

РАСЧЁТ ТЕПЛООТВОДА РЯДОМ С ТРЕЩИНАМИ, ОБРАЗОВАВШИМИСЯ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКЕ

Г. Г. Лазарева^{1,3,4}, А. С. Аракчеев^{2,4}, А. А. Васильев², Л. Н. Вячеславов², А. А. Касатов²,
И. В. Кандауров², В. В. Куркуचेков², В. А. Попов³, Ю. А. Трунев², А. А. Шошин²

¹ *Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск*

² *Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, 630090, Новосибирск*

³ *Новосибирский государственный университет, 630073, Новосибирск*

⁴ *Новосибирский государственный технический университет, 630090, Новосибирск*

УДК 51-72

Проводилось экспериментальное и теоретическое моделирование условий, вызывающих интенсивную эрозию и образующихся при энерговыделениях и длительностях воздействия на поверхность вольфрама, характерных для импульсных процессов в установке ИТЭР. При помощи мощного электронного пучка моделируется соответствующая импульсная тепловая нагрузка в режимах с механическим разрушением, плавлением и разбрызгиванием материала. Лабораторные эксперименты сопровождаются вычислительными. Вычислительный эксперимент позволил количественно описать перегрев рядом с трещинами на поверхности, вызванный параллельными поверхности трещинами.

Ключевые слова: математическое моделирование, теплоперенос, трещины, импульсные тепловые нагрузки

Введение

Компоненты первой стенки и диверторной зоны прототипа токамака-реактора ITER будут подвергаться серьезной тепловой нагрузке во время разряда [1]. Этот поток тепла будет состоять из стационарной компоненты в результате истечения плазмы вдоль сепаратрисы магнитного поля (до 20 МВт/м²), а также из быстрой импульсной нагрузки в виде ЭЛМов 1 типа, срывов и др., которые могут иметь энерговыделение до 80 МДж/м² за ~ 1 мс. Действующие плазменные ловушки с магнитным удержанием не могут воспроизвести подобные условия, поэтому для их моделирования используются специализированные стенды: квазистационарные плазменные ускорители [2, 3], электронные пучки [4, 5] и лазеры [6]. Полученные экспериментальные данные по эрозии материалов ложатся в основу расчетных моделей рабочих режимов токамака.

Для адекватной работы пластин дивертора они должны отводить тепло с поверхности вглубь материала к охлаждающим трубкам. Основной опасностью, которая может помешать этому процессу, является потеря теплопроводности в результате распространения трещин параллельно облучаемой поверхности (см. рис. 1 а). Подобное явление было обнаружено post-mortem анализом в ряде экспериментальных работ [7, 8], хотя численное моделирование возможного перегрева поверхности из-за этих трещин не было проведено. На созданном в ИЯФ СО РАН экспериментальном стенде ВЕТА были получены in-situ результаты нагрева вольфрамовой мишени мощным субмиллисекундным пучком электронов. Эти данные свидетельствуют о корреляции перегрева поверхности образца и наличия подповерхностных трещин в материале [9].

