

УДК 533.924

## ЭРОЗИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИНТЕНСИВНЫХ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ

*И.М. Позняк, Н.С. Климов, В.Л. Подковыров, В.М. Сафронов, А.М. Житлухин, Д.В. Коваленко*

*Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Троицк, Москва, Россия*

В настоящее время одной из ключевых проблем в создании экспериментального токамака-реактора ИТЭР является проблема теплозащитных материалов дивертора и первой стенки. В работе представлены результаты экспериментального исследования эрозии металлических образцов (из вольфрама, ниобия, стали, меди и алюминия) при воздействии интенсивных потоков водородной плазмы в условиях, характерных для переходных плазменных процессов в ИТЭР. Основное внимание сосредоточено на двух механизмах эрозии: перемещении расплавленного слоя по облучаемой поверхности и капельном разбрызгивании жидкого металла. Показано, что основным процессом, определяющим скорость эрозии металлов, является перемещение расплавленного слоя по поверхности, вызывающее утончение защитного покрытия, которое в исследованном диапазоне параметров на порядок превосходит эрозию, связанную с выбросом капель. При этом скорость эрозии, обусловленная движением расплава, остаётся постоянной и не зависит от числа плазменных воздействий. Глубина кратера эрозии растёт пропорционально числу воздействий. Проведена классификация материалов по характеру течения расплава — исследованные металлы можно разбить на две группы. К первой относятся вольфрам, ниобий и сталь. Для этих материалов характерны интенсивное течение расплавленного слоя, хаотичный выброс капель в результате разбрызгивания расплава и отсутствие признаков интенсивного кипения. Во вторую группу входят медь и алюминий. После плазменного воздействия их поверхность покрыта «пенной», состоящей из пузырьков застывшего металла. Выполнено численное моделирование динамики нагрева образца и формирования кратера эрозии на его поверхности. Показано, что движение жидкого металлического слоя происходит под действием силы, существенно превышающей силу, обусловленную градиентом давления плазмы по сечению плазменного потока.

**Ключевые слова:** ИТЭР, дивертор, эрозия материалов, продукты эрозии, плазменные ускорители.

## EROSION OF METALS UNDER THE ACTION OF INTENSE PLASMA STREAM

*I.M. Poznyak, N.S. Klimov, V.L. Podkovyrov, V.M. Safronov, A.M. Zhitlukhin, D.V. Kovalenko*

*State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for innovation & fusion research, Troitsk, Moscow, Russia*

One of the key problem in the ITER project today is a choice of armour materials for the divertor and the first wall. The paper presents experimental results on investigation of erosion of metallic targets (tungsten, niobium, steel, copper and aluminum) exposed to the intense hydrogen plasma streams under the conditions, relevant to the transient events in ITER. The main attention was focused on two erosion mechanisms: displacement of the melt layer along the target surface and droplets splashing from the molten metal. It is shown that the main process determining a rate of the metal erosion is a reduction of the sample thickness because of the melt movement along the surface. The erosion rate caused by the melt displacement is one order of magnitude greater than the erosion caused by droplet splashing. Depth of the erosion crater increases proportionally to the number of plasma exposures. The metals under consideration were classified according to the type of the melt motion and two groups were distinguished. The first group includes tungsten, niobium and steel. These metals demonstrate intense movement of the melt layer, random droplet splashing and absence of boiling. The second group includes copper and aluminum. The surfaces of these targets are covered with foam consisting of the hollow metal bubbles. Numerical simulation is performed for the target heating and crater formation. It's shown the melt movement occurs due to the action of a force which is considerably greater than the force arising because of plasma pressure gradient.

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

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одной из ключевых проблем в создании экспериментального токамака-реактора ИТЭР является проблема теплозащитных материалов дивертора и первой стенки. Эти элементы вакуумной камеры должны противостоять интенсивному плазменно-тепловому воздействию как во время стационарного режима работы токамака, так и во время переходных плазменных процессов, таких, как ЭЛМ-события и срывы тока. Предполагается, что тепловая нагрузка на диверторные пластины ИТЭР во время ЭЛМ-событий будет достигать  $Q = 0,2\text{—}5$  МДж/м<sup>2</sup> при длительности воздействия  $t = 0,1\text{—}1$  мс, во время срывов тока —  $Q = 10\text{—}100$  МДж/м<sup>2</sup> при  $t = 1\text{—}10$  мс [1, 2].

В качестве наиболее подходящих материалов для облицовки дивертора ИТЭР рассматривают углеграфитовые материалы и вольфрам (чистый и с добавками других элементов). Для защиты вакуумной камеры рассматривают материалы, покрытые слоем бериллия. При указанных тепловых потоках будет происходить испарение защитных материалов. С одной стороны, это может привести к быстрому износу

элементов дивертора [1, 3], с другой — к поступлению примесей в вакуумную камеру, что может повлечь радиационное охлаждение плазмы.

Большую опасность представляет также макроскопическая эрозия, которая характеризуется более низкими значениями удельной энергии по сравнению с испарением и распылением [4—6]. Как в случае металлов, так и углеродистых композитов возникающие при плазменном воздействии термические напряжения приводят к образованию трещин, ухудшению теплопроводности и выбросу в вакуумную камеру частичек вещества [7]. Образующаяся при этом пыль обладает большой суммарной поверхностью, что способствует адсорбции радиоактивного трития. Это накладывает ограничение на максимальное содержание продуктов эрозии в вакуумной камере [8]. Следует отметить, что в случае металлов наряду с хрупким разрушением опасность представляет эрозия, обусловленная движением расплавленного слоя по поверхности, которая может сопровождаться расплескиванием и выбросом капель из расплава [9].

Для выяснения физической картины взаимодействия интенсивных плазменных потоков с защитными материалами и получения ключевых экспериментальных данных, без которых невозможно построить и проверить расчётно-теоретические модели происходящих явлений, необходимо проведение модельных экспериментов. Поскольку ни на одном из существующих токамаков невозможно воспроизвести условия, ожидаемые во время ЭЛМов и срывов тока в ИТЭР, для испытания материалов применяются мощные плазменные ускорители [10—13, 18] и электронные пучки [14—17].

Данная работа посвящена исследованию эрозии металлов при воздействии интенсивных плазменных потоков. Основное внимание было сосредоточено на двух механизмах эрозии: перемещении расплавленного слоя по поверхности образца и капельном разбрызгивании жидкого металла. Эксперименты проводились на квазистационарном плазменном ускорителе КСПУ-Т [9] и импульсном плазменном ускорителе МК-200 [18]. В качестве материалов мишеней применялись вольфрам, ниобий, сталь, медь и алюминий. Выбор металлов обусловлен их доступностью в лаборатории и схожими теплофизическими характеристиками с вольфрамом и бериллием.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ДИАГНОСТИКА

**Импульсный плазменный ускоритель МК-200.** Установка состоит из плазменного ускорителя, плазмопровода длиной 9,5 м и мишенной камеры с набором диагностик (рис. 1). Питание ускорителя происходит от конденсаторной батареи ёмкостью 1152 мкФ. Рабочее напряжение меняется в диапазоне 13—25 кВ, что соответствует изменению энергии от 100 до 360 кДж. В описываемых экспериментах в качестве плазмообразующего газа использовали водород.

