

P14-2002-267

А. Хофман\*, А. Ю. Дидык, В. К. Семина

**ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ  
ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЯ  
ПРИ ДЕСОРБЦИИ ИМПЛАНТИРОВАННОГО  
КСЕНОНА, КРИПТОНА И ДРУГИХ ГАЗОВ**

Направлено в журнал «Физика, химия и обработка материалов»

---

\*Институт атомной энергии, Свек, Республика Польша

## ВВЕДЕНИЕ

Материалы, используемые в ядерных реакторах во время работы, испытывают радиационные воздействия, обусловленные ядерно-физическими излучениями. Одним из таких воздействий является накопление продуктов распада ядерного топлива - инертных газов. При этом инертные газы при достаточно высокой концентрации в местах накопления (в зонах остановки) стремятся образовать комплексы - газовые пузырьки. Поэтому поведение пузырьков инертных газов в реакторных материалах служит предметом многочисленных исследований в течение последних нескольких десятков лет (см., например, [1-3]).

Во время работы в реакторах ВВЭР и PWR скорость деления составляет  $\sim 1,3$  делений/(см<sup>3</sup>·с). Каждое деление дает два осколка с массами 140 и 95 а.е.м. и энергиями 70 и 98 МэВ соответственно [2]. Для таких осколков деления легко оценить их средние пробеги в материале стенки твэла, которые приведены в таблице. Расчеты выполнены с использованием программы TRIM-2000.

*Таблица. Пробеги осколков деления  $R_p$  в материалах конструкций реакторов*

Материал и его плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$R_p^{\min}$ , мкм (масса осколка деления $M_1=140$ а.е.м., его энергия $E_1=70$ МэВ)	$R_p^{\max}$ , мкм (масса осколка деления $M_2=95$ а.е.м., его энергия $E_2=98$ МэВ)
UO <sub>2</sub> , $\rho=10,95$	6,60±0,6	8,56±0,6
UAl <sub>4</sub> , $\rho=5,97$	10,1±0,6	13,0±0,5
Al, $\rho=2,702$	12,3±0,6	15,9±0,4
Zr, $\rho=6,49$	7,6±0,6	10,0±0,5

Заметим, что осколки деления представляют собой поток высокоэнергетических продуктов с плотностью потока  $5 \cdot 10^9$  ион/(см<sup>2</sup>·с), доходящий до внутренней поверхности оболочки твэла. При стандартном выгорании ядерного топлива в слое с толщиной  $h \approx 10$  мкм накапливается до 2% посторонних атомов. Тем самым, на внутренней стороне алюминиевой оболочки твэла образуется ионно-имплантированный слой с радиационными повреждениями (дефектами).

Влияние газовых пузырьков инертных газов на свойства алюминия сказывается в свою очередь на поведении находящихся в процессе функционирования и отработавших тепловыделяющих элементов с оболочкой из алюминия, особенно при их длительном (порядка 50 лет) хранении в сухих хранилищах. Отметим также, что наряду с выделением (десорбцией) инертных газов необходимо учитывать возможность десорбции других газовых молекул, таких, как H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO и CO<sub>2</sub>, всегда присутствующих в конструкционных материалах в той или иной концентрации [4]. Такие процессы могут приводить к изменению структуры поверхности и к снижению ее механической прочности.

Для изучения радиационных эффектов, связанных с поведением газов в материале конструкций ядерных реакторов, для моделирования используется облучение материалов тяжелыми ионами инертных газов.

Ранее, в работе [5] нами была исследована эволюция микроструктуры Al после облучения ионами <sup>129</sup>Xe с энергией  $E=124$  МэВ в слое с радиационными повреждениями. Цель данной работы - изучение изменений структуры поверхности и поведения пузырьков, заполненных ксеноном или криптоном, в ионно-имплантированном слое с использованием методов просвечивающей (ПЭМ) и растровой (РЭМ) электронной микроскопии и атомной силовой микроскопии (АСМ).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве материала для исследований были взяты фольги из алюминия чистотой 99,99%, имеющие толщину 86 мкм. В результате отжига в вакууме  $6,5 \cdot 10^{-5}$  Па при температуре  $480^\circ\text{C}$  в течение 8 ч в образцах сформировалась структура, состоящая из равноосных зерен. Микроструктура образцов в исходном (отожженном) состоянии показана на рис.1.

Отожженные образцы облучались ионами инертных газов. Облучение образцов ионами  $^{129}\text{Xe}$  с энергией  $E=124$  МэВ перпендикулярно плоскости поверхности образцов до флюенса  $10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> с плотностью потока ионов, не превышающей  $2,5 \cdot 10^{11}$  ион/см<sup>2</sup>·с, выполнялось при температуре, близкой к комнатной. Облучение ионами  $^{84}\text{Kr}$  с энергией  $E=145$  МэВ до флюенсов  $10^{14}$  и  $1,3 \cdot 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> проведено на ускорителе У-400 ЛЯР им. Г.Н.Флерова на установке облучения, описанной в работах [6, 7]. При облучении до флюенса  $1,3 \cdot 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> ионы входили в фольгу по нормали к ее поверхности. Профили легирования ионами ксенона и криптона и осколками деления и сечения дефектообразования, рассчитанные по программе TRIM-2000, для нормального облучения показаны на рис.2.

