

## МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ВОЛЬФРАМА В РЕЗУЛЬТАТЕ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ\*

*А. В. Воронин<sup>1</sup>, Б. Н. Семенов<sup>2</sup>, Ю. В. Судьенков<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН,  
Российская Федерация, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет,  
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9

Представлены результаты исследований разрушения в окрестности поверхности вольфрамовой преграды в результате воздействия на нее импульсной плазменной струи. Результаты проведенных экспериментальных исследований показывают, что деградация вольфрамовых преград при воздействии плазменной струи с плотностью потока энергии  $0,25 \div 1$  МДж/м<sup>2</sup> сопровождается не только испарением и оплавлением поверхности, но разрушением приповерхностных слоев на масштабах порядка 150–250 мкм. При этом процесс деградации вольфрама при воздействии плазменной струи происходит практически непрерывно с момента воздействия (испарение, плавление) до времени, более чем на три порядка превышающего длительность воздействия, и это обусловлено термомеханическими процессами, протекающими в мишени. Для анализа термомеханических процессов, протекающих в твердотельных образцах в результате воздействия высокоскоростной плазменной струи, предложена конечно-элементная модель и приведены результаты численного моделирования термомеханических процессов в вольфрамовой преграде при импульсном воздействии плазменной струи. Исследована зависимость изменения напряженно-деформированного состояния в преграде от времени, а также влияние формы теплового импульса на распределение и уровень остаточных напряжений. Библиогр. 8 назв. Ил. 3.

*Ключевые слова:* Токамак, вольфрам, рельсотрон, плазменная струя, термомеханические процессы, температура, пластические деформации, разрушение.

**1. Введение.** В настоящее время исследования процессов взаимодействия плазмы с защитными материалами активизировались в связи со строительством демонстрационной термоядерной установки на основе токамака ИТЭР. Эксперименты и расчеты показывают, что динамические тепловые нагрузки на первую стенку токамака-реактора при проявлении периферийных неустойчивостей могут составить  $3\text{--}30$  ГВт/м<sup>2</sup> в течение  $0.1\text{--}1$  мс [1, 2]. В качестве одного из перспективных материалов стенки рассматривается вольфрам.

**2. Методика эксперимента.** В экспериментах коаксиальный рельсотрон генерировал струю водородной плазмы плотностью  $3 \cdot 10^{22}$  м<sup>-3</sup>, скоростью  $100\text{--}200$  км/с в течение  $10\text{--}15$  мкс. Плотность потока энергии могла достигать  $100$  ГВт/м<sup>2</sup>.

Давление потока плазмы на образец регистрировалось либо пьезодачиками, либо лазерным интерферометром [3]. Плотность и скорость плазменной струи измерялись интерферометром и стрик-камерой соответственно. Образцы представляли собой пластины ( $23 \times 34$  мм) из порошкового VMP-вольфрама, а также диски ( $20 \times 3$  мм) монокристаллического W [111]. Проводился металлографический анализ микроструктуры образцов до и после воздействия плазмы.

**3. Результаты и обсуждение.** Результаты воздействия высокоскоростной плазменной струи на твердотельную преграду определяются в основном двумя причи-

---

\*Работа выполнена при финансовой поддержке СПбГУ (проект 6.37.671.2013).

нами — передаваемым в преграду механическим импульсом струи и тепловой нагрузкой, параметры которой обусловлены сложным процессом теплообмена плазменной струи, экранирующего слоя, возникающей пристеночной плазмы и преграды [2, 4].

Деградация исходных образцов вследствие такого воздействия определяется тремя основными физико-механическими процессами: 1 — испарением и оплавлением поверхности; 2 — разрушением приповерхностного слоя на масштабах порядка 150–250 мкм; 3 — пластическим течением и динамической рекристаллизацией в объеме образцов.

