

УДК 533.924

ДВИЖЕНИЕ РАСПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СЛОЯ В УСЛОВИЯХ, ХАРАКТЕРНЫХ ДЛЯ БЫСТРЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ИТЭР

И.М. Позняк^{1,3}, В.М. Сафронов^{1,2,3}, В.Ю. Цыбенко^{1,3}

¹*Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, г. Троицк, Москва, Россия*

²*Проектный центр ИТЭР, Москва, Россия*

³*Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Московская обл., Россия*

В процессе работы ИТЭР защитные покрытия дивертора и первой стенки будут подвергаться воздействию значительных плазменно-тепловых нагрузок, что повлечёт их интенсивную эрозию. Одним из основных механизмов разрушения металлических покрытий является уменьшение их толщины за счёт переноса расплавленного слоя по поверхности. Для создания и проверки теоретических моделей движения расплава необходимы соответствующие экспериментальные данные. В представленной статье описываются эксперименты, в ходе которых металлические мишени подвергались облучению плазмой на квазистационарном сильноточном плазменном ускорителе КСПУ-Т. Полученные данные позволили определить скорость и ускорение расплава на различных расстояниях от оси плазменного потока. Показано, что сила, обеспечивающая радиальное движение расплавленного металлического слоя, создаёт ускорение масштаба 1000 g. Такое ускорение не может быть обусловлено градиентом давления, создаваемым плазмой на поверхности мишени. Для исследования движения расплава под действием известной силы был проведён эксперимент с вращающейся мишенью. Действие центробежной и кориолисовой сил привело к появлению на поверхности металла изогнутых вытянутых струй. Кроме того, изменился профиль поверхности: в центральной части кратера эрозии исчезает возвышение, характерное для неподвижных мишеней. Полученные экспериментальные данные позволяют выявить закономерности течения расплава, что необходимо для проверки моделей движения расплавленного слоя.

Ключевые слова: ИТЭР, дивертор, эрозия материалов, плазменные ускорители.

MOVEMENT OF MELT METAL LAYER UNDER CONDITIONS TYPICAL FOR TRANSIENT EVENTS IN ITER

I.M. Poznyak^{1,3}, V.M. Safronov^{1,2,3}, V.Yu. Zybenko^{1,3}

¹*Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research (TRINITI), Troitsk, Moscow, Russia*

²*Institution «Project Center ITER», Moscow, Russia*

³*Moscow Institute of physics and technology, Dolgoprudny, Moscow region, Russia*

During operation of ITER the divertor and first wall protective coatings will be exposed to significant plasma heat loads which may cause a huge erosion. One of the major failure mechanisms of metallic armor is diminution of their thickness due to the melt layer displacement. New experimental data are required in order to develop and validate physical models of melt layer movement. The paper presents the experiments where metal targets were irradiated by plasma stream at quasi-stationary plasma accelerator QSPA-T. The obtained data allow to determine a velocity and acceleration of the melt layer at various distances from the plasma stream axis. The force causing radial movement of the melt layer is shown to create an acceleration in order of magnitude 1000 g. The pressure gradient is not able to create such a large acceleration. To investigate melt layer movement under known force the experiment with rotating target was carried out. Influence of centrifugal and Coriolis forces leads to appearance of curved elongated waves on the surface. The surface profile has been changed: there is no hill in the central part of the erosion crater in contrast to non-rotating target. The obtained experimental data clarify the dependencies in the melt motion that are required for development of theoretical models.

Key words: ITER, divertor, material erosion, plasma accelerators.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что защитные пластины дивертора ИТЭР будут изготовлены из вольфрама, а в качестве материала для облицовки первой стенки будет использован бериллий. Под действием плазменно-тепловых нагрузок во время ELM-событий ($Q = 0,2—5$ МДж/м², $\Delta t = 0,1—1$ мс [2]) и срывов разряда ($Q = 12—71$ МДж/м², $\Delta t = 1,5—3,0$ мс [3]) возможно плавление металлических покрытий и перемещение расплавленного слоя вдоль их поверхности. Это ведёт к уменьшению толщины облицовочных пластин и, следовательно, сокращению их срока службы. Так как ни на одном из существующих токамаков невозможно воспроизвести условия, характерные для ELM-событий и срывов разряда в ИТЭР, для испытания защитных покрытий используются плазменные ускорители [4, 5] и электронные пучки [6, 7].