Одновременно с нормальным (т.е. угол наклона  $\alpha=0^\circ$ ) облучением до флюенса  $10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> выполнялось облучение образцов под углом к поверхности  $\alpha=45, 60$  и  $75^\circ$ . Применение такой схемы облучения позволило нам варьировать глубину залегания слоя ионного легирования и уровня повреждения в пике смещения. Фактический флюенс облучения для этих образцов составлял  $F \times t = 10^{14} \times \cos \alpha$  ион/см<sup>2</sup>, т.е.  $0,7 \cdot 10^{14}$ ,  $0,5 \cdot 10^{14}$  и  $0,26 \cdot 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> для углов  $\alpha=45, 60$  и  $75^\circ$  соответственно.

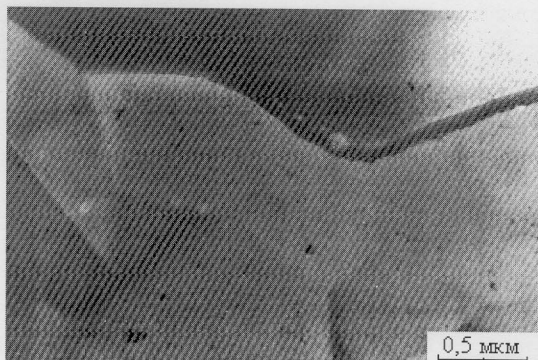


Рис. 1. Микроструктура Al в исходном состоянии (после отжига при 480°C, 8 ч)

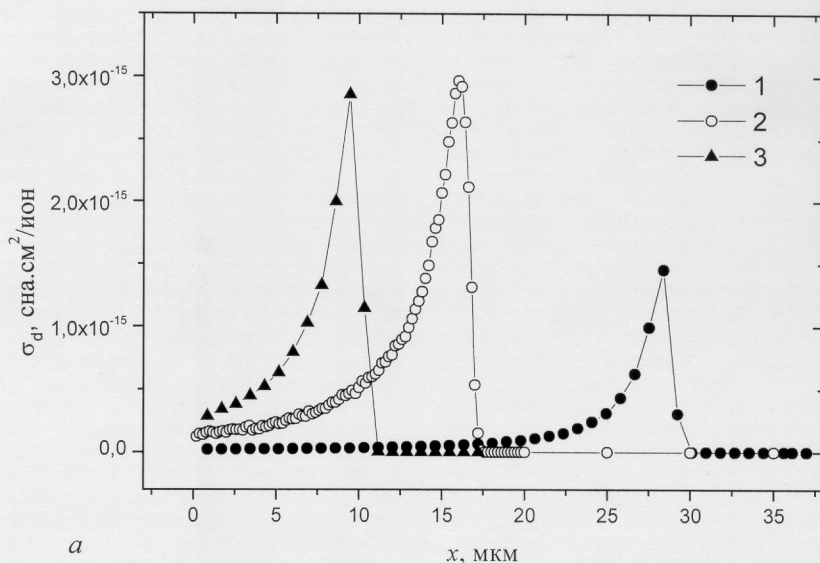
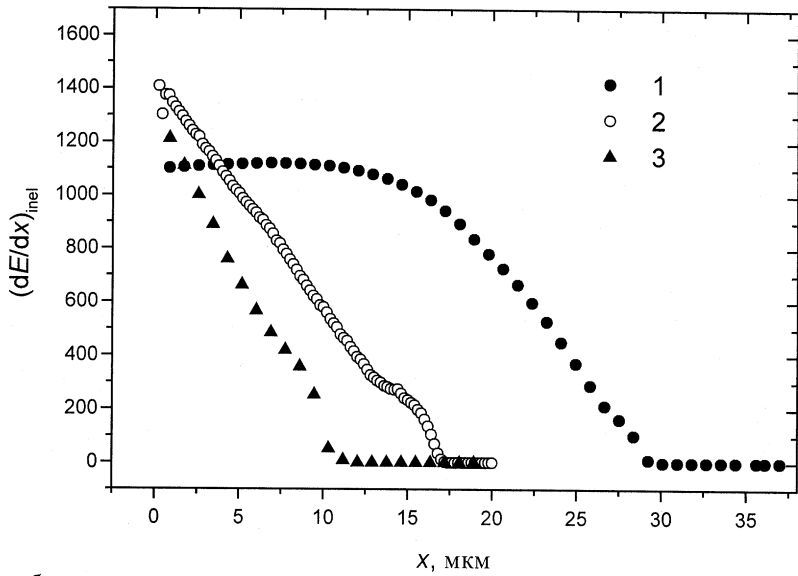
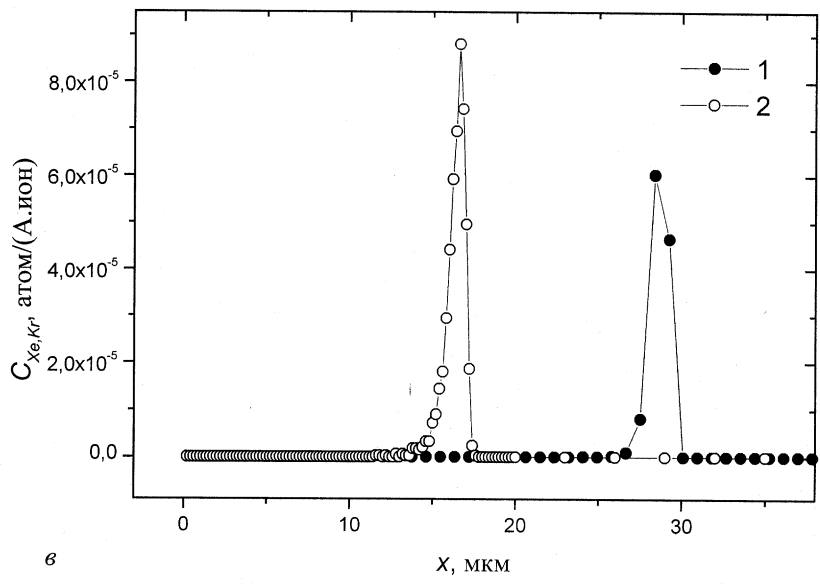