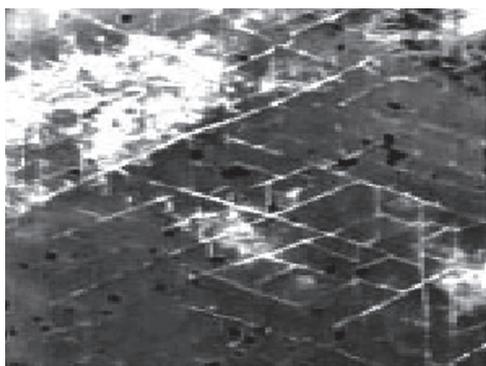
На рис. 1 представлены характерные картины процессов разрушения поверхностного слоя преград из вольфрама. На поверхности облученных образцов монокристалла W помимо следов плавления наблюдается квазипериодическая структура в виде ромбов с углом при вершине  $60^\circ$  (рис. 1, *a*) и в виде прямоугольников в порошковом W (рис. 1, *c*). Возникновение таких структур, определяется интенсивным пластическим течением, сопровождаемым выходом дислокаций на поверхность по активным плоскостям скольжения [7]. Характерный размер структур уменьшается с ростом энергии и количества импульсов облучений как в монокристаллическом, так и порошковом вольфраме.

Картина разрушения приповерхностного слоя образцов монокристаллического и порошкового вольфрама значительно различается (рис. 1, *b, d*). В образце монокристаллического вольфрама наблюдаются трещины (рис. 1, *a, b*) под углами пересечения кристаллографических плоскостей. Для образцов порошкового вольфрама (рис. 1, *c, d*) характерная картина разрушения представляет собой одиночные или множественные отслоения (рис. 1, *c, d*) и дробление материала в этих слоях. Характерный масштаб разрушений определяется дозой и количеством облучений.

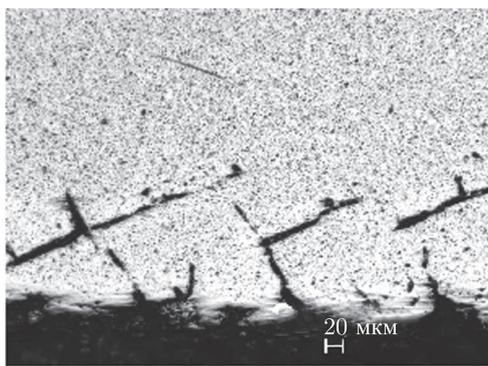
Измеренная величина импульса напряжения, возбуждаемого ударом плазменной струи с интенсивностью  $0,78 \text{ МДж/м}^2$ , равнялась  $\sigma \cong 4,25 \text{ МПа}$ , что на порядок меньше пределов упругости и тем более прочности вольфрама, не может приводить к наблюдаемой картине разрушения [6–8].

Для анализа термомеханических процессов была построена конечно-элементная модель. Воздействие на поверхность вольфрамового диска ( $20 \times 3 \text{ мм}$ ) задавалось в виде колоколообразного импульса теплового потока, параметры которого подбирались из решения тепловой задачи с учетом результатов экспериментов. Длительность нарастания теплового потока определяется длительностью плазменной струи, порядка 15 мкс, а длительность спада, обусловленная сложными механизмами теплообмена, варьировалась. При выборе длительности импульса принимались во внимание следующие обстоятельства: 1 — температура на поверхности, как минимум, достигает температуры плавления вольфрама; 2 — температура тыльной поверхности вольфрамового диска задавалась исходя из результатов тепловизионных измерений; 3 — длительность нарастания теплового процесса определяется длительностью плазменной струи, порядка 15 мкс; 4 — длительность спада теплового потока, обусловленная, вышеотмеченными, сложными механизмами теплообмена, оценивалась из результатов фоторегистрации послесвечения у поверхности мишеней в видимом и ИК диапазоне спектра, представленных в работе [3].

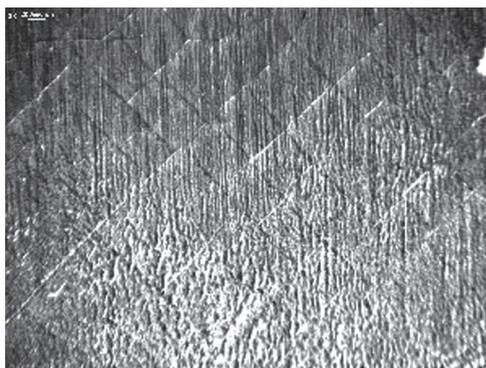
На рис. 2, *a*, приведена форма импульса теплового потока, рассчитанная с учетом вышеперечисленных условий, при этом на всех поверхностях диска учитывались условия теплообмена с внешней средой, температура которой  $20^\circ \text{ С}$ . Предполагалось также, что поверхность диска свободна, то есть импульс давления плазменной струи на поверхность не учитывался.