Эксперименты, проведённые ранее на квазистационарном плазменном ускорителе КСПУ-Т [8], показали, что под действием плазменного потока на поверхности металлических мишеней происходит радиальное

течение расплава, в результате чего возникает кратер эрозии. Особенностью кратера является наличие возвышения в центральной области (рис. 1). Течение расплава имеет волновой характер (рис. 2).

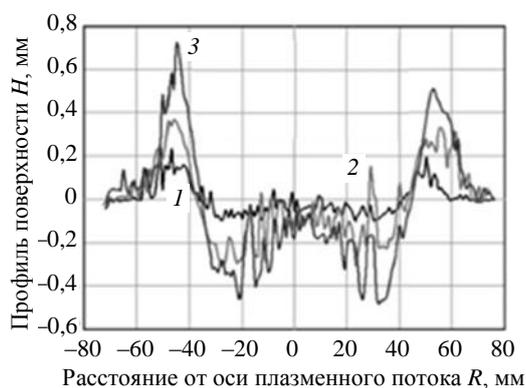


Рис. 1. Профиль поверхности стальной мишени в зависимости от числа плазменных воздействий: 5 (1), 15 (2), 25 воздействий (3) [8]

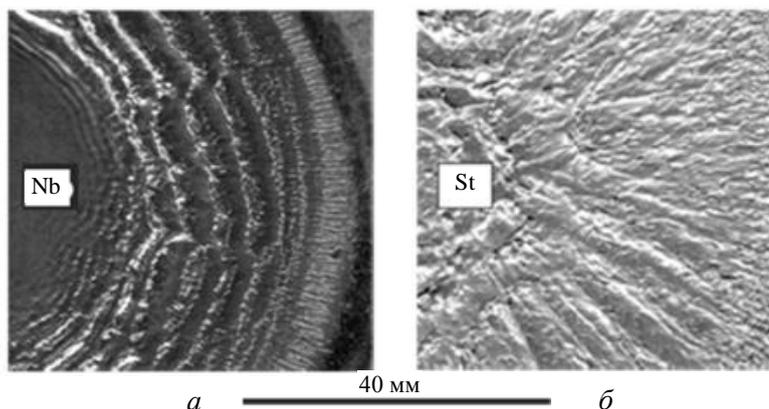


Рис. 2. Поверхность ниобиевой (а) и стальной (б) мишени после 25 плазменных воздействий. Тепловая нагрузка 1,9 МДж/м² [8]

Было проведено численное моделирование динамики нагрева и движения расплавленного слоя [8]. Для этого в цилиндрической системе координат совместно решались уравнения теплопроводности и гидродинамики. Градиент давления рассматривался в качестве единственной силы, обеспечивающей перенос расплава. Оказалось, что расчётная глубина кратера эрозии на порядок меньше значения, определённого в экспериментах. Возникает естественный вопрос о том, каков механизм перемещения расплава.

В работе [9] предложена теоретическая модель, согласно которой на облучаемой поверхности расплава развиваются неустойчивости, что приводит к образованию волн. Парусность волн способствует эффективной передаче импульса от растекающейся над поверхностью мишени плазмы к расплавленному слою. Кроме этого, согласно предложенной модели образование волн ведёт к уменьшению силы вязкого трения. В результате совместного действия этих факторов скорость перемещения расплавленного слоя может достигать $v \sim 10$ м/с.

Для создания и проверки моделей движения расплавленного слоя необходимы надёжные экспериментальные данные. Цель данной работы — определить скорость и ускорение расплава, а также оценить вклад различных сил в его движение. Для этого были проведены эксперименты по облучению металлических мишеней потоком плазмы на установке КСПУ-Т.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

КСПУ-Т является квазистационарным сильноточным плазменным ускорителем с собственным магнитным полем. Ускорение плазмы обеспечивается силой Ампера

$$F \sim IB, \tag{1}$$

где B — магнитное поле, создаваемое током I , текущим через плазмообразующий газ и коаксиальные электроды ускорителя.