Рис. 2. Профили сечения дефектообразования (а), энергетических потерь энергии (б) ионов криптона с энергией 245 МэВ (1), ионов ксенона с энергией 145 МэВ (2) и осколков деления массой 140 а.е.м. и энергией 70 МэВ (3) и профили легирования ионами ксенона и криптона (в), рассчитанные по программе TRIM-2000, для нормального облучения



б



в

Исследования влияния облучения на поверхность алюминия были выполнены на сканирующих электронных микроскопах JSM-840 и DSM-942 (Институт ядерной химии и техники, Варшава, Республика Польша). Структура поверхности алюминия после облучения флюенсом  $10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> при комнатной температуре и углах наклона  $\alpha=0$  и  $75^\circ$  показана на рис.3. Видно, что в результате облучения под углом  $75^\circ$  на поверхности появляются трещины и разрывы (рис.3в,г), хотя при нормальном облучении (рис.3б) структура поверхности отличается от исходной не столь значительно. Видно, что при нормальном облучении происходили процессы распыления поверхности, вследствие которых исчезли характерные выступы, образованные при изготовлении фольги.

При нормальном облучении алюминия ионами криптона до флюенса  $1,3 \cdot 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> также не происходит образования на поверхности особых структур за исключением процессов распыления, которые для чистого алюминия, всегда покрытого тонким слоем оксида  $Al_2O_3$ , значительны.

На рис.4 представлены изображения в атомном силовом микроскопе (АСМ) структуры поверхности предварительно полированных образцов из алюминия в исходном состоянии (а) и после облучения ионами  $^{209}Bi$  с энергией 705 МэВ до флюенса  $7 \cdot 10^{12}$  ион/см<sup>2</sup> (б). Видно, что поверхность после облучения становится более гладкой, что связано с распылением поверхности. Перепад высот рельефа между темными и светлыми тонами для исходного (рис.4а) и облученного (рис.4б) алюминия составляет  $H_a=50 \text{ \AA}$  и  $H_b=40 \text{ \AA}$  соответственно. Тогда коэффициент распыления алюминия  $K_{ex}$  при облучении ионами  $^{209}Bi$  можно определить из выражения

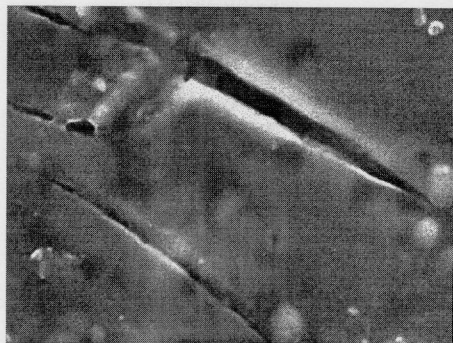
$$K_{ex}^{(Bi)} = (H_a - H_b) \cdot (1 \text{ см}^2) \cdot N_{Al} / (Ft)_{Bi} > 8,6 \cdot 10^3 \text{ атом/ион},$$