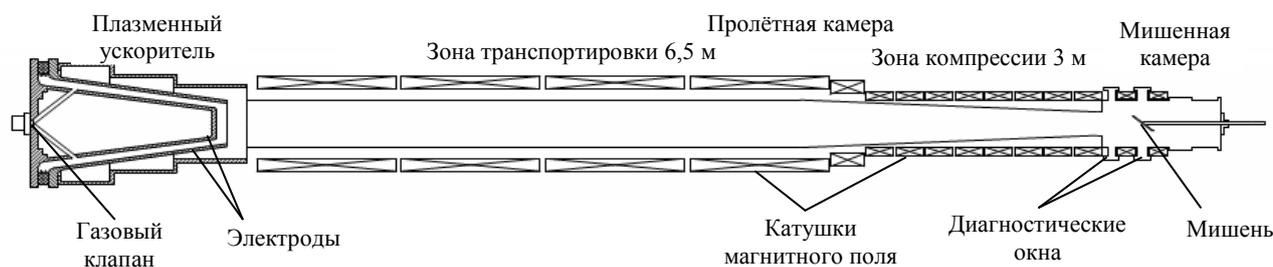


Рис. 1. Схема плазменной установки МК-200

Плазмопровод состоит из зоны транспортировки — цилиндрической части длиной 6,5 м и диаметром 30 см, а также зоны сжатия и замагничивания плазменного потока — конической секции длиной 3 м и диаметром 30 см на входе и 15 см на выходе. Движение плазмы от ускорителя к мишени происходит в продольном однородном магнитном поле величиной  $B = 0,7$  Тл, в зоне сжатия магнитное поле возрастает по длине от 0,7 до 2,8 Тл.

Облучаемые образцы располагают в цилиндрической мишенной камере длиной 50 см и диаметром 30 см. Камера заполнена продольным магнитным полем, величина которого варьируется в диапазоне 0,5—2 Тл. Камера имеет диагностические окна, к которым пристыковываются средства диагностики.

Тепловую нагрузку  $Q$  на мишень варьируют как за счёт изменения рабочего напряжения ускорителя, так и за счёт величины магнитного поля  $B$  в мишенной камере: чем выше  $B$ , тем выше концентрация

частиц  $n$  в плазменном потоке. При этом энергия направленного движения ионов во всех режимах поддерживается на уровне 2—3 кэВ.

**Квазистационарный плазменный ускоритель КСПУ-Т.** КСПУ-Т — квазистационарный сильноточный плазменный ускоритель с собственным магнитным полем. Ускорение плазмы происходит под действием силы Ампера, возникающей при взаимодействии тока, текущего через разрядный промежуток между коаксиальными электродами ускорителя, с собственным магнитным полем. Поскольку плазмообразующий газ подаётся в разрядный промежуток непрерывно, длительность плазменного потока определяется временем существования напряжения между электродами ускорителя.

Энергетика установки включает в себя шесть секций конденсаторных батарей ёмкостью по 8 мФ каждая. Схема коммутации батарей позволяет менять длительность разрядного тока, а следовательно, и плазменного потока от 0,2 до 0,6 мс. При максимальном рабочем напряжении 5 кВ суммарная энергия батарей составляет 600 кДж.

Исследуемые образцы располагаются в цилиндрической камере диаметром 40 см на расстоянии 60 см от электродов ускорителя. Угол падения потока плазмы на мишень варьируется от  $\beta = 0$  (нормальное падение) до  $\beta = 80^\circ$  (рис. 2).

В качестве плазмообразующего газа, как и в экспериментах на МК-200, использовался водород. Тепловая нагрузка, поступающая с плазмой на поверхность исследуемых образцов, варьировалась за счёт изменения напряжения на конденсаторной батарее. В описываемых экспериментах длительность плазменного воздействия составляла 0,5 мс.

**Характеристики плазменных потоков.** В таблице приведены характеристики плазменных потоков на установках МК-200 и КСПУ-Т. Символом \* отмечены те параметры, которые близки к ожидаемым во время срывов тока и ЭЛМов в ИТЭР.

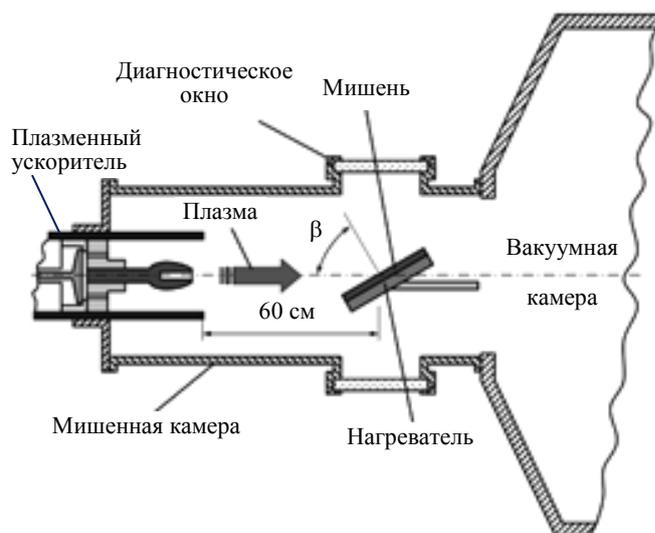


Рис. 2. Схема облучения образцов на плазменном ускорителе КСПУ-Т

**Характеристики плазменных потоков ускорителей МК-200 и КСПУ-Т**

Параметр	МК-200		КСПУ-Т
	Моделирование срывов тока	Моделирование ЭЛМов и ослабленных срывов	Моделирование срывов и ЭЛМов
Тепловая нагрузка $Q$ , МДж/м <sup>2</sup>	10—15	0,05—1	0,2—5
Поток энергии $w$ , ГВт/м <sup>2</sup>	200—300*	1—20*	5—200*
Длительность потока $t$ , мкс	50	50	500*
Энергия ионов $E_i$ , кэВ	2*	3*	0,01—0,5
Плотность плазмы $n$ , м <sup>-3</sup>	(2—3)10 <sup>21</sup> *	(0,1—2)10 <sup>20</sup> *	(1—10)10 <sup>22</sup>
Давление плазмы $p$ , Па	≤(10)10 <sup>5</sup> *	< (0,02—0,5)10 <sup>5</sup> *	(1—10)10 <sup>5</sup>
Магнитное поле $B$ , Тл	2*	0,5—2*	0
Диаметр потока $d$ , см	6*	6—10*	6*

Для установки МК-200 поток тепла  $w$ , энергия ионов  $E_i$ , плотность  $n$  и давление  $p$  плазмы, а также магнитное поле  $B$  в плазме близки к параметрам, ожидаемым во время срывов тока и ЭЛМов в диверторе ИТЭР. Недостатком установки является малая длительность  $t$  плазменного импульса. Это усложняет проведение ресурсных испытаний защитных покрытий, поскольку эрозия материала растёт практически линейно с длительностью плазменного воздействия [19], и для испытания материалов на МК-200 требуется проводить большое количество облучений образцов.