Характеристики плазменного потока КСПУ-Т:

Длительность импульса, мс . . .	0,5—1,0
Скорость потока плазмы, м/с . . .	(1—3)10 ⁵
Плотность плазмы, м ⁻³ . . .	10 ²² —10 ²³
Диаметр потока, см . . .	5
Направленная энергия ионов, кЭв . . .	0,1—0,5
Тепловые нагрузки, МДж/м ² . . .	0,2—5

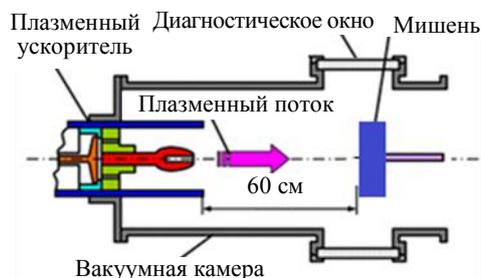


Рис. 3. Схема облучения мишеней на установке КСПУ-Т

нагрузки на мишень. КСПУ-Т позволяет облучать материалы потоками плазмы, длительность воздействия и плотность энергии которых соответствуют ожидаемым при ELM-событиях и срывах разряда в ИТЭР [8, 11].

В экспериментах, представленных в данной статье, облучаемые мишени устанавливались перпендикулярно оси потока.

ЭКСПЕРИМЕНТ С ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ МИШЕНЬЮ

Измерения параметров приповерхностной плазмы и исследование движения расплава во время разряда КСПУ-Т представляют задачи, сопряжённые с рядом сложностей ввиду сильных электромагнитных помех, свечения плазмы, быстроты протекающих процессов. Поэтому на начальной стадии исследований целесообразно провести простые, качественные эксперименты, в которых можно получить новые данные о движении расплава из измерений, выполненных уже после воздействия плазмы.

На первом этапе был проведён эксперимент с целью определения локального перемещения расплава на различных расстояниях от оси плазменного потока. Для этого была изготовлена двухкомпонентная мишень, которая состоит из медной пластины с встроенными в неё маркерами из нержавеющей стали. Маркеры представляют собой цилиндрические штифты диаметром 4 мм. После запрессовки штифтов в пластину лицевая и тыльная поверхности мишени были выровнены фрезерованием и шлифовкой (рис. 4).

Порог плавления стали меньше, чем у меди ($0,3 \text{ МДж/м}^2$ против $0,6 \text{ МДж/м}^2$), поэтому тепловую нагрузку при плазменном воздействии можно подобрать таким образом, чтобы поверхность пластины оставалась не оплавленной, а на маркерах образовался жидкий металлический слой. По его перемещению удалось оценить скорость и ускорение расплава на различных расстояниях от оси плазменного потока.

В ходе эксперимента двухкомпонентная мишень была подвергнута однократному облучению потоком дейтериевой плазмы. Тепловая нагрузка в центре воздействия плазменного потока составляла $0,6 \text{ МДж/м}^2$, длительность облучения $\Delta t = 600 \text{ мкс}$.

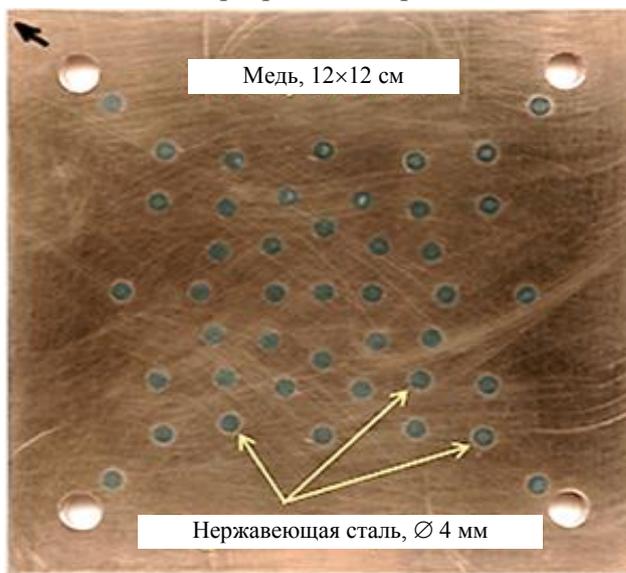


Рис. 4. Двухкомпонентная мишень

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА С ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ МИШЕНЬЮ