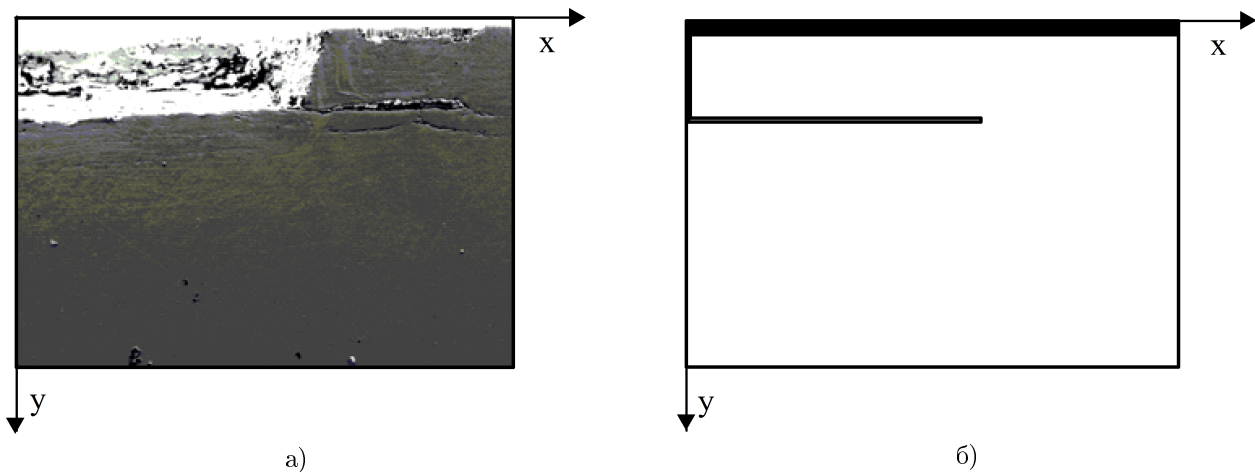


Рис. 1: Снимок поперечного среза вольфрамового образца, сделанный при помощи электронного микроскопа [9] (а), схема расчетной области (б).

1 Постановка задачи

Из-за теплового расширения при импульсном нагреве в поверхностном слое вольфрама образуются трещины. Экспериментально обнаружено, что образуются не только перпендикулярные поверхности трещины, но и параллельные поверхности. Последние могут существенно ухудшать теплоотвод от поверхности облучённого материала. Задачей данной работы является расчёт теплоотвода при импульсных тепловых нагрузках вблизи параллельной поверхности материала трещины. В том числе, попытка воспроизвести измеренные распределения температуры по поверхности и предсказание характерных зависимостей ослабления теплоотвода в зависимости от геометрии трещин.

В качестве области моделирования рассматривается прямоугольная область среза образца с подповерхностной трещиной (см. рис. 1 а). На фотографии видно образование трещины параллельной поверхности на глубине ~ 250 мкм. Левая часть поверхности образца имела слабый механический контакт с объемом и была потеряна в ходе предварительной резки. На границе $y = 0$ задается поток тепла, трещина расположена перпендикулярно нагреваемой поверхности на части границы $x = 0$ расчетной области и переходит в подповерхностную трещину (см. рис. 1 б). В заданной области решается уравнение для температуры (1) методом [10].

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div} \lambda(T) \operatorname{grad} T + Q, \quad (1)$$

где T — температура, $c(T)$ — удельная теплоёмкость, $\rho(T)$ — плотность, $\lambda(T)$ — теплопроводность, Q — источник тепла.

Начальные условия и условия на границе γ имеют вид:

$$T(0, x, y) = T_0, \quad (n, \nabla T)|_{\gamma} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = \frac{W(t)}{\lambda(T)},$$

где $W(t)$ — мощность потока тепла (экспериментальные данные приведены на рис. 2 а), длительностью 100–200 мкс. На подповерхностной трещине задано условие $(n, \nabla T)|_{crack} = 0$. Для обезразмеривания использованы характерные величины:

$$\lambda = 10^{-2} \frac{\text{watt}}{\text{mm} \cdot \text{K}}, \quad \rho = 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3}, \quad c = 10^7 \frac{\text{watt} \cdot \mu\text{s}}{\text{kg} \cdot \text{K}},$$

$$t = 1 \mu\text{s}, \quad x = 10^{-2} \text{mm}, \quad T = 10^3 \text{K}, \quad W = 10^3 \frac{\text{watt}}{\text{mm}^2}.$$

Характерное время счета 1000 мкс.

Измерение теплофизических характеристик тугоплавких металлов — достаточно сложная задача. Поэтому во многих справочниках и статьях приведена ориентировочная или теоретически предсказанная зависимость с оценкой точности в 10% и менее. Теплопроводность и теплоёмкость твёрдого вольфрама взяты