Недостатками КСПУ-Т, в свою очередь, являются низкая энергия направленного движения ионов  $E_i$ , отсутствие магнитного поля  $B$ , а также высокая плотность  $n$ , а значит — и давление  $p$  плазмы. Однако при идентичных тепловых потоках  $w$  длительность плазменного воздействия  $t$  на КСПУ-Т на порядок больше, чем на МК-200. Именно поэтому ресурсные испытания защитных покрытий дивертора ИТЭР

проводят на квазистационарном ускорителе, а плазменные процессы, развивающиеся при воздействии интенсивных потоков плазмы на материалы, изучают на МК-200.

**Средства диагностики.** В каждом эксперименте по облучению мишеней потоками плазмы осуществляли контроль плотности энергии  $Q$ , поглощённой образцом. Для этих целей использовали термопарные калориметры. Зная площадь поверхности  $S$ , подвергавшейся воздействию плазмы, массу  $m$ , удельную теплоёмкость материала калориметра  $c$  и изменение его температуры  $\Delta T$ , можно определить  $Q = cm\Delta T/S$ .

При воздействии интенсивного плазменного потока с поверхности металлов вылетают капли, разогретые до высокой температуры. Для их регистрации использовалась схема, изображённая на рис. 3 и подробно описанная в работе [9]. Основной схемой являются ПЗС-камера и установленный перед ней обтюратор — вращающийся диск с отверстиями, который периодически открывает и закрывает объектив камеры. Использование обтюратора позволяет привязку координат капли на фотоснимке к известным моментам времени, отсчитываемым от начала плазменного воздействия. Система уравнений движения капли, записанная для фиксированных обтюратором моментов времени, позволяет определить координаты, время вылета, а также компоненты скорости с относительной точностью 15—20% [9]. Кроме того, как показано в работе [9], можно вычислить размер капли по скорости изменения яркости её свечения.

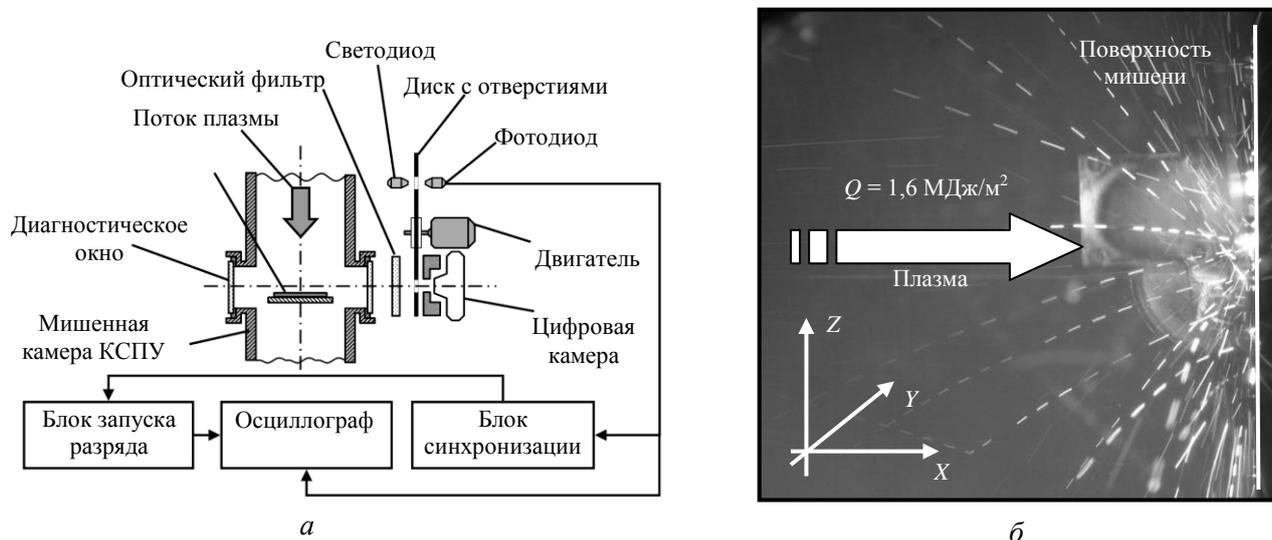


Рис. 3. Схема регистрации продуктов макроскопической эрозии (а) и типичная фотография треков капель, выбрасываемых с облучаемой поверхности (б)

Регистрацию частиц, вылетающих с поверхности облучаемых образцов, начинали с некоторой задержкой после окончания плазменного воздействия и вели в течение 60 мс. Необходимость задержки обусловлена интенсивным свечением приповерхностной плазмы, которое спадает до приемлемого для регистрации уровня за 2—4 мс.

Помимо регистрации капель, проводили исследования поверхности образцов на оптическом и электронном сканирующем микроскопах. Кроме того, для исследования рельефа поверхности и его изменений в зависимости от числа плазменных воздействий и тепловых нагрузок использовали механический двухсторонний профилометр, позволяющий учесть изгибание металлических образцов вследствие возникновения в них термических напряжений.

Потери массы за счёт испарения и выброса частиц с поверхности определяли путём взвешивания мишеней до и после облучения. Точность взвешивания составляла 4 мг при массе образца до 1 кг.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве мишеней использовали плоские квадратные пластины из вольфрама, стали, ниобия, меди и алюминия. Их внешний вид, с указанием геометрических размеров, приведён на рис. 4. Для устранения краевых эффектов размеры образцов выбирались таким образом, чтобы они полностью перекрывали плазменный поток.