Для того чтобы измерить распределение тепловой нагрузки на мишень, в тыльную сторону медной пластины были встроены 16 термопар. Распределение тепловой нагрузки $Q(x, y)$ и температуры $\Delta T(x, y)$ связано следующей формулой:

$$Q(x, y) = \rho c h \Delta T(x, y), \quad (2)$$

где ρ — плотность материала; c — его удельная теплоёмкость; h — толщина пластины. Измерение $\Delta T(x, y)$ осуществлялось 16 термопарами, встроенными в тыльную сторону пластины. Полученное $Q(x, y)$ хорошо аппроксимируется двумерным гауссовым профилем, что соответствует данным, приведённым в [10, 11]. Отмечается хорошее совпадение центров мишени и оси потока (смещение составляет менее 3 мм). Распределение тепловой нагрузки представлено на рис. 5 с помощью изолиний.

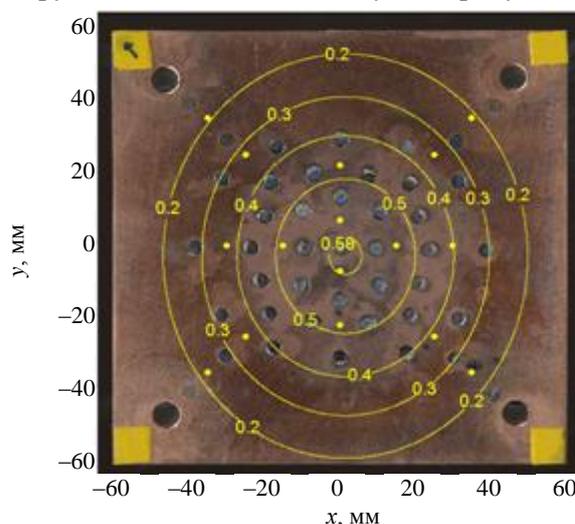


Рис. 5. Распределение тепловой нагрузки на поверхности мишени, МДж/м^2 . Точками обозначены положения термопар

Мишень после плазменного воздействия показана на рис. 6, также в увеличенном масштабе показаны четыре маркера, расположенные на одном радиусе от центра пластины. По представленным на рис. 7 профилям этих маркеров видно, что материал смещается в сторону периферии мишени на всех штифтах, кроме центрального. Поэтому расчёты для него в дальнейшем не проводились.

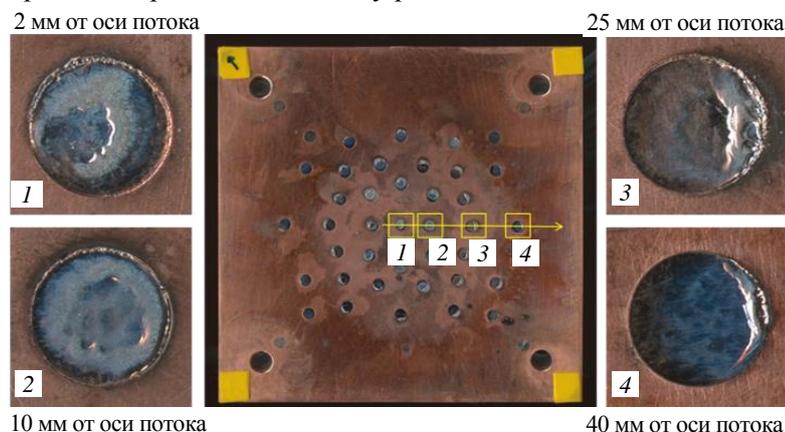


Рис. 6. Двухкомпонентная мишень после воздействия плазменного потока. В увеличенном виде представлены маркеры, для которых проводилось измерение профиля поверхности

