

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДЕФЕКТОВ В ЦИРКОНИЕВЫХ ОБОЛОЧКАХ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ ГЕЛИЯ

Рас Эль Уэд А.Р.^{3,1}, Сурин В.И.², Исаев Р.Ш.³, Бокучава Г.Д.⁴,
Папушкин И.В.⁵, Арадейб А.О.⁶

^{1,2,6}Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

^{3,4,5}Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

¹raoufraseloued@gmail.com

Аннотация. В ОИЯИ г. Дубна проведены нейтронно-графические и электрофизические исследования циркониевой оболочки, облученной там же на ускорителе ЭГ-5 в вакуумной камере (остаточное давление $5 \cdot 10^{-5}$ Торр) ионами гелия с энергией 2 МэВ. Результаты по дифракции нейтронов получены на фурье-дифрактометре ФСД (фурье стресс дифрактометр) на импульсном реакторе ИБР-2 в лаборатории нейтронной физики. Проведена серия измерений контактной разности потенциалов на поверхности оболочки методом ручного поточечного сканирования. Измерения выполняли до начала и после окончания облучения. Плотность точек контроля составляла $0,7 \text{ мм}^{-2}$. В поверхностном слое толщиной несколько микрометров обнаружены обширные кластерные скопления дефектов.

Ключевые слова: облучение, циркониевые оболочки, сканирующая контактная потенциометрия

STUDY OF SURFACE CLUSTERING OF DEFECTS IN ZIRCONIUM SHELLS UNDER IRRADIATION WITH HELIUM IONS

Ras El Oued A.R.Z.¹, Surin V.I.², Isaev R.Sh.³, Bokuchava G.D.⁴,
Papushkin I.V.⁵, Aradeib A.O.⁶

^{1,2,6}National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

^{3,4,5}Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

Abstract. Neutron-graphic and electrophysical studies of a zirconium shell irradiated with 2 MeV helium ions in a vacuum chamber (residual pressure $5 \cdot 10^{-5}$ Torr) at the JINR in Dubna were carried out at the same site. Neutron diffraction results were obtained using a Fourier stress diffractometer (FSD) at a pulsed reactor IBR-2 reactor was tested in the neutron physics laboratory. A series of measurements of the contact potential difference on the cladding surface was conducted using manual point-by-point scanning. The measurements were taken before and after irradiation. The density of the control points was 0.7 mm^{-2} . Extensive clusters of defects were detected in the surface layer several micrometers thick.

Keywords: irradiation, zirconium shells, scanning contact potentiometry

Циркониевая оболочка диаметром 9 мм и длиной 100 мм была локально облучена на ускорителе ЭГ-5 ОИЯИ (г. Дубна) в вакуумной камере ($5 \cdot 10^{-5}$ Торр) ионами гелия с энергией 2 МэВ [1]. Для проведения эксперимента краевая часть оболочки была разбита по длине окружности на четыре равные части. Каждый такой участок площадью, примерно равной 1 см^2 , облучали в течение одного часа. Плотность потока частиц составляла $6,25 \cdot 10^{12}$ частиц/ $\text{см}^2 \cdot \text{сек}$. Достигнутый флюенс равен $9 \cdot 10^{16}$ частиц/ см^2 .

Проведена серия измерений поверхности оболочки методом ручного поточечного сканирования [2] по 15-ти продольным трекам с азимутальным шагом сканирования 1,9 мм. Измерения выполнялись до начала и после окончания облучения. Плотность точек контроля составляла $0,7 \text{ мм}^{-2}$. Результаты измерений необлученного и облученного материала анализировались на 20-ти уровнях фиксации в интервале SLS от 2,000 до 6,097.

Пострадиационные исследования по дифракции нейтронов на фурье-дифрактометре ФСД (Фурье-Стресс-Дифрактометр) [3] импульсного реактора ИБР-2 в ЛНФ ОИЯИ (г. Дубна) проводились после трех недельной выдержки оболочки при нормальных условиях. Разрешающая способность детектора обратного рассеяния (BS) $\Delta d/d \approx 2 \cdot 10^{-3}$ при $d = 2 \text{ \AA}$, $\pm 90^\circ$ -детекторов $\Delta d/d \approx 4 \cdot 10^{-3}$ при $d = 2 \text{ \AA}$. Измеренные дифракционные спектры были обработаны методом профильного анализа по Ритвельду [4], определены параметры кристаллической решетки материала и параметры ширины дифракционных пиков.

В поверхностном слое толщиной несколько микрометров обнаружены кластерные образования дефектов, которые связаны как со скоплениями пузырьков гелия, так и с ди-междоузлиями (dumbbells) атомов циркония [5] (рисунок 1).

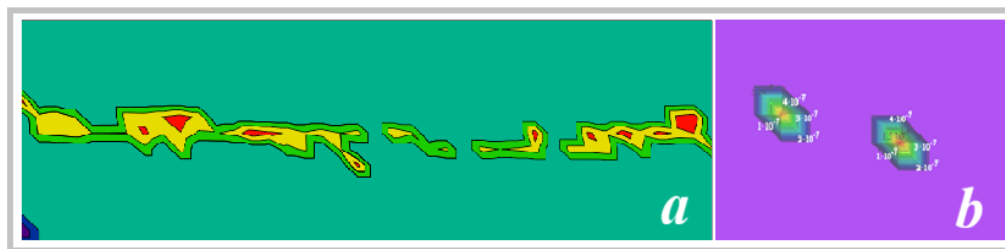


Рисунок 1 – Кластерные образования на поверхности оболочки (a) и опорные рефлексы образований (b).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ledo Pereda L.M., Semenov V.N., Rikhvitsky V.S. et al. Ion Beam Scanning System for EG-5 Accelerator// Phys. Part. Nuclei Lett. V.21, PP. 938-945, 2024. <https://doi.org/10.1134/S1547477124701061>
2. Сурин В.И., Иванов М.Б., Волкова З.С., Щербаков А.А. Конструирование приборов и установок электрического неразрушающего контроля. Часть 1. Теоретические основы контактной потенциометрии. – М; НИЯУ МИФИ, 2024.-188 с.
3. Gizo Bokuchava Neutron Fourier Stress Diffractometer FSD at the IBR-2 pulsed reactor// Crystals, 2018, Vol. 8, Issue 8:318. <http://doi.org/10.3390/cryst8080318>
4. Rietveld H.M. A profile refinement method for nuclear and magnetic structures// Journal of Applied Crystallography, Vol. 2, 1969, pp. 65-71. <http://doi.org/10.1107/S0021889869006558>
5. Hanliang Zh., Mengjun Q., Tao W., Joel D., Mihail I. Atomic-scale study of He ion irradiation-induced clustering in α -Zirconium// Acta Materialia, 244 (2023). 118584.