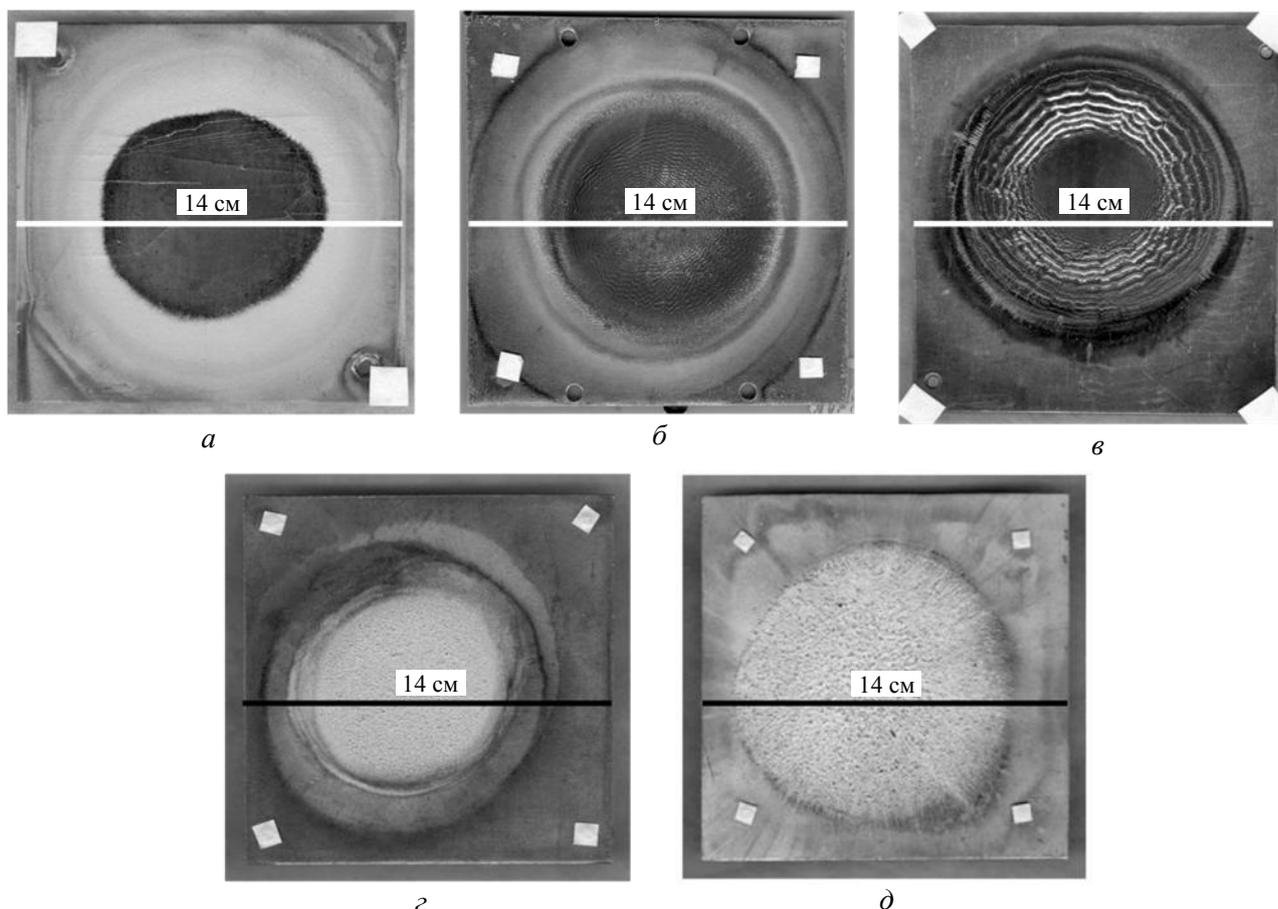


Рис. 4. Внешний вид облучённых мишеней: *a* — вольфрам; *б* — сталь; *в* — ниобий; *г* — медь; *д* — алюминий

Образцы подвергали сериям плазменных воздействий на установке КСПУ-Т. Тепловую нагрузку  $Q$  в каждой серии постепенно увеличивали от 0,5 до 4,5 МДж/м<sup>2</sup>. Облучение мишеней осуществляли при нормальном падении плазменного потока на поверхность. При помощи описанной диагностики (см. рис. 3) во время облучений проводили регистрацию капель. Кроме того, после каждого воздействия образец изымался из мишенной камеры для измерения потерь массы, исследования профиля и микроструктуры поверхности.

Зависимость удельных потерь массы мишеней от тепловой нагрузки показана на рис. 5, *a*. Наиболее быстро убывает масса алюминиевого образца — для него потери массы монотонно возрастают от 1 до 250 г/м<sup>2</sup> за одно плазменное воздействие в интервале тепловых нагрузок  $Q = 1,0—2,4$  МДж/м<sup>2</sup>. В этом

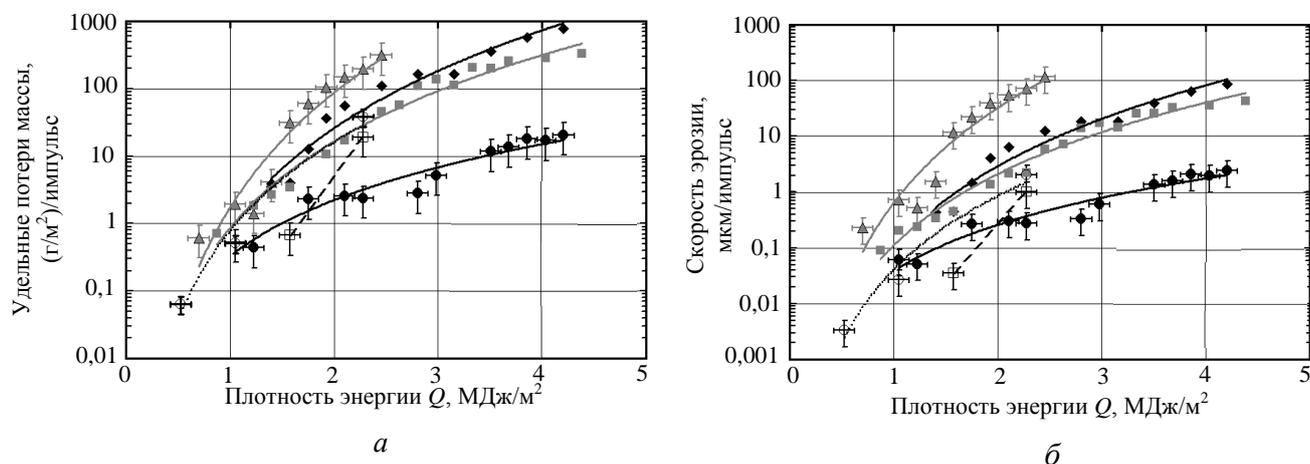


Рис. 5. Удельные потери массы (*a*) и скорость эрозии, вычисленная из удельных потерь массы (*б*), в зависимости от тепловой нагрузки:  $\blacktriangle$  — Al;  $\blacklozenge$  — Cu;  $\blacksquare$  — сталь;  $\bullet$  — Nb;  $\square$  — W;  $\circ$  — W—1%La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

же интервале нагрузок потери массы ниобиевого образца оказываются минимальными и на два порядка меньше, чем для алюминия. При  $Q = 2,4 \text{ МДж/м}^2$  они составляют всего  $2,5 \text{ г/м}^2$  за воздействие.

Зная плотность материала мишени  $\rho$ , потери массы  $\Delta m$  и диаметр плазменного потока  $d$ , можно определить среднюю скорость эрозии  $\Delta h = 4\Delta m/\pi\rho d^2$  за импульс (рис. 5, б). Как видно на графике, наиболее быстро эродирует алюминиевый образец — при тепловой нагрузке  $Q = 2,4 \text{ МДж/м}^2$  с его поверхности удаляется слой вещества толщиной  $\Delta h = 100 \text{ мкм}$  за воздействие. Меньше всего подвержен эрозии ниобий — при той же плазменной нагрузке скорость эрозии этого материала составляет менее  $\Delta h = 1 \text{ мкм/импульс}$ . Наиболее близким по скорости эрозии к ниобию оказывается вольфрам, имеющий высокую плотность  $\rho = 19,3 \text{ г/см}^3$ . При тепловой нагрузке  $Q = 2,4 \text{ МДж/м}^2$  толщина вольфрамового образца уменьшается за одно облучение на величину порядка 2 мкм. Медь и сталь имеют близкую скорость эрозии — около 10 мкм за воздействие, что на порядок больше, чем для ниобия, но при этом на порядок меньше скорости эрозии алюминия.