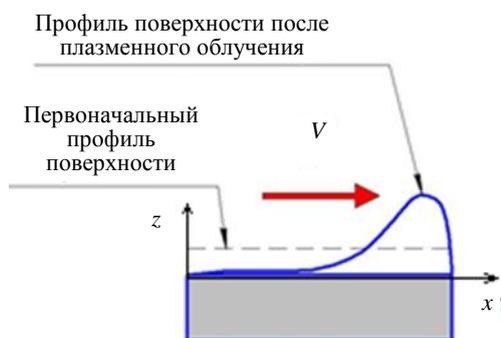


Рис. 8. Схематическое изображение перемещения расплава на маркере

Схематически результат перемещения расплава показан на рис. 8. Через сечение высотой h (толщина расплавленного слоя) и шириной d за время плазменного воздействия Δt проходит объём расплава ΔV , откуда следуют оценки для скорости и ускорения:

$$v \approx \frac{\Delta V}{dh\Delta t}; a \approx \frac{\Delta v}{\Delta t}. \quad (3)$$

После воздействия плазмы остановка направленного течения расплава вследствие сил вязкости происходит за характерное время

$$\tau_m = \frac{h^2}{\nu} = \frac{(30 \text{ мкм})^2}{8 \cdot 10^{-7} \frac{\text{М}^2}{\text{с}}} \gg 10^{-3} \text{ с} = 1 \text{ мс}, \quad (4)$$

где ν — кинематическая вязкость стали. При этом расчёты, приведённые в [12], показывают, что после воздействия с тепловой нагрузкой $Q = 0,5 \text{ МДж/м}^2$ расплав нержавеющей стали полностью застывает за время $\sim 200 \text{ мкс}$. Поэтому для дальнейших оценок Δt принималось равным времени плазменного воздействия ($\sim 600 \text{ мкс}$).

С помощью написанной в среде MATLAB программы была выполнена обработка профилей и вычислены скорость и ускорение расплава, усреднённые за время облучения (см. таблицу). Также был определён вклад различных сил в уравнение гидродинамики в приближении мелкой воды с учётом силы вязкого трения [3]:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\eta}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + a, \quad (5)$$

Результаты расчётов в эксперименте с двухкомпонентной мишенью

Параметр	Маркер 2	Маркер 3	Маркер 4
Расстояние от оси потока R , мм	10	25	40
Тепловая нагрузка Q , МДж/м ²	0,57	0,46	0,32
Толщина расплавленного слоя h , мкм	35	15	5
Скорость v , м/с	0,4	3,3	1,1
Ускорение $\partial v/\partial t$, м/с ²	750	6500	2100
Инерционный член $v \cdot \partial v/\partial x$, м/с ²	35	2700	270
Ускорение, обусловленное градиентом давления, $(1/\rho)\partial p/\partial x$, м/с ²	420	420	420
Ускорение, связанное с вязким трением, $(\eta/\rho)(\partial^2 v)/(\partial z^2)$, м/с ²	-193	-9200	-27 500
Ускорение неучтённых сил a , м/с ²	560	18 000	29 500

где η — динамическая вязкость; ρ — плотность металла; a — ускорение всех неучтённых сил. Толщина расплава h была получена из решения уравнения теплопроводности по модели прогрева, представленной в работе [11]. При $Q = 0,6$ МДж/м² давление плазменного потока в центре мишени составляет 1 атм. [11]. В расчёты закладывался линейный спад давления от центра мишени к краю плазменного потока.

Исходя из представленных в таблице результатов расчёта, сила, поддерживающая движение расплавленного слоя, должна создавать ускорение порядка 10^4 м/с². Видно, что градиент давления не способен обеспечить наблюдаемое в эксперименте перемещение расплава, что соответствует выводам работы [8].

Максимальный вынос материала происходит на маркерах, расположенных примерно посередине между центром потока и границей расплавленной зоны. Таким образом, перемещение расплава в эксперименте с двухкомпонентной мишенью в целом соответствует профилю поверхности сплошных мишеней [8]. Масштаб скорости расплава составляет 10 м/с.

