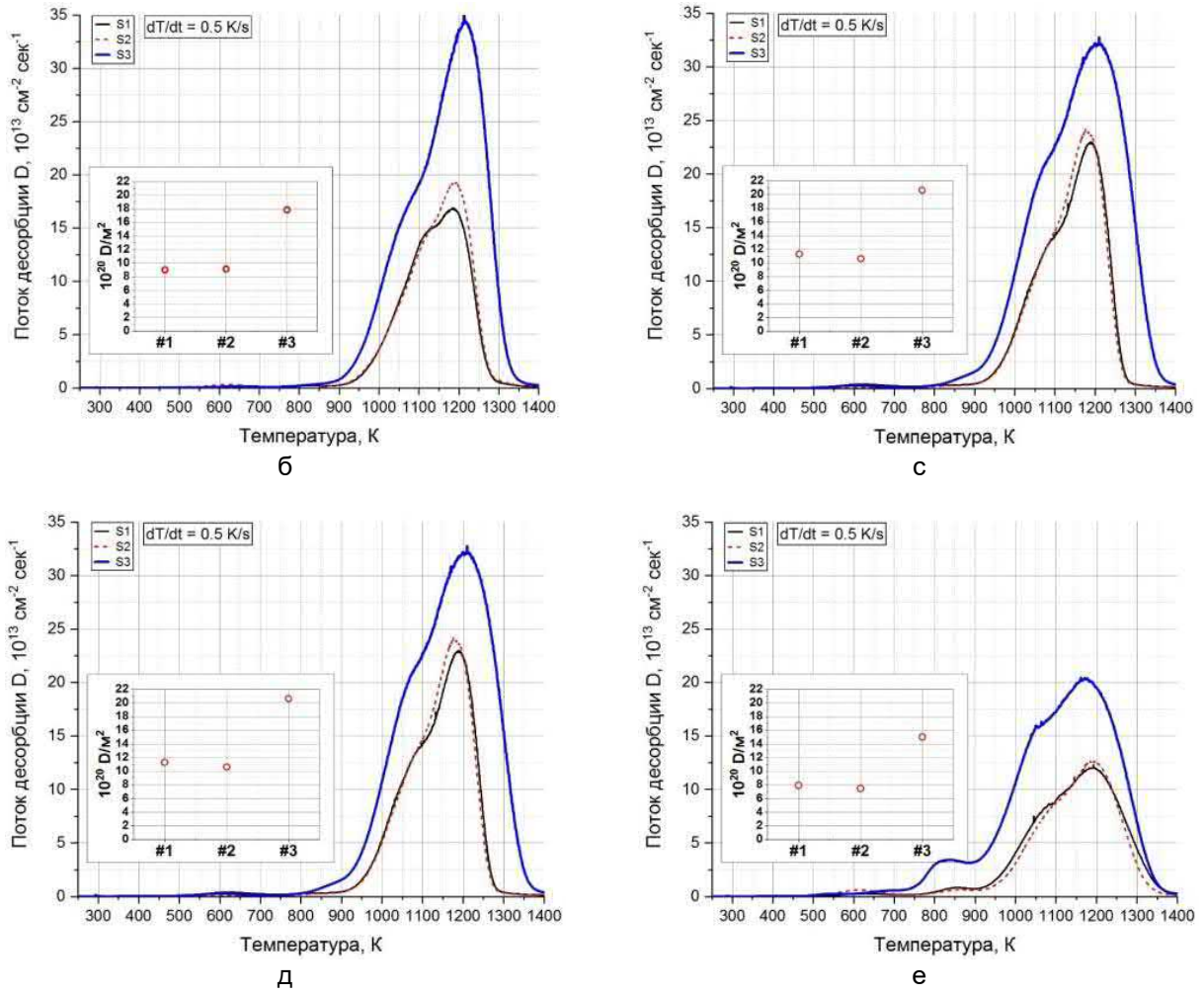


Рис. 9. Спектры термодесорбции дейтерия (в составе D_2) и данные по накоплению в составе ($HD+D_2$) образцов после проведения тепловых испытаний импульсными потоками плазмы с энергией 1.1 МДж/м^2 и $n = 1 - 100$, где а – $n = 1$ имп., б – $n = 3$ имп., в – $n = 10$ имп., д – $n = 30$ имп., е – $n = 100$ имп.