На рис. 6, а, б показаны результаты исследования поверхности стальной мишени на механическом профилометре после многократных плазменных воздействий. Облучение образца осуществляли сериями по 25 импульсов в каждой при четырёх фиксированных значениях тепловой нагрузки. Измерение профиля поверхности проводили по окончании каждой серии облучений. Кроме того, для изучения изменения рельефа поверхности в зависимости от числа плазменных воздействий при  $Q = 1,9 \text{ МДж/м}^2$  после 5, 15 и 25 облучений были проведены промежуточные измерения (см. рис. 6, а).

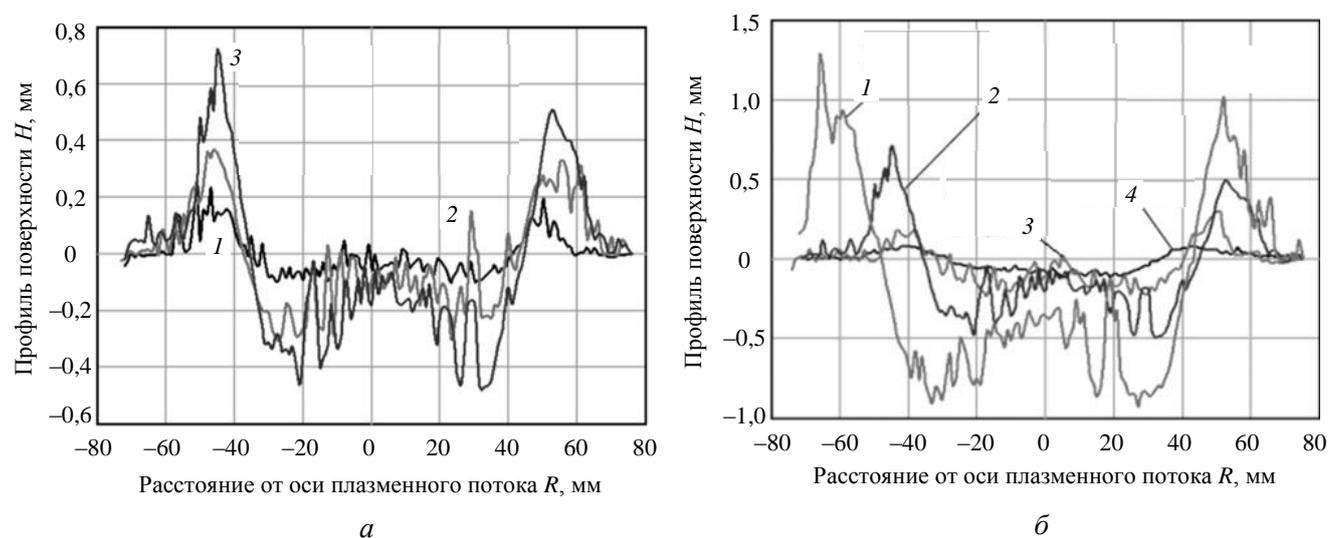


Рис. 6. Профиль поверхности стальной мишени в зависимости от числа плазменных воздействий (а): 1 — 5, 2 — 15, 3 — 25 воздействий; величина плазменной нагрузки (б): 1 —  $2,5 \text{ МДж/м}^2$ , 4,0 атм, 25 пусков; 2 —  $1,9 \text{ МДж/м}^2$ , 3,0 атм, 25 пусков; 3 —  $1,6 \text{ МДж/м}^2$ , 2,3 атм, 25 пусков; 4 —  $1,1 \text{ МДж/м}^2$ , 1,5 атм, 50 пусков

Анализ полученных данных (см. рис. 6, а, б) позволяет сделать следующие выводы:

— под действием плазменного потока происходит перемещение расплавленного материала мишени с оси потока к его периферии, что приводит к образованию кратера эрозии на поверхности образца;

— увеличение числа плазменных воздействий при фиксированной тепловой нагрузке  $Q = 1,9 \text{ МДж/м}^2$  приводит к увеличению глубины  $H$  кратера, при этом его эффективный радиус  $R$  не меняется (см. рис. 6, а);

— увеличение тепловой нагрузки  $Q$  влечёт за собой рост как глубины  $H$ , так и радиуса  $R$  образующегося кратера (см. рис. 6, б).

На основании выполненных профилометрических измерений была определена зависимость максимальной и средней глубины кратера на поверхности стального образца от числа плазменных воздействий при фиксированной тепловой нагрузке (рис. 7). Обе величины линейно возрастают с увеличением числа облучений, и при  $Q = 1,9 \text{ МДж/м}^2$  средняя скорость эрозии стали оказывается равной 10 мкм за выстрел.

Аналогичные результаты были получены на установке МК-200 при облучении алюминиевого образца плазменным потоком шириной 0,5 см (рис. 8). Расплав, удалённый из кратера эрозии, накапливался на его краях, а глубина кратера нарастала линейно с увеличением числа плазменных воздействий.

На рис. 9 показаны поперечные срезы медной мишени после трёх плазменных облучений на МК-200. Под действием плазмы происходит плавление материала мишени и, как следствие, изменение кристаллической структуры поверхностного слоя — в нём появляются колоннообразные кристаллы. Это позволяет определить толщину расплава, образующегося на поверхности металлической мишени.

Центральная часть образца (см. рис. 9, а) подвергается наиболее интенсивному воздействию плазмы. Как следствие, металл в этой области должен проплавляться на более значительную глубину, чем на краях. Однако если сравнить полученные экспериментальные данные, то можно заметить, что толщина расплава в периферийной области (см. рис. 9, б) не меньше, чем в центральной. Это объясняется тем, что жидкий металл перемещается от центра к периферии и толщина расплава, образующегося на краях кратера эрозии, растёт с каждым новым облучением.

После первого плазменного облучения толщина расплава в периферийной области составляет  $h = h_0 + \Delta h$ , где  $h_0$  — глубина, на которую проплавляется металл под действием теплового потока,  $\Delta h$  — увеличение толщины расплава за счёт перемещения жидкого металла из центральной части мишени в данную точку. Во время следующего плазменного воздействия образовавшийся слой плавится не на полную глубину  $h_0 + \Delta h$ , а лишь на величину  $h_0$ . В результате в слое появляется промежуточная граница, которую можно наблюдать на рис. 9, б. Аналогичным образом в каждом последующем облучении формируется новая промежуточная граница, отстоящая от предыдущей на  $\Delta h$ .

Измеряя расстояние между соседними границами  $\Delta h$ , можно определить скорость увеличения толщины расплава, накапливаемого на краях кратера эрозии. Для медной мишени эта величина составляет  $\Delta h = 6\text{—}7$  мкм/разряд (см. рис. 9, б).