ЭКСПЕРИМЕНТ С ВРАЩАЮЩЕЙСЯ МИШЕНЬЮ

После оценки действующих на расплав сил было предложено изучить, как дополнительное, известное по величине ускорение повлияет на движение расплава. Такое ускорение можно создать, раскрутив мишень непосредственно перед воздействием плазмы. К примеру, уже при частоте вращения $\nu \approx 6000$ об./мин на расстоянии от центра $r \approx 2$ см центростремительное ускорение составит

$$a = (2\pi \nu)^2 r \approx 8000 \text{ м/с}^2, \quad (6)$$

что по порядку величины совпадает с ускорением расплава, определённым в эксперименте с двухкомпонентной мишенью. Следовательно, можно ожидать, что вращение мишени окажет значительное влияние на движение расплавленного слоя, а это, в свою очередь, должно изменить профиль поверхности и картину возникающих на ней волн.

В качестве мишени использовался диск из нержавеющей стали диаметром 120 мм и толщиной 3 мм. Диск крепился с помощью четырёх винтов к втулке из капрлона, плотно насаженной на вал электродвигателя. Мотор устанавливается внутри цилиндрического дюралевого корпуса.

Схема синхронизации обеспечивала разгон электродвигателя до заданной частоты вращения и старт разряда КСПУ-Т при одном и том же положении мишени. Электродвигатель с мишенью, блок питания и плата синхронизации показаны на рис. 9. Непосредственно в вакуумной камере установки располагается двигатель с мишенью, линии электронной схемы управления и блока питания выводились через вакуумный разъём.

В ходе эксперимента неподвижная и вращающаяся мишени подвергались облучению плазмой при одинаковой тепловой нагрузке, равной 1 МДж/м² (на оси потока). Длительность облучения составляла 1 мс. Было проведено 17 облучений неподвижной мишени. Вращающаяся мишень подверглась девяти воздействиям плазмы при частоте вращения 6000 об./мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА С ВРАЩАЮЩЕЙСЯ МИШЕНЬЮ

После облучения плазмой было проведено исследование структуры поверхности мишеней и измерены их профили (рис. 10). Представленный результат получен в пересчёте на одно плазменное воздействие.

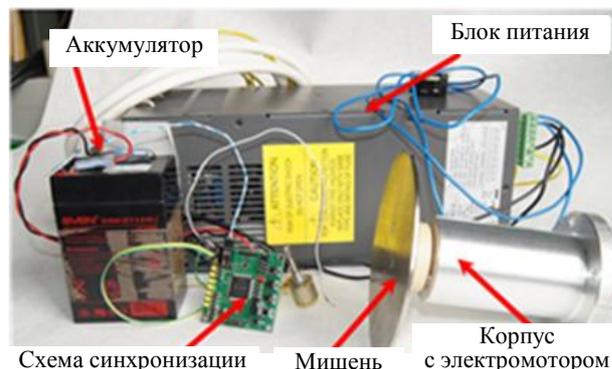


Рис. 9. Система с вращающейся мишенью

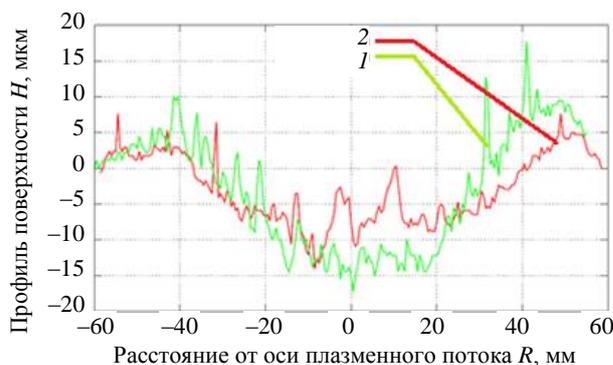


Рис. 10. Профили поверхностей вращающейся (1) и неподвижной (2) мишеней

Видно, что наличие центробежной и кориолисовой сил приводит к изменению формы кратера эрозии — выравниванию его поверхности в центральной области.