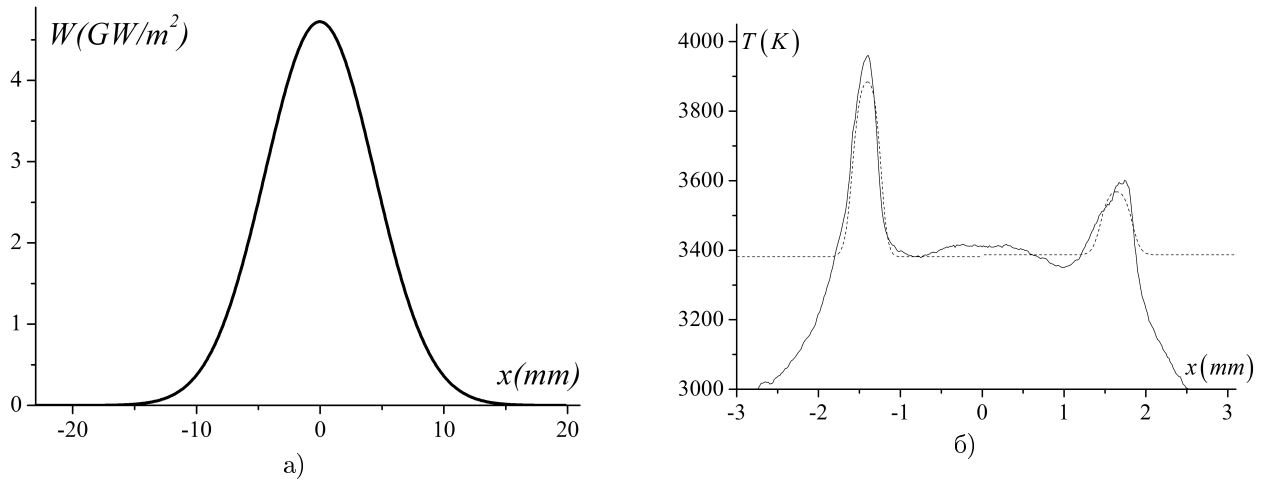


Рис. 2: Распределение по поверхности мощности потока тепла (а) и температуры (б): экспериментальные данные (сплошная линия) и результаты расчетов (пунктир).

из работы [11]. Теплопроводность жидкого вольфрама оценена из работ [12–14]. В диапазоне температур $300^\circ K \leq T^* \leq 6000^\circ K$ плотность, удельная теплоёмкость и теплопроводность задаются в виде зависимостей (2)–(4) от температуры вещества.

Плотность (см. рис. 3 а):

$$\rho(T) = \begin{cases} \left[\begin{array}{l} 19.25 - 2.66207 \cdot 10^{-4} \cdot (T - 273.15) \\ -3.0595 \cdot 10^{-9} \cdot (T - 273.15)^2 \\ -9.5185 \cdot 10^{-12} \cdot (T - 273.15)^3 \end{array} \right] \cdot 10^{-6} kg/mm^3, & 300^\circ K \leq T \leq 3695^\circ K, \\ \left[\begin{array}{l} 16.267 - 7.679 \cdot 10^{-4} \cdot (T - 3695) \\ -8.091 \cdot 10^{-8} \cdot (T - 3695)^2 \end{array} \right] \cdot 10^{-6} kg/mm^3, & 3695^\circ K \leq T \leq 6000^\circ K. \end{cases} \quad (2)$$

Теплопроводность (см. рис. 3 б):

$$\rho(T) = \begin{cases} \left[\begin{array}{l} 149.441 - 45.466 \cdot 10^{-3} T + 13.193 \cdot 10^{-6} T^2 \\ -1.484 \cdot 10^{-9} T^3 + 3.866 \cdot 10^6 T^{-2} \end{array} \right] \cdot 10^{-3} watt/(mm \cdot K), & 300^\circ K \leq T \leq 3695^\circ K, \\ \left[\begin{array}{l} 66.6212 + 0.02086(T - 3695) \\ -3.7585 \cdot 10^{-6}(T - 3695)^2 \end{array} \right] \cdot 10^{-3} watt/(mm \cdot K), & 3695^\circ K \leq T \leq 6000^\circ K. \end{cases} \quad (3)$$

Удельная теплоёмкость (см. рис. 3 в):

$$c(T) = \begin{cases} \left[\begin{array}{l} 21.868372 + 8.068661 \cdot 10^{-3} \cdot T \\ -3.756196 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \\ +1.075862 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 \\ +1.406637 \cdot 10^4 \cdot T^{-2} \end{array} \right] \cdot 10^{-6} / 0.186 watt \cdot \mu s / (kg \cdot K), & 300^\circ K \leq T \leq 3080^\circ K, \\ [2.022 + 1.315 \cdot 10^{-2} \cdot T] \cdot 10^{-6} / 0.186 watt \cdot \mu s / (kg \cdot K), & 3080^\circ K \leq T \leq 3695^\circ K, \\ [51.3] \cdot 10^{-6} / 0.186 watt \cdot \mu s / (kg \cdot K), & 3695^\circ K \leq T \leq 6000^\circ K. \end{cases} \quad (4)$$