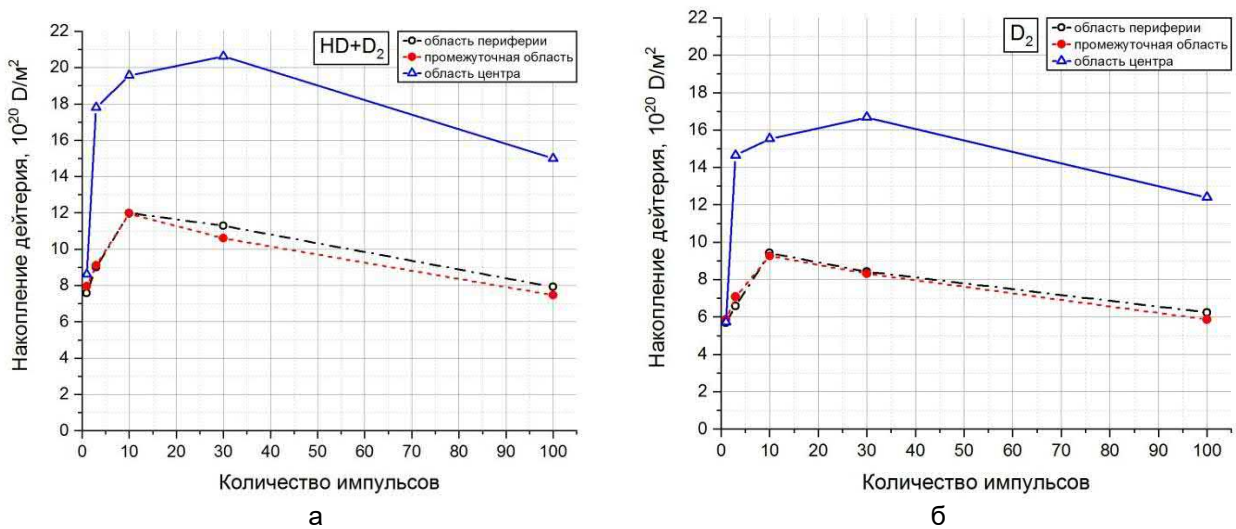


Рис. 10. Накопление дейтерия в составе $HD+D_2$ (а) и в составе D_2 (б) в образцах мишеней

Заключение

Эрозия и поверхностное повреждение облицовки из бериллия марки ТГП-56ПС было изучено после облучения дейтериевой плазмой с поглощенной энергией 1.1 МДж/м² после 1, 3, 10, 30 и 100 импульсов плазмы. Показано, что:

- основным механизмом эрозии, приводящим к потерям массы и повреждению поверхностной структуры, являются: плавление бериллия, движение расплавленного слоя вдоль потока плазмы, его повторное затвердевание, выброс капель и образование трещин;

- максимальная глубина кратера эрозии, образовавшегося в центральной области плазменного шнура после 100 выстрелов, измеренная по изменению профиля облицовки, не превышает 0.39 мм, что меньше 5% от исходной толщины облицовки (8 мм);

- скорость эрозии материала облицовки умеренная и уменьшается ~ в 5 раз (с 20 до 3.9 мкм/имп) с увеличением количества выстрелов от 1 до 100;

- растрескивание приповерхностного слоя слабое. На поверхности бериллия имеются микротрещины, толщина большинства из них не превышает 5-6 мкм. Глубина распространения трещин, как правило, не превышает 40-

50 мкм. Образования поверхностных макротрещин не наблюдается;

- методом термодесорбционной спектроскопии исследованы спектры термодесорбции дейтерия и получены зависимости накопления дейтерия от количества импульсов плазмы в макетах облицовки из бериллия;

- накопление дейтерия в образцах незначительное и находится в диапазоне от 30 до 83.5 ppm (или 0.003 - 0.008%). При n = 30 выстрелам достигается максимум накопления дейтерия ~83.5 ppm в бериллии с последующим постепенным его снижением при дальнейшем увеличении количества выстрелов плазмы.

Благодарности

Данная работа выполнялась в рамках государственного контракта № Н.4а.241.19.23.1014 от 18.01.2023 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2023» и договора между Частным учреждением «ИТЭР-Центр» и АО «ВНИИНМ» № 17706413348230000070/28-23/01/26/11521-Д от 05.05.2023 г.

Список литературы

1. *ITER Materials Assessment Report (MAR), ITER Final Design Report 2001, (internal project document distributed to the ITER Participants).* [1]
2. *D. Kovalenko et al., Phys. Scr. T 145 (2011) 014065 (4pp).* [2]
3. *I. Kupriyanov et al., Impact of High Transient Loads on Beryllium Damage, Proc. 25th IEEE Symposium on Fusion Engineering (SOFE), June 10-14, 2013, San Francisco, USA, 978-1-4799-0171-5/13/\$31.00, 2013 IEEE, ISBN: 978-1-4799-0169-2.* [3]
4. *Kupriyanov et al. Effect of transient heating loads on beryllium, Fusion Eng. Des. 89 (7-8), 2014.* [4]
5. *Kupriyanov et al. Study of Beryllium Damage Under ITER-Relevant Transient Plasma and Radiative Loads, Fusion Science and Technology 66(1), 2014.* [5]
6. *Kupriyanov et al. Erosion of beryllium under ITER – relevant transient plasma loads J. Nucl. Mater. 463 (2015).* [6]
7. *D. Kovalenko et al., Behavior of divertor and first wall armour materials at plasma heat fluxes relevant to ITER ELMs and disruptions, Nuclear Materials and Energy 12 (2017) 156-163.* [7]
8. *N. Klimov et al., Beryllium layer response to ITER-like ELM plasma pulses in QSPA-Be, Nuclear Materials and Energy 12 (2017) 433-440.* [8]
9. *Material Specification for the supply of Beryllium blocks for the ITER First Wall application, ITER IDM: P8V6KH (2015).* [9]
10. *V. Efimov et al., Deuterium accumulation in beryllium under irradiation with powerful pulsed plasma flows, Journal of Surface Investigation X-ray Synchrotron and Neutron Techniques 10 (3):627-632 (2016).* [10]

Поступила в редакцию / Received 11.12.2025

Поступила после рецензирования / Revised 15.12.2025

Принята к публикации / Accepted 15.12.2025