

УДК 539.87

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН И ТЕКСТУРЫ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ВОЛЬФРАМЕ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ

© 2023 г. И. И. Балаш^{1, 2, 3, *}, С. Р. Казанцев^{1, 2, 4}, А. Н. Шмаков^{1, 3, 4},
П. А. Пиминов^{1, 4}, В. М. Борин¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук”,
Новосибирск, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук”,
Новосибирск, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук”, Томск, Россия

⁴Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Федеральный исследовательский центр “Институт катализа имени Г.К. Борескова
Сибирского отделения Российской академии наук”, Центр коллективного пользования
“Сибирский кольцевой источник фотонов”, Кольцово, Россия

*E-mail: ilyabalash@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.11.2022 г.

После доработки 15.12.2022 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

Исследованы вольфрамовые образцы, облученные электронным пучком на установке ВЕТА с целью моделирования плазменного взаимодействия в вакуумной камере термоядерного реактора. Методы рентгеновской дифракции использовались для измерения остаточных напряжений на вольфрамовых образцах, в том числе изготовленных по спецификациям ИТЭР.

DOI: 10.31857/S0367676522701113, EDN: KVLVQE

ВВЕДЕНИЕ

В термоядерном реакторе плазма оказывает влияние на стенки дивертора в виде периодических тепловых импульсов и постоянной тепловой нагрузки [1]. Тепловые импульсы являются причиной возникновения остаточных деформаций и напряжений в материале дивертора, которые приводят к его разрушению. В то же время остаточные деформации и напряжения могут релаксировать под воздействием высокой температуры постоянного потока плазмы на дивертор [2]. Для понимания этих процессов и поиска путей минимизации деструктивных воздействий на материал дивертора необходимо изучить влияние поверхностных трещин и ярко выраженной текстуры материала на остаточные напряжения. Это позволяет сделать методика измерения остаточных напряжений по смещению дифракционных максимумов в зависимости от угла падения излучения на поверхность образца.

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Метод рентгеновской дифрактометрии основан на явлении дифракции рентгеновских лучей

на кристаллической решетке. Это явление может быть описано в первом приближении как способность рентгеновского излучения отражаться от кристаллографических плоскостей, образованных атомами в кристаллической решетке материала. Дифракция отраженных рентгеновских лучей происходит с явно выраженными максимумами интенсивности — дифракционными пиками [3]. Положение каждого из дифракционных пиков связано с определенным межплоскостным расстоянием и определяется законом Брэгга–Вульфа:

$$n\lambda = 2d \sin \theta, \quad (1)$$

где n — порядок дифракции, λ — длина волны излучения, d — межплоскостное расстояние, θ — угол между падающим лучом и кристаллографической плоскостью (рис. 1). Если при упругой деформации межплоскостное расстояние изменяется с d_0 на $d_0 + \delta d$, можно выразить изменение расстояния между плоскостями с нормалью n_i после деформации в виде

$$\delta d = d_0 \varepsilon_{ij} n_i n_j, \quad (2)$$

где ε_{ij} – тензор деформаций. Подставив данное выражение в закон Брэгга–Вульфа, можно получить зависимость угла рассеяния от наклона и поворота образца [4, 5] (углы ψ и φ):

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sin \theta} = & \frac{2d_0}{n\lambda} (1 - \varepsilon_{xx}(\sin(\psi - \theta))^2 (\cos \varphi)^2 - \\ & - \varepsilon_{yy}(\sin(\psi - \theta))^2 (\sin \varphi)^2 - \varepsilon_{zz}(\cos(\psi - \theta))^2 - \\ & - 2\varepsilon_{xy}(\sin(\psi - \theta))^2 \cos \varphi \sin \varphi - \\ & - 2\varepsilon_{xz} \sin(\psi - \theta) \cos(\psi - \theta) \cos \varphi - \\ & - 2\varepsilon_{yz} \sin(\psi - \theta) \cos(\psi - \theta) \sin \varphi). \end{aligned} \quad (3)$$

Имея несколько наборов значений углов θ , ψ и φ , подбором компонент тензора деформаций и коэффициента $\frac{2d_0}{n\lambda}$ можно вывести значения компонент этого тензора.

ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦОВ

В ходе эксперимента использовались вольфрамовые образцы с габаритами $25 \times 25 \times 4$ мм. Один из образцов был изготовлен по спецификациям ИТЭР. Данный образец имеет упорядоченную структуру – зерна имеют вытянутую форму. Электронный пучок установки ВЕТА подходит для моделирования теплового воздействия плазмы [6] и поэтому был использован для создания остаточных деформаций и напряжений в вольфрамовых образцах. Пучок имеет максимальную мощность 5 МВт, максимальную длительность импульса 0.2 мс, максимальную тепловую нагрузку 3 МДж/м², величину индукции магнитного поля 0.22 Тл. В результате облучения электронным пучком на поверхностях образцов в центре облученной области образовались трещины.