Для всех значений тепловых нагрузок, при которых проводилось облучение стального образца на установке КСПУ-Т, была определена средняя скорость эрозии, обусловленная перемещением расплава по поверхности мишени. Сравнение полученных данных со средней скоростью эрозии, вызванной вы-

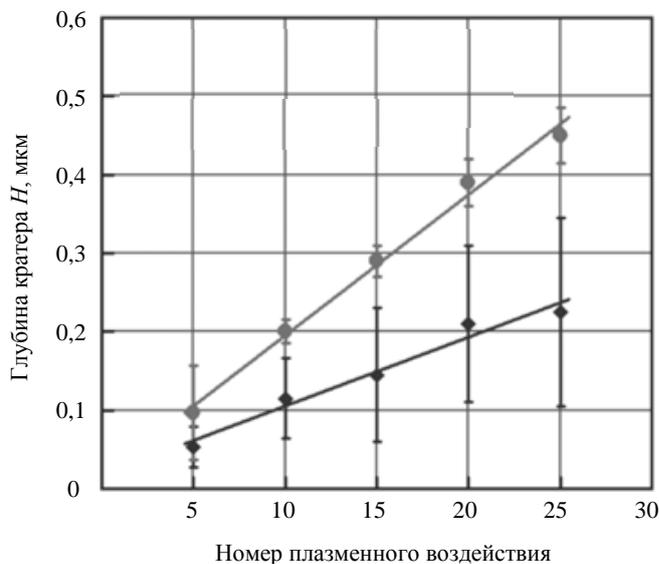


Рис. 7. Максимальная и средняя глубина кратера на поверхности стальной мишени в зависимости от числа плазменных воздействий: ● — максимальная глубина; ◆ — средняя глубина



Рис. 8. Профиль поверхности алюминиевого образца после облучения плазмой на установке МК-200

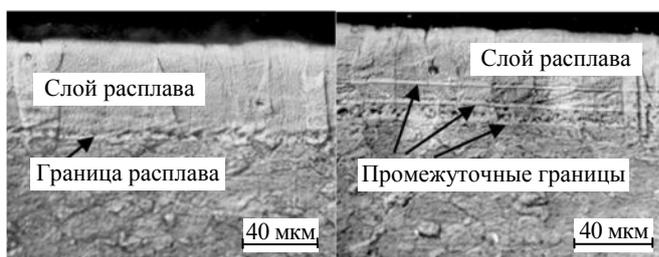


Рис. 9. Поперечные срезы медной мишени после облучения плазмой на установке МК-200: а — центральная область; б — область на краю плазменного потока

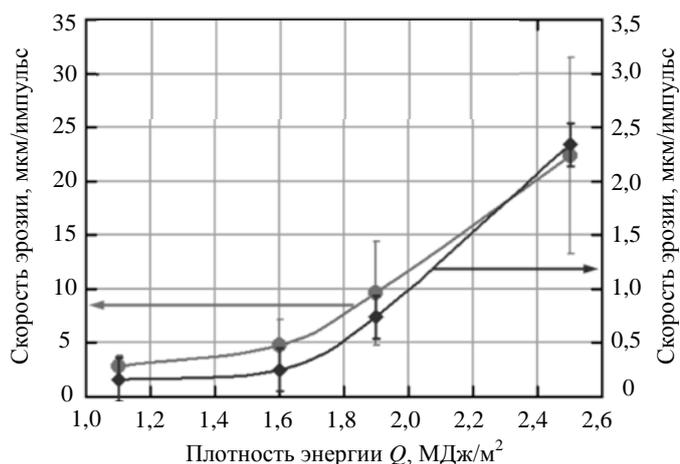


Рис. 10. Скорость эрозии стальной мишени, обусловленная движением расплава и испарением/выбросом частиц с поверхности: ● — движение расплава; ◆ — испарение и выброс капель

бросом капель, проведено на рис. 10. Видно, что эрозия, связанная с движением расплава, на порядок превышает эрозию за счёт выброса капель. Аналогичные данные были получены и для других металлических мишеней. Таким образом, перемещение расплава по облучаемой поверхности является основным механизмом эрозии, определяющим ресурсное время жизни металлических образцов. При этом выброс капель и испарение отвечают за интегральное количество продуктов эрозии, которые будут накапливаться в вакуумной камере ИТЭР.

На рис. 11 показаны результаты исследования поверхности металлических мишеней на оптическом микроскопе. По характеру образующегося рельефа облучаемые металлы можно разбить на две группы: в первую входят сталь, ниобий и вольфрам, во вторую — медь и алюминий.

На поверхности материалов первой группы отчётливо наблюдается течение расплава и практически отсутствуют застывшие пузырьки (см. рис. 11, а, б, в). Поверхность материалов второй группы после воздействия плазмы покрыта «пенной», состоящей из пузырьков застывшего металла (см. рис. 11, г, д), поэтому макроскопический перенос вещества за счёт течения расплава для этих образцов не столь заметен, как в случае металлов первой группы.

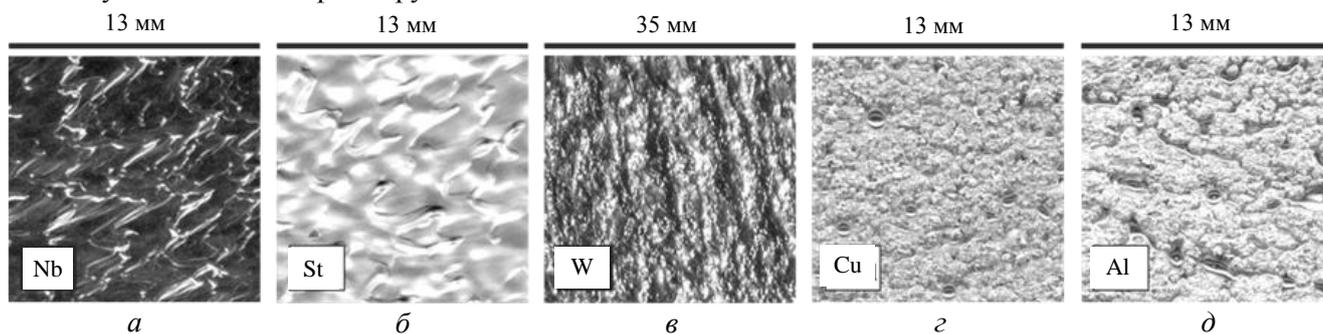


Рис. 11. Результаты исследования поверхности металлических мишеней на оптическом микроскопе

На рис. 12 показаны центральные области ниобиевой (см. рис. 12, а) и стальной (см. рис. 12, б) мишеней после 25 плазменных облучений при тепловой нагрузке  $Q = 1,9$  МДж/м<sup>2</sup>. Несмотря на то, что оба металла относятся к первой группе, видно, что течение на стали имеет более явный характер, чем на ниобии. По-видимому, это связано с большей вязкостью и меньшей глубиной расплавленного слоя в случае ниобиевого образца.