2 Результаты моделирования

Результатам вычислительных экспериментов сопоставлены данные измерений (см. рис. 2 б). Параметры расчета: длительность воздействия пучка 186 мкс, момент измерения 200 мкс от начала пучка, длительность

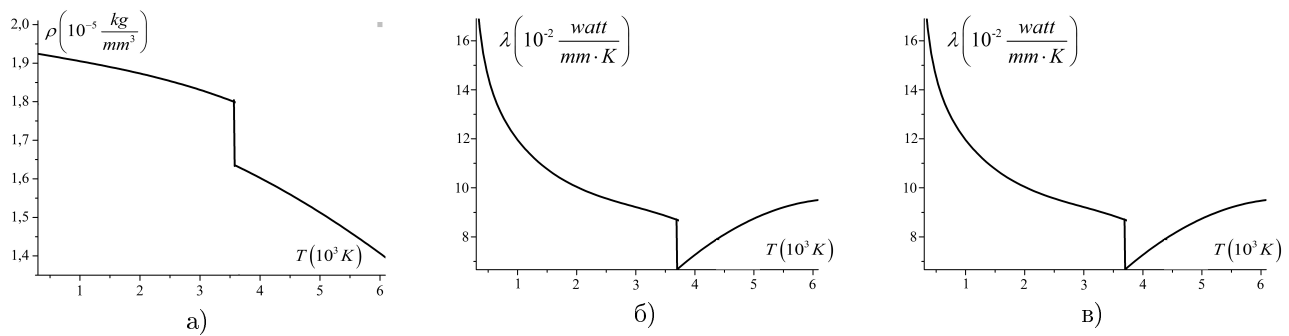


Рис. 3: Графики зависимости от температуры плотности (а), теплопроводности (б) и удельной теплоёмкости (в).

экспозиции — 10 мкс, глубина левой трещины около 0.12 мм, длина трещины около 0.2 мм, глубина правой трещины 0.15 мм, длина трещины около 0.145 мм. Мощность нагрева считалась равномерной и равной $W = 3 \cdot 10^3 \frac{\text{watt}}{\text{mm}^2}$. Расчеты подтвердили гипотезу, что неоднородности температуры поверхности вольфрама связаны с наличием подповерхностных трещин.

Расширение модели предполагает включения термодинамически согласованных уравнений сохранения для твердой, жидкой и газовой фаз вещества [15–20] в осесимметричной постановке с целью изучения процессов, возникающих в ходе плавления и испарения вещества.

Выводы

Проводилось экспериментальное и теоретическое моделирование условий, вызывающих интенсивную эрозию и образующихся при энерговыкладах и длительностях воздействия на поверхность вольфрама, характерных для импульсных процессов в установке ИТЭР. При помощи мощного электронного пучка моделируется соответствующая импульсная тепловая нагрузка в режимах с механическим разрушением, плавлением и разбрызгиванием материала. Лабораторные эксперименты сопровождаются вычислительными. Вычислительный эксперимент позволил количественно описать перегрев рядом с трещинами на поверхности, вызванный параллельными поверхности трещинами.

Список литературы

- [1] Pitts R A et al, 2013 A full tungsten divertor for ITER: Physics issues and design status, J. Nucl. Mater. 438 S48
- [2] Klimov N et al 2009 Experimental study of PFCs erosion under ITER-like transient loads at plasma gun facility QSPA J. Nucl. Mater. 390–391 721
- [3] Tereshin V I et al 2007 Application of powerful quasi-steady-state plasma accelerators for simulation of ITER transient heat loads on divertor surfaces Plasma Phys. Control. Fusion 49 A231
- [4] M. Wirtz, et al., Thermal shock response of deformed and recrystallised tungsten, Fus. Eng. Design V88 (2013) 1768–1772
- [5] Trunев Yu A et al 2016 Heating of Tungsten Target by Intense Pulse Electron Beam AIP Conf. Proc. 1771 060016
- [6] A. Huber, et al., Investigation of the impact of transient heat loads applied by laser irradiation on ITER-grade tungsten, Phys. Scripta T159 (2014) 014005
- [7] Pintsuk G., Loewenhoff Th., Impact of microstructure on the plasma performance of industrial and high-end tungsten grades, Journal of Nuclear Materials (2013), Volume 438, P. S945–S948
- [8] Wirtz M., Cempura G., Linke J., Pintsuk G., Uytdenhouten I., Thermal shock response of deformed and recrystallised tungsten, Fusion Engineering and Design (2013), Volume 88, Issue 9, P. 1768–1772.