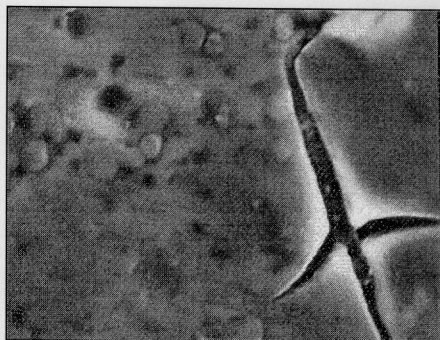
*a*



*б*



*в*

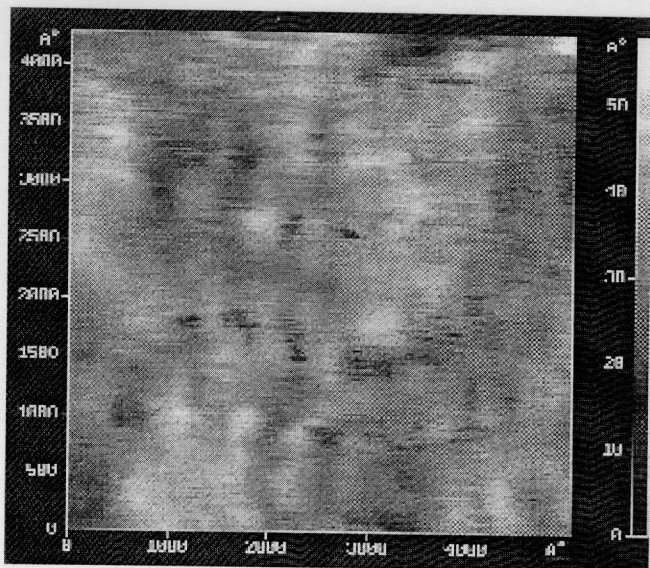


*г*

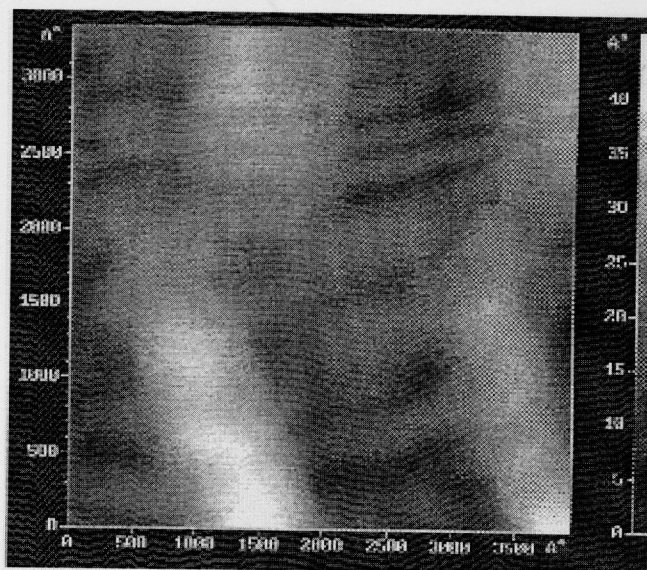
2 мкм

*Рис.3.* Структура поверхности алюминия в исходном состоянии (*a*) и после облучения ионами  $^{84}\text{Kr}$  с энергией 245 МэВ флюенсом  $10^{14}$  ион/см $^2$  при комнатной температуре и углах наклона  $\alpha=0^\circ$  (*б*) и  $75^\circ$  (*в*, *г*)





*a*



*б*

Рис. 4. Изображение в атомном силовом микроскопе структуры поверхности предварительно полированных образцов алюминия в исходном состоянии (а) и после облучения ионами  $^{209}\text{Bi}$  с энергией 705 МэВ до флюенса  $7 \cdot 10^{12}$  ион/см<sup>2</sup> (б)

где  $N_{Al}=6,03 \cdot 10^{22}$  атом/см<sup>3</sup> - число атомов алюминия в 1 см<sup>3</sup>. Заметим, что проективный пробег ионов  $^{209}Bi$  в алюминии  $R_p=(39,7 \pm 0,6)$  мкм, а ионизационные потери энергии  $S_e = \left( \frac{\partial E}{\partial x} \right)_{inel} = 25,4$  кэВ/нм.

Для сравнения: ионизационные потери энергии от осколков деления с массой 140 а.е.м. и энергией 70 МэВ составляют  $S_e^{оск}=9,92$  кэВ/нм. Поэтому коэффициенты распыления Al от осколков деления будут меньше [8]:

$$K_{ex}^{(оск)} \sim K_{ex}^{(Bi)} \cdot \left( \frac{S_{ex}^{оск}}{S_{ex}^{Bi}} \right)^2 = 1,3 \cdot 10^3 \text{ атом/осколок.}$$

Поверхность образцов, облученных ионами ксенона флюенсом  $10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>, практически не отличалась от исходной, как после облучения ионами криптона. Для исследования газовой десорбции и подвижности газовых пузырьков, а также эволюции структуры поверхности образцы, облученные ионами ксенона, были отожжены при температурах 250, 480 и 600°C. Для определения диаметра и количества (концентрации) пузырьков газа использовали просвечивающую электронную микроскопию и программу для обработки изображений *Image* [9]. Образцы для просвечивающей электронной микроскопии были приготовлены традиционной химической и электролитической полировкой в 20% растворе хлорной кислоты в этаноле при температуре -20°C.