*a*



*b*

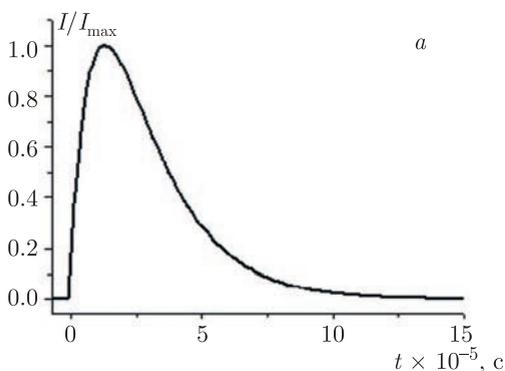


*c*

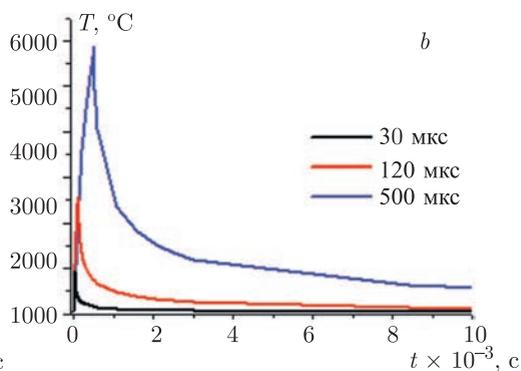


*d*

Рис. 1. Дegradация поверхности монокристаллического (а), и порошкового вольфрама (с); разрушение приповерхностного слоя монокристаллического вольфрама (b); порошкового вольфрама (d).



*a*



*b*

Рис. 2. Форма импульса теплового потока (а); зависимости температуры от времени на глубине  $h = 20$  мкм от облучаемой поверхности образца для трех длительностей теплового потока  $\tau$  (b).

В силу осевой симметрии геометрии и начально-краевых условий трехмерная задача была сведена к двумерной для прямоугольника  $10 \times 3$  мм с использованием для ее решения плоских элементов с опцией осесимметрии. Для учета связности тепловых

и деформационных полей был выбран 8-узловой элемент PLANE223, обеспечивающий учет всех особенностей задачи. Так как температура облучаемой поверхности диска достигает весьма больших значений, учитывалась зависимость предела текучести от температуры.

Таким образом, характер термомеханических процессов при воздействии теплового импульса на поверхность вольфрамового диска может быть описан численным решением нестационарной задачи связной термопластичности в рассматриваемой области.

Для обеспечения необходимой точности область была разбита на 18 000 прямоугольных элементов, сгущающихся к поверхности, нагреваемой плазмой, где изменения температуры максимальны.

Из результатов расчетов температуры и характера зависимости механических свойств вольфрама от температуры следует, что вблизи нагреваемой поверхности температура достигает значений, при которых предел текучести вольфрама мал. Поэтому сопротивление непрогретого материала процессу расширения нагретого тонкого поверхностного слоя приводит к возникновению больших сжимающих напряжений, порождающих пластические деформации сжатия, которые достигают максимальных значений к концу действия теплового импульса.

На рис. 2, *b* представлено изменение температуры во времени на глубине 20 мкм от облучаемой поверхности для трех длительностей теплового потока:  $\tau = 30, 120, 500$  мкс.

На рис. 3 приведены изменение полей напряжения (радиальных — *a* и Мизеса — *b*) на глубине 20 мкм от облучаемой поверхности образца для трех длительностей теплового потока ( $\tau = 30, 120, 500$  мкс).