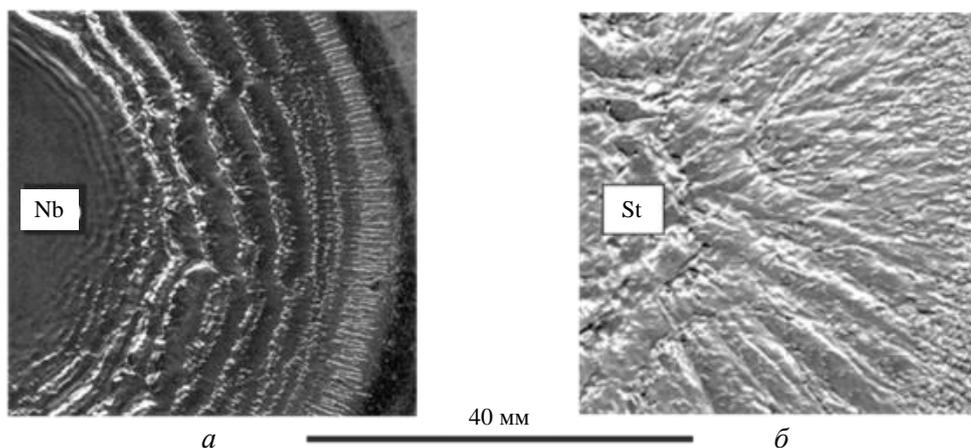


Рис. 12. Поверхность ниобиевой (а) и стальной (б) мишеней после 25 плазменных воздействий,  $Q = 1,9$  МДж/м<sup>2</sup>

Характерные стадии развития рельефа на поверхности ниобиевой мишени при увеличении тепловой нагрузки показаны на рис. 13. При  $Q = 1,6 \text{ МДж/м}^2$ , что соответствует незначительному превышению порога плавления ниобия, на поверхности образца появляется легкая рябь (см. рис. 13, *а*). Увеличение тепловой нагрузки до значения  $2,1 \text{ МДж/м}^2$  приводит к образованию очень интенсивной ряби и становится заметным формирование струй расплава (см. рис. 13, *б*). При плазменной нагрузке  $Q = 4,2 \text{ МДж/м}^2$  металлические струи вытягиваются вдоль радиуса (см. рис. 13, *в*), причём на концах струй наблюдается формирование утолщений и капель (см. рис. 13, *г*). Наблюдаемый рельеф свидетельствует об отсутствии ламинарности течения расплава, а наличие неупорядоченной хаотичной структуры — о возможном развитии гидродинамических неустойчивостей при движении расплавленного слоя под действием плазменного потока.

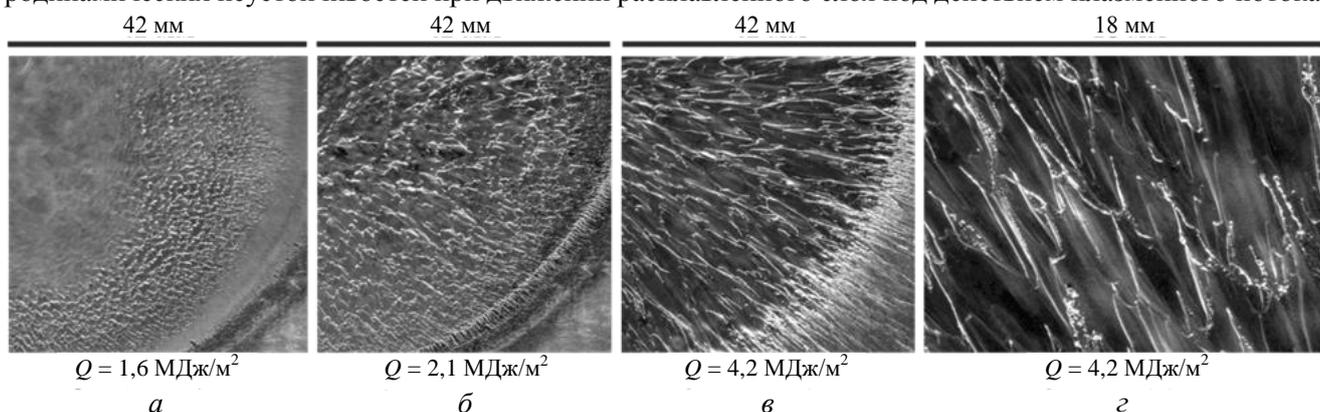


Рис. 13. Развитие рельефа на поверхности ниобиевой мишени при увеличении плазменной нагрузки

На рис. 14 представлены результаты регистрации капель, вылетающих с поверхности стальной (см. рис. 14, *а*) и алюминиевой (см. рис. 14, *б*) образцов. Видно, что для алюминия выброс частиц осуществляется симметрично относительно оси плазменного потока, в то время как для стали этот процесс носит неупорядоченный, хаотичный характер. На первый взгляд, беспорядочный выброс частиц должны давать металлы второй группы, имеющие гораздо более развитую поверхность, а значит и предпосылки для возникновения процессов, приводящих к хаотичному разбрызгиванию жидкометаллического слоя. Однако экспериментальные результаты не подтверждают это предположение.

Было проведено численное моделирование динамики нагрева и движения расплавленного слоя по поверхности исследуемых образцов. Для этого в цилиндрической системе координат совместно решали уравнения теплопроводности и гидродинамики. В расчётах использовали характерные параметры потоков плазмы, генерируемых ускорителем КСПУ-Т. Численный код даёт возможность рассчитать распределение температуры образца, скорость расплава и профиль поверхности в произвольные моменты времени.

Сопоставление расчётных и экспериментальных данных позволило подобрать распределение давления по сечению плазменного потока таким образом, чтобы воспроизвести наблюдаемую в эксперименте

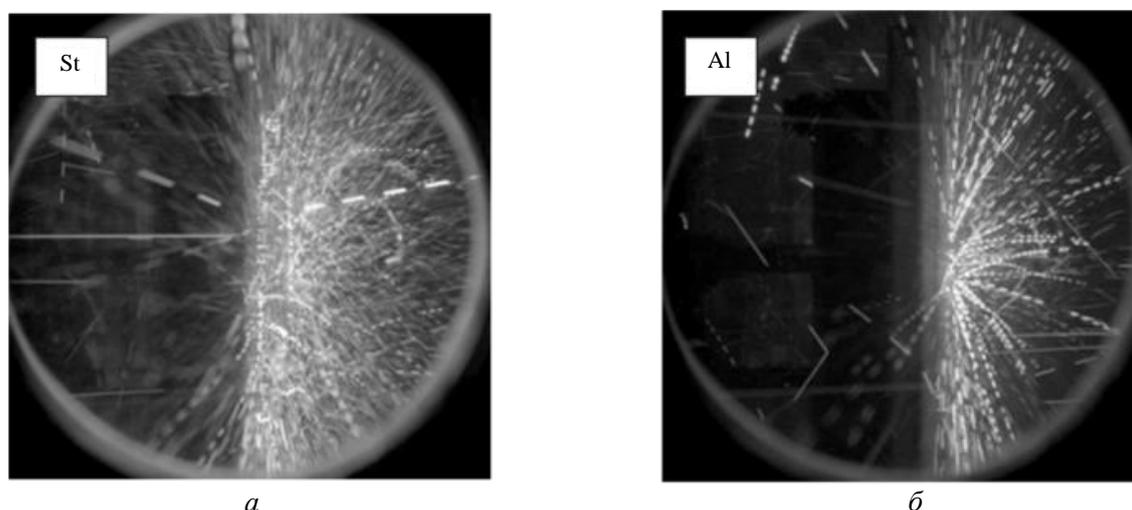


Рис. 14. Капли, вылетающие с поверхности стальной (*а*) и алюминиевой мишени (*б*)