ЭКСПЕРИМЕНТ НА СИНХРОТРОННОМ ИЗЛУЧЕНИИ

Станция “Аномальное рассеяние” на канале СИ № 2 накопителя электронов ВЭПП-3 использовалась для измерения остаточных напряжений на облученных образцах. Станция включает в себя блок коллимационной системы, монохроматор на основе кристалла кремния с вырезом по рабочей плоскости (111) и сканирующего дифрактометра с плоским совершенным кристаллом-анализатором Ge(111) на дифрагированном пучке [7]. Регистрация рентгенограмм осуществляется точечным сцинтилляционным детектором, управление экспериментом производится системой автоматизации. Рабочая энергия излучения (или длина волны) может быть выбрана в диапазоне от ~6 до ~20 кэВ (соответственно, от ~2 до ~0.6 Å). Угол наклона образца по отношению к падающему пучку может быть установлен с помощью гониометра,

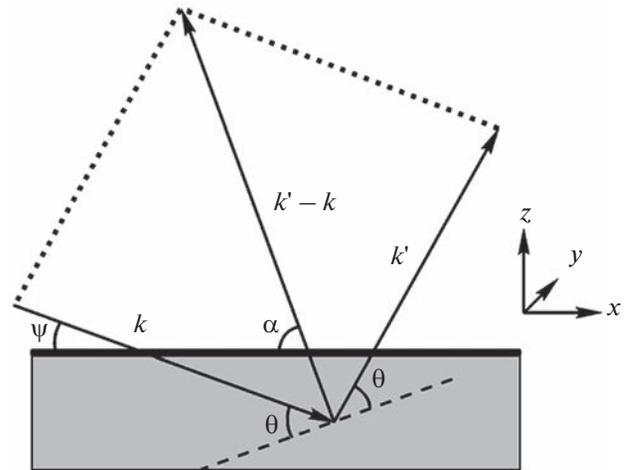


Рис. 1. Схема дифракции в плоскости рассеяния.

положение образца варьируется в двух направлениях с позиционерами с точностью ~0.1 мм.

ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВ РАССЕЯНИЯ

На станции “Аномальное Рассеяние” были получены дифрактограммы пиков кристаллической плоскости W(222) при различных углах наклона облученных образцов. Положения дифракционных максимумов определялось аппроксимацией профиля функцией псевдо-Войт.

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ПРОФИЛЬ НАПРЯЖЕНИЙ

Экспериментально полученные данные были использованы для вычисления компонент тензора деформаций с помощью формулы зависимости угла рассеяния от угла наклона (3). Компоненты тензора напряжений были вычислены по закону Гука. Распределения напряжений по поверхности обладают аксиальной симметрией в соответствии с конфигурацией электронного пучка. Данные измерения были произведены с пространственным разрешением 2 мм с целью сравнения профилей остаточных напряжений с профилями тепловых нагрузок. Ранее аналогичные измерения были проведены на облученном вольфрамовом образце без поверхностных трещин [8]. На рис. 2 представлено сравнение результатов проведенных измерений по двум образцам. В случае образца без трещин (рис. 2а) в радиусе 7 мм от центра облученной области профиль имеет плоскую форму с остаточными напряжениями на уровне ~700 МПа. За пределами этой области остаточные напряжения резко падают. Напротив, по данным с треснутого образца (рис. 2б) видно, что в центральной области облучения имеет место проседание уровня остаточных напряжений с минимум ~200 МПа. На краях обла-