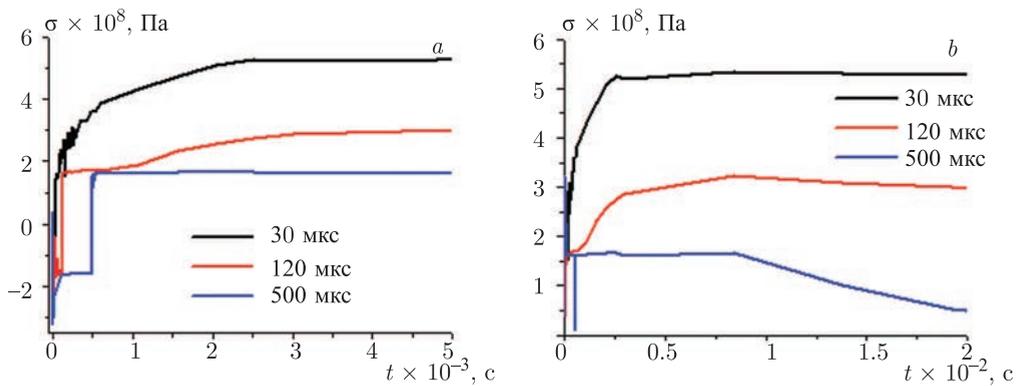


Рис. 3. Изменение во времени радиальных напряжений (*a*) и напряжений Мизеса (*b*) на глубине  $h = 20$  мкм от облучаемой поверхности образца для трех длительностей теплового потока  $\tau$ .

По окончании воздействия теплового потока охлаждение приповерхностной области в результате оттока тепла за счет теплопроводности и конвективного теплообмена с внешней средой приводит к упругой разгрузке этой области, порождающей большие напряжения растяжения.

В результате дальнейшего охлаждения приповерхностной области величина пластических деформаций уменьшается, но в ней значительно возрастают напряжения растяжения. При этом за счет интенсивного размножения и движения дислокаций и

связанных с этим процессов развития дефектов упаковки и образования пор прочность приповерхностного слоя значительно снижается. Поэтому достигаемый уровень напряжений растяжения достаточен для его разрушения.

Максимальные значения напряжения растяжения у поверхности достигаются на временах порядка  $1 \div 30$  мс (рис. 3, *b*), то есть процесс разрушения поверхностного слоя начинается с времен нескольких сотен микросекунд и протекает в течение большого промежутка времени до единиц и десятков миллисекунд с момента плазменного воздействия.

В процессе работы Токамака возможно многократное воздействие плазмы на стенки дивертора. В этой связи был проведен конечноэлементный анализ повторного теплового нагружения на вольфрамовую преграду с периодом, равным одной секунде, при тех же параметрах воздействия. Из результатов численного моделирования следует, что последующие тепловые нагрузки не приводят к существенному увеличению остаточных напряжений в преграде. Однако при каждом последующем воздействии в приповерхностном слое наблюдаются значительные пластические деформации, что должно приводить к накоплению поврежденности в нем.

Таким образом, процесс деградации вольфрама при воздействии плазменной струи происходит практически непрерывно с момента воздействия (испарение, плавление) до времен более, чем на три порядка превышающих длительность воздействия, что обусловлено термомеханическими процессами, протекающими в мишени. Последние приводят к дефектообразованию у поверхности облучения, выходу дефектов на поверхность и, в дальнейшем, к разрушению и фрагментации приповерхностного слоя под действием нестационарного поля термонапряжений. Термомеханические процессы также определяют и перестройку структуры материала в объеме образцов.

Огромный интервал времени по сравнению со временем воздействия, на котором развиваются эти процессы, в значительной мере обусловлен инерционностью тепловых процессов.

## Литература

1. *Matthews G. F. et al.* Current status of the JET ITER-like Wall Project // Phys. Scr. T138. 2009. 014030.
2. *Matthews G. F. et al.* Development of divertor tungsten coatings for the JET ITER-like wall // Journal of Nuclear Materials. Vol. 390–391. 2009. P. 934–937.
3. *Воронин А. В., Гусев В. К., Герасименко Я. А., Судьенков Ю. В.* Измерение параметров плазменной струи в процессе облучения материалов // ЖТФ. 2013. Вып. 6. С. 36–42.
4. *Архипов Н. И., Васенин С. Г., Бахтин В. П., Житлухин А. М., Куржин С. М., Сафронов В. М., Топорков Д. А.* Формирование экранирующего слоя при облучении твердотельных материалов мощными плазменными потоками // Физика плазмы. 1999. Т. 25, № 3. С. 263–273.
5. *Новиков И. И.* Дефекты кристаллического строения металлов. М.: Металлургия, 1983. 232 с.
6. *Савицкий Е. М., Поварова К. Б., Макаров П. В.* Металловедение вольфрама. М.: Металлургия, 1978. 223 с.
7. *Иванов А. И.* Поведение металлов при повышенных нестационарных температурах и нагрузках. Куйбышевский авиац. ин-т, 1982. С. 82.
8. *Лозинский М. Г.* Строение и свойство металлов и сплавов при высоких температурах. М.: Металлургия, 1963. С. 452.