Рис. 15. Сопоставление расчётных (1, 2 — 1,9 МДж/м<sup>2</sup>, 100 атм; 3 — 1,6 МДж/м<sup>2</sup>, 30 атм) и экспериментальных данных (4 — 1,6 МДж/м<sup>2</sup>, 2,3 атм; 5 — 1,9 МДж/м<sup>2</sup>, 3,0 атм) о профиле поверхности стального образца, 25 пусков

форму поверхности стальной мишени (рис. 15). Однако в расчётах средняя глубина кратера эрозии оказывается на порядок меньше значения, полученного экспериментально. Совпадения этих величин удаётся добиться только при десятикратном превышении давления плазмы в расчётах по сравнению с реальным давлением, измеренным в эксперименте. Этот факт позволяет сделать вывод о том, что градиент давления  $\partial p/\partial r$  плазмы не способен обеспечить наблюдаемый в эксперименте перенос вещества по поверхности мишени и давление  $p(r)$  плазмы не является основным фактором, определяющим движение расплавленного слоя.

Для более полного понимания физической картины явлений, происходящих при взаимодействии плазменного потока с металлическими защитными покрытиями, требуется проведение дальнейших исследований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовалась эрозия вольфрама, ниобия, стали, меди и алюминия под действием потоков плазмы с параметрами, характерными для ЭЛМ-событий и срывов тока в диверторе ИТЭР. Получены экспериментальные данные об эрозии перечисленных металлических мишеней за счёт перемещения расплавленного металла по поверхности и выброса капель из него. Проведено численное моделирование динамики нагрева и формирования кратера эрозии исследуемых образцов.

Показано, что основным процессом, определяющим скорость эрозии металлов, является перемещение расплавленного слоя по поверхности, вызывающее утончение защитного покрытия, которое в исследованном диапазоне параметров на порядок превосходит эрозию, связанную с выбросом капель. При этом скорость эрозии, обусловленная движением расплава, остаётся постоянной и не зависит от числа плазменных воздействий. Глубина кратера эрозии на поверхности растёт пропорционально числу облучений плазмой.

Исследованные металлы можно разбить на две группы. К первой относятся вольфрам, сталь и ниобий. Для этих материалов характерны интенсивное течение расплавленного слоя, хаотичный выброс частиц в результате разбрызгивания расплава и отсутствие признаков интенсивного кипения. Во вторую группу входят медь и алюминий. После плазменного воздействия их поверхность покрыта «пенной», состоящей из пузырьков застывшего металла, поэтому макроскопический перенос вещества за счёт течения расплава для этих образцов не столь заметен, как в случае металлов первой группы.

Сопоставление расчётных и экспериментальных данных о форме и размерах кратера эрозии на поверхности мишеней свидетельствует о том, что перемещение расплавленного слоя происходит под действием силы, на порядок превышающей силу, обусловленную градиентом давления в плазменном потоке. На сегодняшний день природа этой силы достоверно неизвестна.

## REFERENCES

1. **ITER Physics Basis.** — Nucler Fusion, 1999, vol. 39, p. 2137.
2. **Federici G., Scinner C.H., Brooks J.N. et al.** — Ibid, 2001, vol. 41, p. 1967.
3. **Van der Laan J.G., Akiba M., Hassanein A. et al.** — Fusion Engineering and Design, 1991, vol. 18, p. 135.
4. **Safronov V., Arkhipov N., Bakhtin V. et al.** — J. Nucl. Mater., 2001, vol. 290—293, p. 1052.
5. **Federici G., Zhitlukhin A., Arkhipov N. et al.** — Ibid, 2005, vol. 337—339, p. 684.

6. **Zhitlukhin A., Klimov N., Landman I. et al.** — *J. Nucl. Mater.*, 2007, vol. 363—365, p. 301.
7. **Arkhipov N.I., Safronov V.M., Barsuk V.A. et al.** — *VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion)*, 2009, issue 4, pp. 3—13 (in Russian).
8. **Federici G., Skinner C.H., Brooks J.N. et al.** A Joint Report with the Princeton Plasma Physics Laboratory (Princeton, NJ USA) and the Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, Germany, 2001.
9. **Klimov N.S., Podkovyrov V.L., Zhitlukhin A.M. et al.** — *VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion)*, 2009, issue 2, pp. 52—61 (in Russian).
10. **Drozdov A.A., Litunovsky V.N., Ljublin B.V. et al.** — *Plasma Devices and Operations*, 1992, vol. 2, p. 111.
11. **Arkhipov N.I., Bakhtin V.P., Safronov V.M. et al.** — *J. of Nuclear Materials*, 1995, vol. 220—222, p. 1066.
12. **Belan V.G., Levashov V.F., Maynashev V.S. et al.** — *Ibid.*, 1996, vol. 233—237, p. 763.
13. **Chebotaev V.V., Garkusha I.E., Garkusha V.V. et al.** — *Ibid.*, p. 736.
14. **Linke J., Akiba M., Bolt H. et al.** — *Ibid.*, 1994, vol. 212—215, p. 767.
15. **Astrelin V.T., Burdakov A.V., Chebotaev P.Z.** — *Nuclear Fusion*, 1997, vol. 37, № 11, p. 1541.
16. **Nakamura K., Suzuki S., Tanabe T. et al.** — *Fusion Engineering and Design*, 1998, vol. 39—40, p. 295.
17. **Engelko V., Andreev A.D., Burtseva T. et al.** — *J. of Nuclear Materials*, 1996, vol. 233—237, p. 818.
18. **Arkhipov N., Bakhtin V., Kurkin S. et al.** — *Ibid.*, p. 767.
19. **Arkhipov N.I., Bakhtin V.P., Vasenin S.G. et al.** — *Fizika plazmy (Plasma Physics)*, 2001, vol. 27, № 3, p. 243 (in Russian).

#### AUTHORS

**Poznyak I.M.** State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; teufida@gmail.com

**Klimov N.S.** State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; klimov@triniti.ru

**Podkovyrov V.L.** State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for innovation & fusion research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; podk@triniti.ru

**Safronov V.M.** State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; vsafr@triniti.ru

**Zhitlukhin A.M.** State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; zhitlukh@triniti.ru

**Kovalenko D.V.** State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research, ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; kovalenko@triniti.ru

Received 6 August 2012  
Problems of Atomic Science and Technology  
Ser. Thermonuclear Fusion, 2012, issue 4, pp. 23—33.