После отжига при 250°C не обнаружено никаких изменений поверхности: по-прежнему характерной остается структура поверхности без ярко выраженных дефектов структуры. Местами на ней видны сгруппированные ямки диаметром ~0,3 мкм со средней концентрацией  $5 \cdot 10^6$  ион/см<sup>2</sup>. После отжига при температуре 480°C (рис.5) наблюдаются в достаточном количестве более глубокие ямки (диаметром ~0,8 мкм) и "пузырьковые" кратеры и чешуйки, а также микротрещины. Это свидетельствует о том, что происходит скопление газов под поверхностью

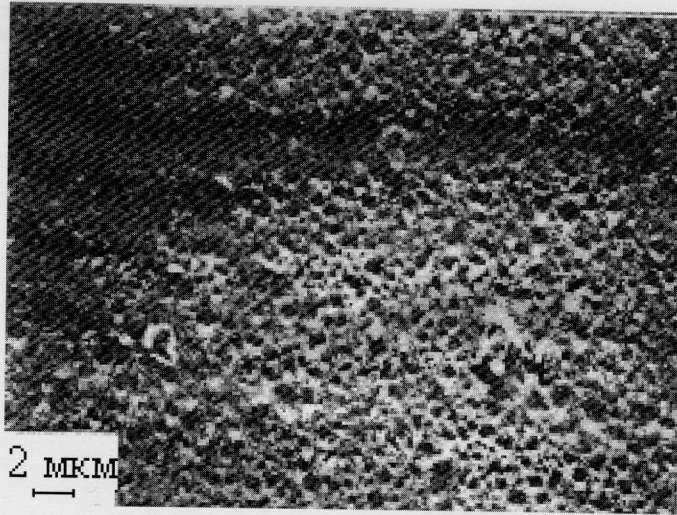


Рис.5. Структура поверхности алюминия, облученного ионами  $^{129}\text{Xe}$  ( $E=124$  МэВ) до дозы  $1,3 \cdot 10^{15}$  ион/см $^2$ , после отжига при 480°C, 15 мин

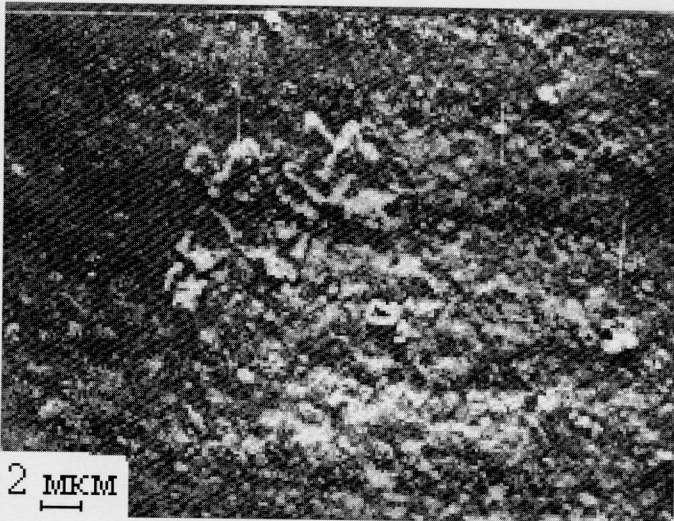


Рис.6. Структура поверхности алюминия, облученного ионами  $^{129}\text{Xe}$  ( $E=124$  МэВ) до дозы  $1,3 \cdot 10^{15}$  ион/см $^2$ , после отжига при 600°C, 15 мин

в виде пузырьков с достаточно высоким давлением газа, которые вызывают явления, подобные блистерингу и флекингу. Средний диаметр "пузырьковых" кратеров составил  $\sim 1,1$  мкм при средней концентрации  $6 \cdot 10^5$  ион/см<sup>2</sup>. Большая часть поверхности имеет губчатую структуру.

После отжига при 600°C вся поверхность оказалась покрытой губчатой структурой и "пузырьковыми" кратерами (рис.6). Количество пузырьков в губчатой структуре и в кратере равно соответственно  $6 \cdot 10^{11}$  ион/см<sup>2</sup> и  $4 \cdot 10^{11}$  ион/см<sup>2</sup>, а их диаметр – 5,5 нм и 6 нм.

Из полученных результатов следует, что при температурах ниже 250°C не происходит видимых структурных изменений поверхности Al, имплантированного ксеноном, за исключением небольших ямок вдоль границ субзерен. Это подтверждают результаты работы [10], в которой была исследована термическая экстракция криптона из алюминия. Она быстро возрастает при температурах выше  $\sim 270^\circ\text{C}$ , и с этим фактом связывается изменение структуры поверхности.

Образование на поверхности алюминия, имплантированного ксеноном, после отжига губчатой и "пузырьковой" структур и особенно микротрещин может влиять на деградацию механических свойства оболочек отработанных твэлов как при эксплуатации, так и во время их длительного хранения.

В работе [3] были проведены стереоскопические испытания, из которых следует, что все пузырьки находятся вблизи поверхности и служат местом зарождения микротрещин. Скопления пузырьков были вытянуты параллельно поверхности образца и служили местом возникновения отслаивающихся от поверхности слоев (явление флекинга). Концентрация пузырьков в этом слое небольшая, но пузырьки сохраняются даже после отжига при 550°C.