Статья поступила в редакцию 23 октября 2014 г.

## Сведения об авторах

Воронин Александр Васильевич — кандидат физико-математических наук, ст. науч. сотр.; voronin.mhd@mail.ioffe.ru

Семенов Борис Николаевич — кандидат физико-математических наук, доцент; bsemenov@rambler.ru

Суденков Юрий Васильевич — кандидат физико-математических наук, ст. науч. сотр.; sudenkov@land.ru

## FRACTURE MECHANISM OF TUNGSTEN AS A RESULT OF HEAT LOADING WHEN BY PLASMA JET IMPACT

Aleksandr V. Voronin<sup>1</sup>, Boris N. Semenov<sup>2</sup>, Yuriy V. Sudenkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ioffe Institute, Politekhnicheskaya ul., 26, St. Petersburg, 194021, Russian Federation; voronin.mhd@mail.ioffe.ru

<sup>2</sup> St. Petersburg State University, Universitetskaya nab., 7-9, St. Petersburg, 199034, Russian Federation; bsemenov@rambler.ru, sudenkov@land.ru

There are presented the results of investigations of the destruction in the vicinity of the surface of tungsten barriers as a result of pulsed plasma jet exposure to it. The results of experimental studies show that the degradation of tungsten barrier when exposed to the plasma jet energy flux density  $0,25 \div 1 \text{ MJ/m}^2$  accompanied not only by evaporation and surface melting, but the destruction of the surface layers on the scale of the order  $150 - 250 \mu\text{m}$ . In this case the process of degradation of tungsten at exposure of plasma jet occurs almost continuously from the moment of impact (evaporation, melting) until the time by more than three orders of magnitude greater than the duration of exposure, and this is due to thermo-mechanical processes in the target. For the analysis of thermo-mechanical processes occurring in solid samples as result of fast plasma jet exposure is proposed a finite element model and the results of numerical modeling of thermo-mechanical processes in the tungsten barrier during pulsed plasma jet exposure are given. The dependence of stress-strain state in the barrier on time and influence of the shape of the heat pulse on the distribution and level of residual stresses are investigated. An estimate of the depth of degradation of the surface layer is obtained. Results of the finite element analysis are compared with experimental results. Refs 8. Figs 3.

*Keywords:* Tokamak, tungsten, railgun, plasma jet, thermomechanical processes, temperature, plastic deformation, destruction.

## References

1. Matthews G. F., et al., "Current status of the JET ITER-like Wall Project", *Phys. Scr.* T138, 014030 (2009).
2. Matthews G. F., et al., "Development of divertor tungsten coatings for the JET ITER-like wall", *J. Nucl. Mater.* **390–391**, 934–937 (2009).
3. Voronin A. V., Gusev V. K., Gerasimenko Ya. A., Sud'enkov Yu. V., "Measurement of the plasma jet parameters during material irradiation", *Tech. Phys.* **58**, 1122 (2013).
4. Arkhipov N. I., Vasenin S. G., Bakhtin V. P., Zhitlukhin A. M., Kurkin S. M., Safronov V. M., Toporkov D. A., "Formation of a shielding layer near a solid target under the action of a high-power plasma flow", *Plasma Phys. Rep.* **25**, 236 (1999).
5. Novikov I. I., *Defects of Crystal Structure of Metals* (Metallurgiya, Moscow, 1983) [in Russian].
6. Savitskii E. M., Povarova K. B., Makarov P. V., *Tungsten Science of Metals* (Metallurgiya, Moscow, 1978) [in Russian].
7. Ivanov A. I., *Behavior of Metals on Higher Unsteady Temperature and Strength* (Kuibyshev. Aviat. Inst., Kuibyshev, 1982) [in Russian].
8. Lozinskii M. G., *Structure and Properties of Metals and Alloys at High Temperatures* (Metallurgiya, Moscow, 1963) [in Russian].