- [9] Vasilyev A.A. et al In-situ imaging of tungsten surface modification under ITER-like transient heat loads, Nucl. Matter Energy (in press, available online 5 December 2016) <https://doi.org/10.1016/j.nme.2016.11.017>.
- [10] Konovalov A. N. , Popov Yu. P. , Explicitly solvable optimal discrete models with controlled disbalance of the total mechanical energy for dynamical problems of linear elasticity, Siberian Math. J., 56:5 (2015), P. 872–878.
- [11] J.W. Davis, P.D. Smith, ITER material properties handbook, Journal of Nuclear Materials, V. 233, 1996, P. 1593–1596, ISSN 0022-3115, [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-3115\(96\)00202-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-3115(96)00202-4).
- [12] Ho C.Y. et al. Thermal conductivity of elements, 1972.
- [13] G. Pottlacher, Thermal conductivity of pulse-heated liquid metals at melting and in the liquid phase, Journal of Non-Crystalline Solids, V. 250, 1999, P. 177–181, ISSN 0022-3093, [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-3093\(99\)00116-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-3093(99)00116-7).
- [14] Талуц С. Г. Экспериментальное исследование теплофизических свойств переходных металлов и сплавов на основе железа при высоких температурах, Екатеринбург, 2001.
- [15] Годунов С.К. Механические эффекты на электроде при кумуляции плазмы на оси / С.К. Годунов, Н.В. Филиппов, Т.И. Филиппова // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 1967. — Т.52, вып.5. — С. 1138–1145.
- [16] Алалыкин Г.Б., Годунов С.К., Киреева И.Л., Плинер Л.А. Решение одномерных задач газовой динамики в подвижных сетках. — М.: Наука, 1970. — 112 с.
- [17] Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. Москва, Наука, 1966.
- [18] Годунов С. К., Куликов И. М. Расчет разрывных решений уравнений гидродинамики с гарантией неубывания энтропии // Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 54:6 (2014), 1008–1021.
- [19] Годунов С. К., Киселев С. П., Куликов И. М., Мали В. И. Численное и экспериментальное моделирование образования волн при сварке взрывом // Тр. МИАН, 281 (2013), 16–31.
- [20] Годунов С. К., Киселев С. П., Куликов И. М., Мали В. И. Моделирование ударно-волновых процессов в упругопластических материалах на различных (атомный, мезо и термодинамический) структурных уровнях. — Ижевск : Ижевский институт компьютерных исследований, 2014. — 289 с.

*Галина Геннадьевна Лазарева — чл.-корр. д.ф.-м.н., ст. науч.сотр. Института
вычислительной математики и математической геофизики СО РАН;
e-mail: lazareva@ssd.ssc.ru;*

*Алексей Сергеевич Аракчеев — к.ф.-м.н., ст. науч.сотр. Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН;
e-mail: asarakcheev@gmail.com;*

*Александр Александрович Васильев — ст. лаб., аспирант Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН;
e-mail: alex.alex.vasilyev@gmail.com;*

*Леонид Николаевич Вячеславов — д.ф.-м.н., гл. науч.сотр. Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН;
e-mail: vyachesl@inp.nsk.su;*

*Александр Александрович Касатов — мл. науч.сотр. Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН;
e-mail: a.a.kasatov@gmail.com;*

*Владимир Андреевич Попов — студент Новосибирского Государственного Университета
e-mail: v.a.porov94@gmail.com;*

*Кандауров Игорь Васильевич — науч.сотр. Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН;
e-mail: i.v.kandaurov@inp.nsk.su;*

*Виктор Викторович Куркучев — мл. науч.сотр. Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН;
e-mail: kurkuchekov.victor@gmail.com;*

*Юрий Александрович Трунев — науч.сотр. Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН;
e-mail: y.a.trunev@gmail.com;*

*Андрей Алексеевич Шошин — к.ф.-м.н., ст. науч.сотр. Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН;
e-mail: a.a.shoshin@inp.nsk.su.*

Дата поступления — 31 мая 2017 г.