Согласно данным работы [16], давление, требуемое для возникновения трещины, возрастает с уменьшением плотности пузырьков, вокруг которых возникают значительные деформации. Электронно-микроскопические исследования после отжига при 550°С показали, что средний диаметр пузырьков равен 6,7 нм (рис.8), а количество пузырьков составляет примерно  $7,5 \cdot 10^{11}$  ион/см<sup>2</sup> [16]. Этот диаметр пузырьков в 4 раза больше, а их количество в 8 раз меньше, чем при комнатной температуре (соответственно 1,6 нм и  $5,9 \cdot 10^{12}$  ион/см<sup>2</sup>) (см.рис.7). Кроме того, обнаружены большие нерегулярные дефекты, которые вызваны образованием микротрещин в процессе отжига. Средний диаметр микротрещин достигает 69 нм, а их количество -  $1,3 \cdot 10^{11}$  ион/см<sup>2</sup>.

Образование микротрещин можно объяснить следующим образом. Согласно работе [11], зависимость между давлением газа  $P$  внутри пузырьков радиуса  $r_b$  и средней величиной микронапряжений  $\sigma_n$  между пузырьками задается уравнением

$$P = \sigma_n(A^{-1} - 1) + 2\gamma_s / r_b. \quad (1)$$

Здесь  $A$  - часть поверхности, пересеченной пузырьками, когда материал с пузырьками вырезан в плоскости, параллельной поверхности материала, и равна  $A = \pi r_b^2 N_b^{2/3}$  для простой кубической решетки пузырьков [12] или  $A = \pi r_b^3 N_b$  для беспорядочного расположения пузырьков [13];  $\gamma_s$  - удельная поверхностная энергия,  $N_b$  - плотность пузырьков.

Принимая напряжение образования трещин равным  $\sigma_n = 0,0026\mu$  (здесь  $\mu = 26,5$  ГПа [14] - модуль сдвига), а  $\gamma_s = 0,9$  Дж/м<sup>2</sup> [15] и предполагая, что пузырьки распределены равномерно в приповерхностном слое толщиной  $L = 12$  нм, что было подтверждено стереоскопическими наблюдениями, получаем, что давление образования микротрещин равно 0,7 ГПа для простой кубической решетки пузырьков и 1,4 ГПа для

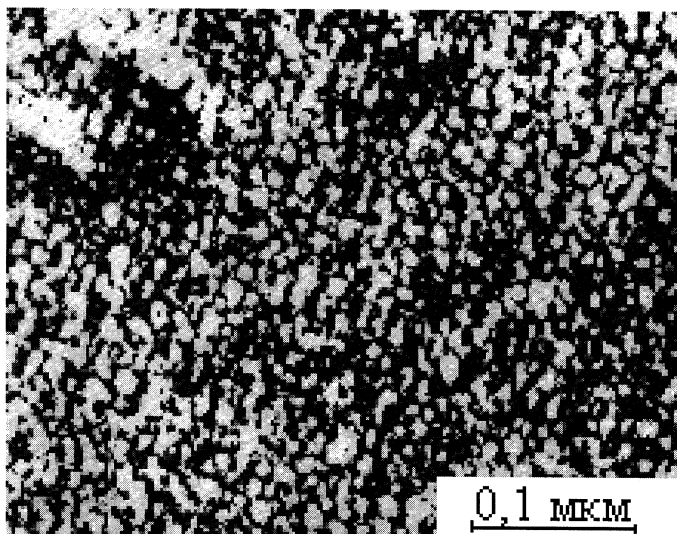


Рис.7. Микроструктура алюминия, облученного ионами  $^{129}\text{Xe}$  ( $E=124$  МэВ) до дозы  $1,3 \cdot 10^{15}$  ион/ $\text{cm}^2$ , при комнатной температуре (ПЭМ, темное поле)

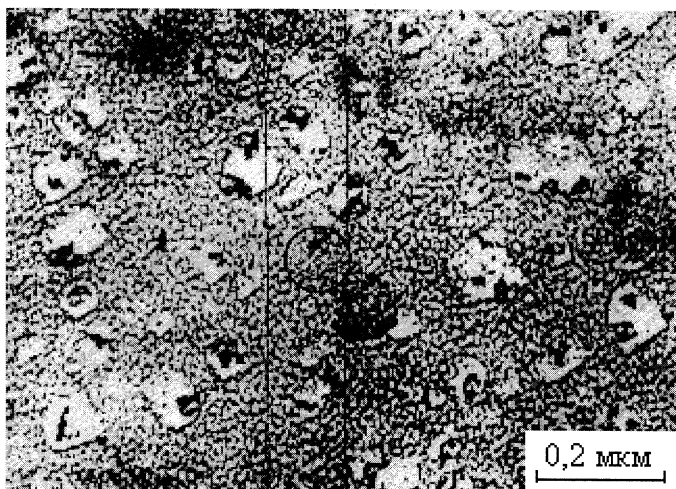


Рис.8. Поверхность алюминия, облученного ионами  $^{129}\text{Xe}$  ( $E=124$  МэВ) до дозы  $10^{16}$  ион/ $\text{cm}^2$ , после отжига при  $550^\circ\text{C}$  [15]

произвольного расположения пузырьков [16]. Давление в пузырьках, согласно данным работы [17], при 550°C составляет 3,7 ГПа, то есть достаточно для образования трещин. Хорошо известно, что тонкие пластинки когерентных выделений различных фаз вводят в матрицу большие растягивающие деформации (например, зоны ГП в сплаве Al-Cu) и дают пятна на дифракционной картине [18]. Микротрещины, заполненные атомами ксенона, можно рассматривать как такие тонкие пластинки.