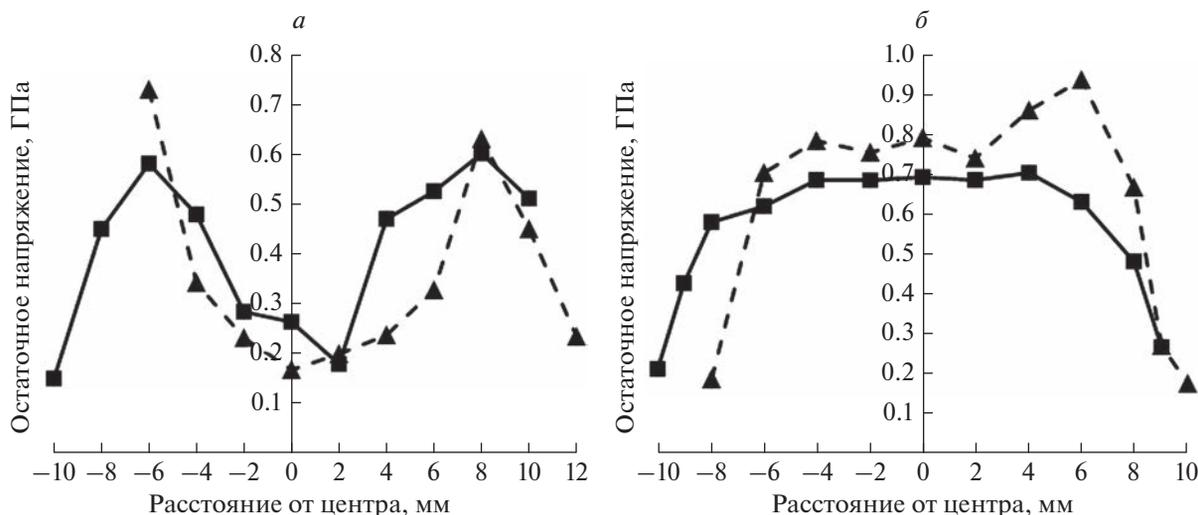


Рис. 2. Пространственные профили остаточных напряжений: в образце без трещин (а), в образце с трещинами (б). Квадраты и сплошная линия при $\varphi = 0^\circ$, треугольники и штриховая линия при $\varphi = 90^\circ$.

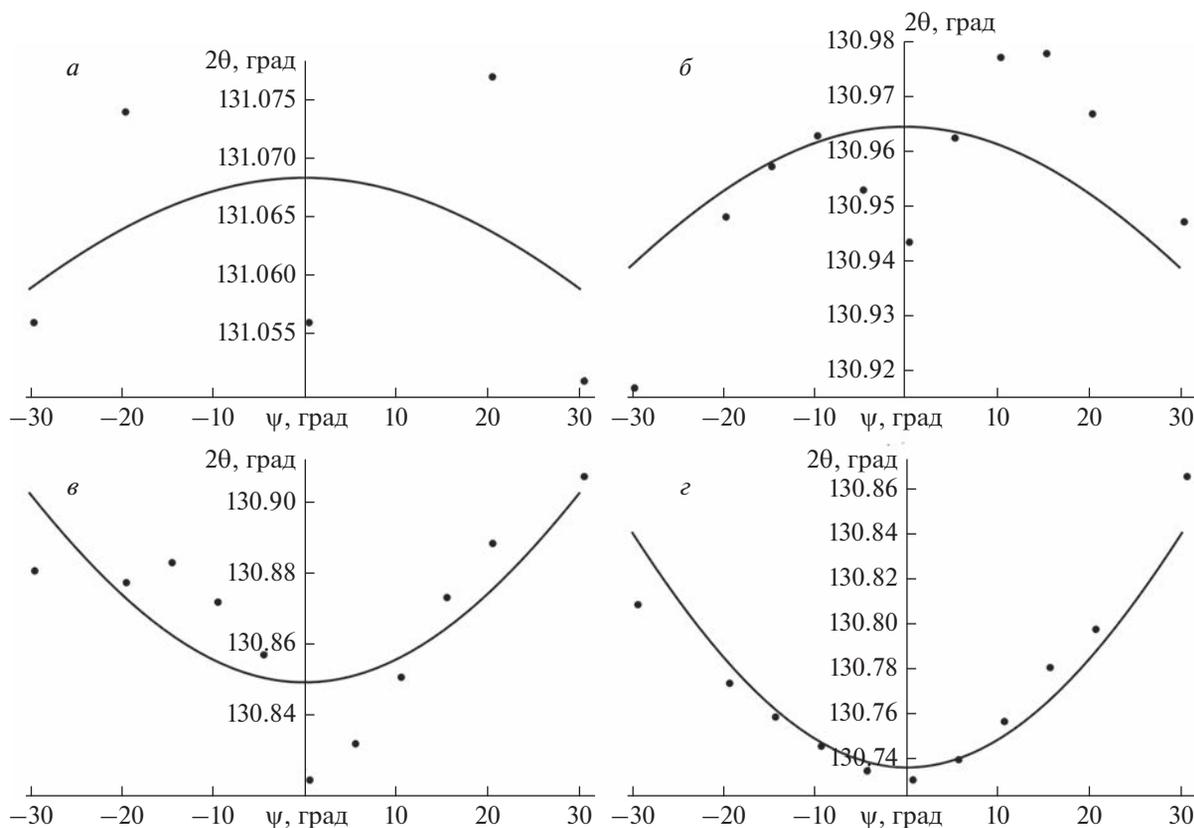


Рис. 3. Зависимости угла рассеяния СИ 2θ от угла наклона образца ψ и их аппроксимации на образцах вольфрама ИТЭР: на облученной стороне с трещинами (а), на облученной стороне с трещинами на большем количестве углов наклона (б), на необлученном образце (в), на необлученной стороне облученного образца (г).