На неподвижной мишени возникают широкие, извилистые волны (рис. 11). Вращение существенно меняет картину течения, а именно наблюдаются вытянутые искривлённые струи застывшего металла. Пространственный период таких волн равен $\sim 1,5$ мм.

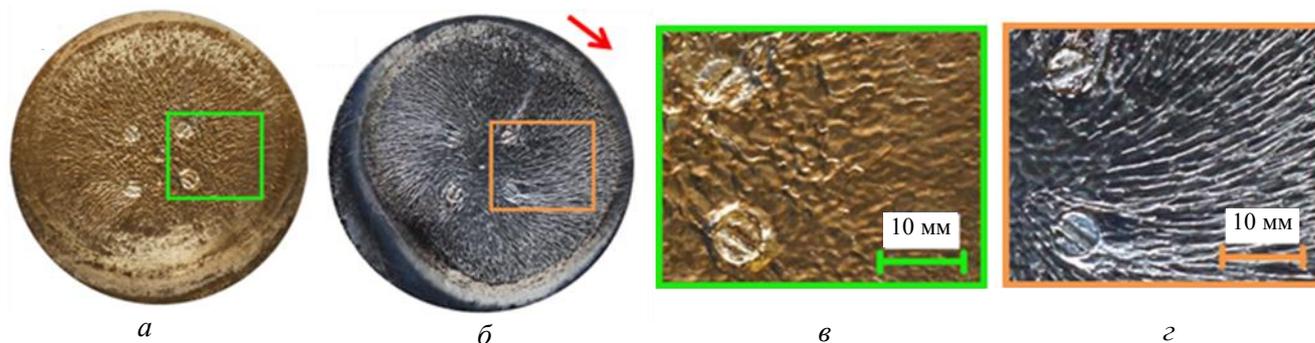


Рис. 11. Общий вид неподвижной мишени (а); вращающаяся мишень (стрелкой указано направление вращения) (б); волновая структура на неподвижной (в) и вращающейся мишени (з)

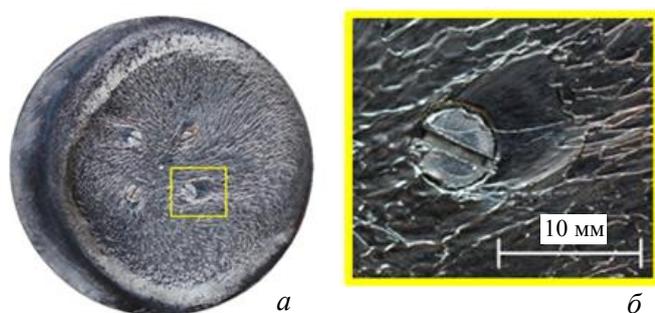


Рис. 12. Область невозмущённого течения за крепёжным винтом (а) и вращающаяся мишень после первого облучения (б)

Профиль вращающейся мишени несимметричен: заметен больший вынос материала вправо, что говорит о несовпадении центра потока и оси вращения (расстояние между ними по поверхности примерно 5 мм). За крепёжными винтами в радиальном направлении на обеих мишенях присутствуют невозмущённые области течения (рис. 12). По-видимому, головки винтов несколько выступают над плоскостью дисков и являются препятствиями как для растекающейся над поверхностью плазмы, так и для движения расплава. С увеличением количества плазменных воздействий в этих областях также появляются возмущения.

Таким образом, вращение мишени заметно повлияло на движение слоя жидкого металла, изменяя профиль поверхности и картину течения расплава. В дальнейшем планируется провести эксперимент при различных тепловых нагрузках и частотах вращения. Это поможет обнаружить закономерности в течении расплава и использовать полученные данные для проверки моделей движения расплавленного слоя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовалось движение расплавленного металлического слоя под действием плазменно-тепловых нагрузок, характерных для переходных процессов в ИТЭР. В ходе работы на установке КСПУ-Т были проведены эксперименты с двухкомпонентной и вращающейся мишенью.