Давление в пузырьках ксенона при комнатной температуре оценивается как 2,0 ГПа [16]. Давление, необходимое для образования микротрещины при комнатной температуре, согласно уравнению (1), равно 3,4 ГПа для простой кубической решетки пузырьков и 10,9 ГПа для беспорядочной структуры [15]. Этим объясняется, причина отсутствия при комнатной температуре микротрещин. Это факт подтвержден анализом электронограмм [10].

Для практики длительного хранения отработанного топлива исследовательских реакторов очень важно определение температуры, выше которой на поверхности имплантированного алюминия появляется губчатая и "пузырьковая" структура и образуются микротрещины. В работе [19] было установлено, что один из механизмов деградации, который, возможно, влияет на интегральное состояние алюминиевой оболочки, - поведение атомов инертных газов в матрице топлива и оболочке. Такие процессы деградации активно развиваются при температурах выше 200°C.

## **ВЫВОДЫ**

Выполненные в работе исследования влияния облучения ионами криптона и ксенона на структуру поверхности алюминиевых образцов

(чистота 99,99%) при различных условиях облучения (различные углы входа ионов от нормальных до 75°) и флюенсах при послерадиационном отжиге показали, что в зависимости от температуры отжига структура поверхности претерпевает значительные изменения. Обнаруженные дефекты структуры несомненно снижают механические свойства изученных образцов. Поскольку алюминий и сплавы на его основе используются в конструкциях оболочек твэлов исследовательских реакторов, необходимо учитывать негативное влияние газовой десорбции из оболочек наработанных при длительной эксплуатации инертных и всегда присутствующих собственных газов в материале. В особенности это касается предсказания поведения отработавших алюминиевых оболочек твэлов при их длительном хранении.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. D.E.Alexander, R.C.Birtcher. The effect of ion irradiation on inert gas bubble mobility // *J.Nucl.Mater.*, 1992, v.191-194, pt.B, p.1289-1294.
2. I.Shuster, C.Lemaignan. Embrittlement induced by fission recoils of the inner surface of PWR fuel cladding. A simulation using heavy ions // *J.Nucl.Mater.*, 1986, v.151, p.108-111.
3. I.Hashimoto, H.Yorikawa, M.Mitsuya, H.Ymaguchi, K.Furuya, E.Yagi, M.Iwaki. Annealing behaviour of krypton-implanted aluminium // *J.Nucl.Mater.*, 1987, v.150, p.100-104.
4. M.Chanel, J.Hansen, J.-M.Laurent, N.Madsen, E.Mahner. Experimental investigation of impact-induced molecular desorption by 4.2 MeV/a.m.u. Pb ions // *Proceedings of 2001 Particle Accelerator Conference*, 18-22 June 2001, Chicago, USA. CERN/PS 2001-040 (AE), 2001, 3pp.
5. А.Хофман, А.Ю.Дидык, В.К.Семина. Эволюция структурных дефектов в алюминии, облученном ионами ксенона // *Радиационная физика*



- твёрдого тела*. Труды X Межнационального совещания, Севастополь, 25-30 июня 2001 г., М., изд-во НИИ ПИМТ МГИЭМ (ТУ), 2001, с.16-21; *препринт ОИЯИ Р14-2001-251*, Дубна, 2001.
6. Ю.Ц.Оганесян, С.Н.Дмитриев, А.Ю.Дидык, Г.Г.Гульбекян, В.Б.Кутнер. Новые возможности ускорительного комплекса ЛЯР им.Г.Н.Флерова в производстве трековых мембран // *Радиационная физика твёрдого тела*. Труды X Межнационального совещания, Севастополь, 3-8 июля 2000 г., М., изд-во НИИ ПИМТ МГИЭМ (ТУ), 2000, с.42-50.
  7. V.A.Skuratov, A.Illes, Z.Illes, K.Bodnar, A.Yu.Didyk, A.V.Arkipov, K.Navancsák. Beam diagnostics and data acquisition system for ion beam transport line used in applied research // *JINR Communication E13-99-161*, Dubna, 1999, 8 p.
  8. И.А.Баранов, А.С.Кривоухатский, В.В.Обнорский. Механизм распыления материалов тяжёлыми многозарядными ионами - осколками деления // *ЖТФ*, 1981, т.51, №12, с.2457-2475.
  9. *Electron Microscopy Society of Am. Bull.*, 1991, v.21, p.83.
  10. K.Takaishi, T.Kikuchi, K.Furuya, I.Hashimoto, H.Yamagichi, E.Yagi, M.Iwaki. Thermal extraction of krypton in aluminum using mass spectrometer // *Physica Status Solidi A*, 1986, v.95, p.135-139.
  11. W.G.Wolfer // *J.Nucl.Mater.* 1980, v.93-94, p.713.
  12. J.H.Evans. An interbubble fracture mechanism of blister formation on helium-irradiated metals // *J.Nucl.Mater.* 1977, v.68. p.129-140.
  13. E.E.Underwood. *Quantative stereology* (Addison-Wesley, Reading, 1970).
  14. M.F.Ashby, C.Gandhi, D.M.R.Taplin. Fracture-mechanism maps and their construction for F.C.C. metals and alloys // *Acta Metall.* 1979, v.27, №5, p.699-729.
  15. C.T.Lynch. *Handbook of Materials Science*, CRC Press, Ohio (USA), 1974, vol.1, p.105.