сти напряжения форма профиля соответствует аналогичной на образце без трещин с максимальными значениями напряжений ~ 650 МПа. Падение напряжений в треснутой области поверхности говорит об имевшей место релаксации.

ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ НА ВОЛЬФРАМЕ, ИЗГОТОВЛЕННОМ ПО СПЕЦИФИКАЦИЯМ ИТЭР

Вольфрамовый образец, изготовленный по спецификациям ИТЭР, был облучен электрон-

ным пучком, в результате чего на поверхности образца образовались трещины, и исследован на станции рассеяния СИ на предмет остаточных напряжений аналогично ранее описанному образцу. Планировалось изучить влияние поверхностных трещин на пространственное распределение остаточных напряжений в образце со специфической текстурой ИТЭРовского вольфрама, где зерна имеют вытянутую форму. Как видно на рис. 3а экспериментальные данные не ложились на универсальную кривую (3). Это расхождение с формулой не позволяет корректно вычислить остаточные напряжения. Был проведен повторный дифракционный эксперимент при большем количестве углов наклона образца ψ . Это было сделано для получения более детального вида экспериментальной кривой. Как видно на рис. 3б, проседание зависимости положения дифракционного пика от угла наклона образца затрагивает несколько точек и имеет плавный характер. Аналогичные измерения были проведены на необлученном образце той же марки вольфрама. Полученная зависимость (рис. 3в) также не ложится на экспериментальную кривую, однако не имеет характерной проседающей формы. Затем измерения углов рассеяния были проведены на необлученной стороне первоначального образца. Как видно на рис. 3г, при измерении углов рассеяния на облученном ИТЭРовском образце при отсутствии поверхностных трещин экспериментальные данные корректно описываются теоретической кривой, позволяя произвести дальнейшие вычисления. Остаточное напряжение в центре образца составило ~ 450 МПа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Остаточные напряжения были измерены с пространственным разрешением на вольфрамовых образцах с поверхностными трещинами, об-

разовавшимися в ходе облучения электронным пучком. При сравнении результатов, полученных на первом образце, с аналогичными на образце без трещин очевидно различие в форме профиля остаточных напряжений. В случае образца с трещинами напряжения в центре облученной области падают до уровня ~ 200 МПа, что связано с релаксацией напряжений. Изучить влияние выраженной текстуры на напряжения в треснутом образце не удалось из-за аномальной формы зависимости углов рассеяния от углов наклона образца. Для проведения дальнейших измерений необходимо выяснить причину расхождения с теорией.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 075-15-2021-1348) в рамках мероприятия № 2.1.10.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ikeda K. // Nucl. Fusion. 2007. V. 47. No. 6. P. 2.
2. Makhraj V.A., Garkusha I.E., Malykhin S.V. et al. // Phys. Scripta. 2009. V. 2009. No. T138. Art. No. 014060.
3. Warren B.E. X-Ray diffraction. N.Y.: Dover publications, 1990. 400 p.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М.: Физматлит, 2003. 259 с.
5. Аракчеев А.С., Шмаков А.Н., Шарафутдинов М.Р. и др. // ЖСХ. 2016. Т. 57. № 7. С. 1389; Arakcheev A.S., Sharafutdinov M.R., Tolochko B.P. et al. // J. Struct. Chem. 2016. V. 57. No. 7. P. 1314.
6. Trunev Yu.A., Arakcheev A.S., Burdakov A.V. et al. // AIP Conf. Proc. 2016. V. 1771. Art. No. 060016.
7. Шмаков А.Н., Толочко Б.П., Дементьев Е.Н., Шеромов М.А. // ЖСХ. 2016. Т. 57. № 7. С. 1395; Shmakov A.N., Tolochko B.P., Dementiev E.N., Sheromov M.A. // J. Struct. Chem. 2016. V. 57. No. 7. P. 1321.
8. Balash I.I., Arakcheev A.S., Sharafutdinov A.N. et al. // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2299. Art No. 040006.

Surface cracks and texture influence on residual stresses in tungsten after plasma exposure

I. I. Balash^{a, b, c, *}, S. R. Kazantsev^{a, b, d}, A. N. Shmakov^{a, c, d}, P. A. Piminov^{a, d}, V. M. Borin^a

^aBudker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia

^bInstitute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630128 Russia

^cInstitute of High Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, 634055 Russia

^dSynchrotron Radiation Facility – Siberian Circular Photon Source “SKIF”, Boreskov Institute of Catalysis of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Koltsovo, 630559 Russia

*e-mail: ilyabalash@yandex.ru

Tungsten samples have been studied after being irradiated by the BETA facility's electron beam for the purpose of simulating plasma heat loads in a fusion reactor's vacuum chamber. X-ray diffraction methods were used for residual stress measurement in the irradiated samples, some of which were manufactured according to the ITER specifications.