В эксперименте с двухкомпонентной мишенью получены оценки скорости и ускорения расплава на различных расстояниях от центра плазменного потока. Определён вклад градиента давления и силы вязкого трения в суммарное ускорение. Показано, что перемещение расплава не может быть объяснено только действием градиента давления. Сила, обеспечивающая движение жидкого металла, создаёт ускорение порядка $10\,000$ м/с², скорость его движения может достигать 10 м/с.

Наличие центробежной и кориолисовой сил привело к изменению характерной формы кратера эрозии. В центральной части кратера отсутствует возвышение, характерное для неподвижной мишени. Кроме того, изменилась картина течения расплавленного слоя: наблюдаются вытянутые искривлённые струи застывшего металла. Таким образом, вращение мишени заметным образом влияет на течение расплава, меняет форму и пространственный период волновых структур. Варьирование условий экспери-

мента (тепловой нагрузки и частоты вращения) поможет обнаружить новые закономерности в течении расплава, что позволит проверить модели движения расплавленного слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hirai T., Maier H., Rubel M., Mertens Ph. et al.** R&D on full tungsten divertor and beryllium wall for JET ITER-like wall project. — *Fusion Engineering and Design*, 2007, vol. 82, p. 1839—1845.
2. **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, vol. 128, p. 222—228.
3. **Pitts R.A., Carpentier S., Escourbiac F. et al.** A full tungsten divertor for ITER: physics issues and design status. — *J. of Nuclear Materials*, 2013, vol. 438, p. S48—S56.
4. **Arkhipov N.I., Bakhtin V.P., Safronov V.M. et al.** — *J. of Nuclear Materials*, 1995, vol. 220—222, p. 1066.
5. **Belan V.G., Levashov V.F., Maynashev V.S. et al.** — *Ibid.*, 1996, vol. 233—237, p. 763.
6. **Linke J., Akiba M., Bolt H. et al.** — *Ibid.*, 1994, vol. 212—215, p. 767.
7. **Nakamura K., Suzuki S., Tanabe T. et al.** — *Fusion Engineering and Design*, 1998, vol. 39—40, p. 295.
8. **Позняк И.М., Климов Н.С., Подковыров В.Л. и др.** Эрозия металлов при воздействии интенсивных потоков плазмы. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2012, т. 35, № 4, с. 23—33.
9. **Мартыненко Ю.В.** Движение расплавленного слоя металла и капельная эрозия при воздействии плазменных потоков, характерных для переходных режимов ИТЭР. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2014, т. 37, № 2, с. 53—59.
10. **Климов Н.С., Подковыров В.Л., Жиглухин А.М. и др.** — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2009, вып. 2, с. 52—61.
11. **Климов Н.С.** Макроскопическая эрозия материалов при их облучении интенсивными потоками плазмы. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. ТРИНИТИ, 2011. 209 с.
12. **Klimov N.S., Linke J., Pitts R.A. et al.** Stainless steel performance under ITER-relevant mitigated disruption photonic heat loads. — *J. of Nuclear Materials*, 2013, vol. 438, p. 241—245.
13. **Должанский Ф.В., Крымов В.А., Манин Д.Ю.** Устойчивость и вихревые структуры квазидвумерных сдвиговых течений. — *УФН*, 1990, т. 160, № 7, с. 1—45.



Игорь Михайлович Позняк, н.с.; Московский физико-технический институт, 141700 Московская обл., Долгопрудный, Институтский пер. 9, Россия; Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Троицк, Москва, Россия teufida@gmail.com



Валерий Михайлович Сафронов, д.ф.м.н.; Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Троицк, Москва, Россия; Проектный центр ИТЭР, 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия; Московский физико-технический институт, 141700 Московская обл., Долгопрудный, Институтский пер. 9, Россия v.safronov@iterrf.ru



Вадим Юрьевич Цыбенко, бакалавр, магистратура; Московский физико-технический институт, 141700 Московская обл., Долгопрудный, Институтский пер. 9, Россия; Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Троицк, Москва, Россия VadimTsybenko@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 16 декабря 2015 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2016, т. 39, вып. 1, с. 15—21.