16. I.Hashimoto, H.Yorikawa, H.Mitsuya, H.Ymaguchi, K.Takaishi, K.Kikuchi, K.Fukuya, E.Yagi, M,Iwaki. Annealing behaviour of krypton-implanted aluminum // *J.Nucl.Mater.* 1987, v.149, №1, p.69-73.
17. C.Ronchi. Extrapolated equation of state for rare gases at high temperatures and densities // *J.Nucl.Mater.*, 1981, v.96, №3, p.314-328.
18. П.Хирш, А.Хови, Р.Николсон, Д.Пэшли, М.Уэлан. *Электронная микроскопия тонких кристаллов*. М.: Мир, 1968, с.325-331.
19. R.L.Sindelar, H.B.Peacock, Jr., P.S.Lam, N.C.Iyer, M.R.Loutham, Jr. Acceptance criteria for interim dry storage of aluminium-alloy clad spent nuclear fuels (U) // *WSRC-TR-95-0347 (u)* USA, Savannah River Technology Center, March 1996.

---

Получено 27 ноября 2002 г.

Хофман А., Дидык А. Ю., Семина В. К.

P14-2002-267

Изменения структуры поверхности алюминия при десорбции имплантированного ксенона, криптона и других газов

Образцы алюминия были облучены ионами  $^{84}\text{Kr}$  с энергией 245 МэВ до флюенса  $10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> под различными углами к поверхности образца и ионами  $^{129}\text{Xe}$  с энергией 124 МэВ до флюенса  $10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> перпендикулярно к поверхности образца. Методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии исследовали изменения структуры поверхности алюминия, облученного ионами  $^{129}\text{Xe}$ , после отжига при температурах 250, 480 и 600 °С и ионами  $^{84}\text{Kr}$  непосредственно после облучения. Обнаружено, что при отжиге происходят различные изменения структуры поверхности имплантированного алюминия. При температуре отжига 250 °С не наблюдается каких-либо структурных изменений поверхности. При 480 °С появились маленькие ямки вдоль границ субзерен, а при 600 °С на имплантированной поверхности видны микротрещины, маленькие ямки, пузырьки, блистеры, раковины, губчатая структура и чешуйки. После облучения ионами  $^{84}\text{Kr}$  обнаружено появление трещин на поверхности алюминия при увеличении углов облучения, т. е. при приближении профиля залегания ионов криптона к поверхности. Обсуждается влияние температуры на подвижность ксенона и формирование пузырьков, а также образование микротрещин.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2002

Перевод авторов

Hofman A., Didyk A. Yu., Semina V. K.

P14-2002-267

Aluminium Surface Structure Changes under Desorption of Implanted Xenon, Krypton and Other Gases

The aluminium specimens were irradiated with 245 MeV  $^{84}\text{Kr}$  ions up to a fluence of  $10^{14}$  ion/cm<sup>2</sup> under various incidence angles (from 0 to 75°) and with 124 MeV  $^{129}\text{Xe}$  ions up to a fluence of  $10^{15}$  ion/cm<sup>2</sup> normally to the sample surface. The surface structure changes of as-irradiated with  $^{84}\text{Kr}$  ions and annealed at 250, 400 and 600 °C after  $^{129}\text{Xe}$  irradiation Al samples were studied with a transmission and scanning electron microscope. It was found that the various changes of the Xe-implanted aluminium surface structure occur during annealing. No surface structure changes were observed after 250 °C annealing. The small pits appeared along the subgrain boundaries after 480 °C annealing and the microcracks, small pits, bubbles, blisters, cleavages, porous structure and flakes after 600 °C annealing were observed. The aluminium surface cracks occur at ion incidence angle increase for  $^{84}\text{Kr}$  ion irradiation, i.e. with decreasing distances between the implanted krypton ion layer position and the sample surface. The temperature effect on the xenon mobility and bubble formation as well as on microcracking is discussed.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2002

Редактор *М. И. Зарубина*  
Макет *Н. А. Киселевой*

Подписано в печать 20.12.2002.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,12. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 280 экз. Заказ № 53675.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@pds.jinr.ru](mailto:publish@pds.jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)