

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ НА МАТЕРИАЛ ОБОЛОЧЕК ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ РЕАКТОРОВ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

*А. Хофман<sup>1,2</sup>, А. Ю. Дидык<sup>2</sup>, В.К. Семина<sup>2</sup>, В. Штеке<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Институт атомной энергии, г. Свек, Республика Польша;*

<sup>2</sup>*Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна Московской области, Россия*

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°C и ионами  $^{84}\text{Kr}$  непосредственно после облучения. Обнаружено, что при отжиге происходят различные изменения структуры поверхности имплантированного алюминия. При температуре отжига 250°C не наблюдается каких-либо структурных изменений поверхности. При 480°C появились маленькие ямки вдоль границ субзерен, а при 600°C 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.

## 1. 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 предме-

том 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.

**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)
$\text{UO}_2$ , $\rho=10,95$	$6,60\pm 0,6$	$8,56\pm 0,6$
$\text{UAl}_4$ , $\rho=5,97$	$10,1\pm 0,6$	$13,0\pm 0,5$
$\text{Al}$ , $\rho=2,702$	$12,3\pm 0,6$	$15,9\pm 0,4$
$\text{Zr}$ , $\rho=6,49$	$7,6\pm 0,6$	$10,0\pm 0,5$

Заметим, что осколки деления представляют собой поток высокоэнергетических продуктов с плотностью  $5 \cdot 10^9$  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  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ , 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  $^{129}\text{Xe}$  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, а также атомной силовой микроскопии (АСМ).

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве материала для исследования 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.

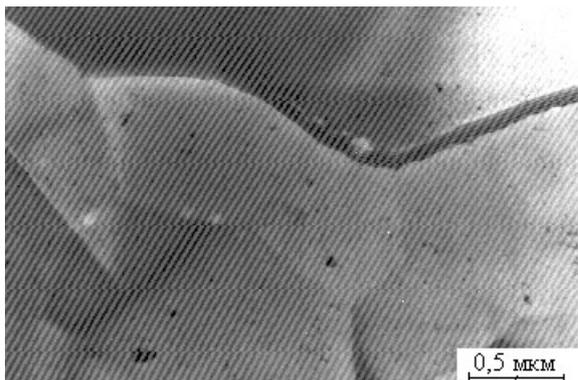


Рис. 1. Микроструктура Al в исходном состоянии (после отжига при  $480^\circ\text{C}$ , 8 ч)

Отожженные образцы облучались ионами инертных газов. Облучение образцов ионами  $^{129}\text{Xe}$  с энергией  $E=124$  МэВ перпендикулярно плоскости их поверхности до флюенса  $10^{15}$  ион/см $^2$  с плотностью потока ионов, не превышающей  $2,5 \cdot 10^{11}$  ион/см $^2$ ·с, выполнялось при температуре, близкой к комнатной. Облучение ионами  $^{84}\text{Kr}$  с энергией  $E=245$  МэВ до флюенсов  $10^{14}$  и  $1,3 \cdot 10^{15}$  ион/см $^2$  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 $^2$  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 ионами  $^{84}\text{Kr}$  до флюенса  $10^{14}$  ион/см $^2$  выполнялось облучение образцов под углом

$\alpha=45, 60$  и  $75^\circ$  к их поверхности. Применение такой схемы облучения позволило нам варьировать глубину залегания слоя ионного легирования и уровень повреждения в пике смещения. Фактический флюенс облучения для этих образцов составлял  $F \times t = 10^{14} \times \cos \alpha$  ион/см $^2$ , т.е.  $0,7 \cdot 10^{14}$ ,  $0,5 \cdot 10^{14}$  и  $0,26 \cdot 10^{14}$  ион/см $^2$  для углов  $\alpha=45, 60$  и  $75^\circ$  соответственно.

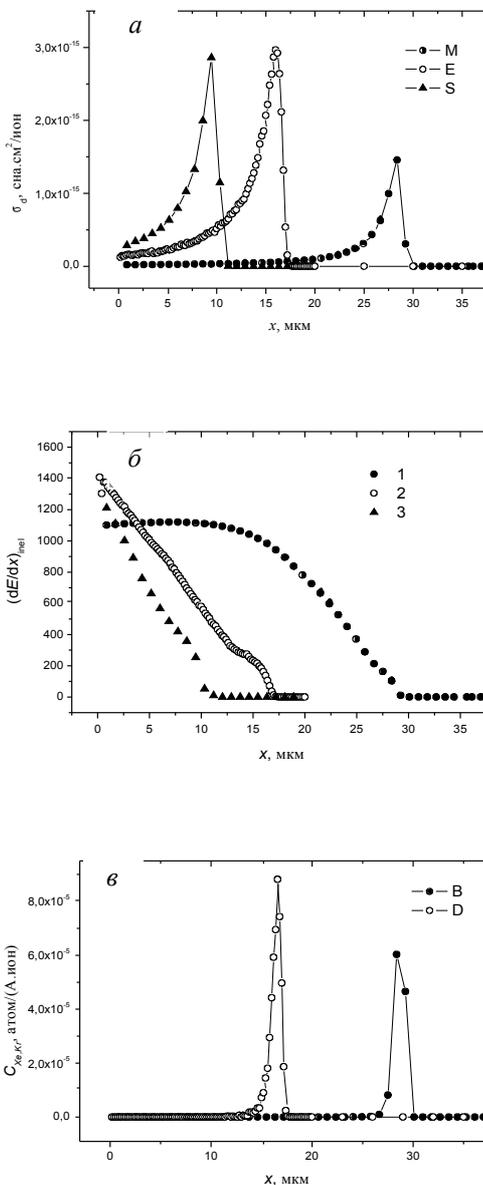


Рис. 2. Профили сечения дефектообразования: а – энергетических потерь энергии; б – ионов криптона с энергией 245 МэВ (1), ионов ксенона с энергией 145 МэВ (2) и осколков деления массой 140 а.е.м. и энергией 70 МэВ (3); в – профили легирования ионами ксенона и криптона, рассчитанные по программе TRIM-2000,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

Исследования влияния облучения на поверхность алюминия были выполнены на сканирующих

электронных микроскопах JSM-840 и DSM-942 (Институт ядерной химии и техники, г. 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 (см. рис. 3,в,г), хотя при нормальном облучении (см. рис. 3,б) 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  $Al_2O_3$ , довольно значительны.

На рис. 4 приведены 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; это связано с распылением поверхности. Перепад высот рельефа между темными и светлыми тонами для исходного (см. рис. 4,а) и облученного (см. рис. 4,б) 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

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

где  $N_{Al}=6,03 \cdot 10^{22}$  ат./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

$$\text{меньше [8]: } K_{ex}^{(оск)} \sim K_{ex}^{(Bi)} \cdot \left( \frac{S_{ex}^{оск}}{S_{ex}^{Bi}} \right)^2 = 1,3 \cdot 10^3 \text{ ат./оско-}$$

лок.

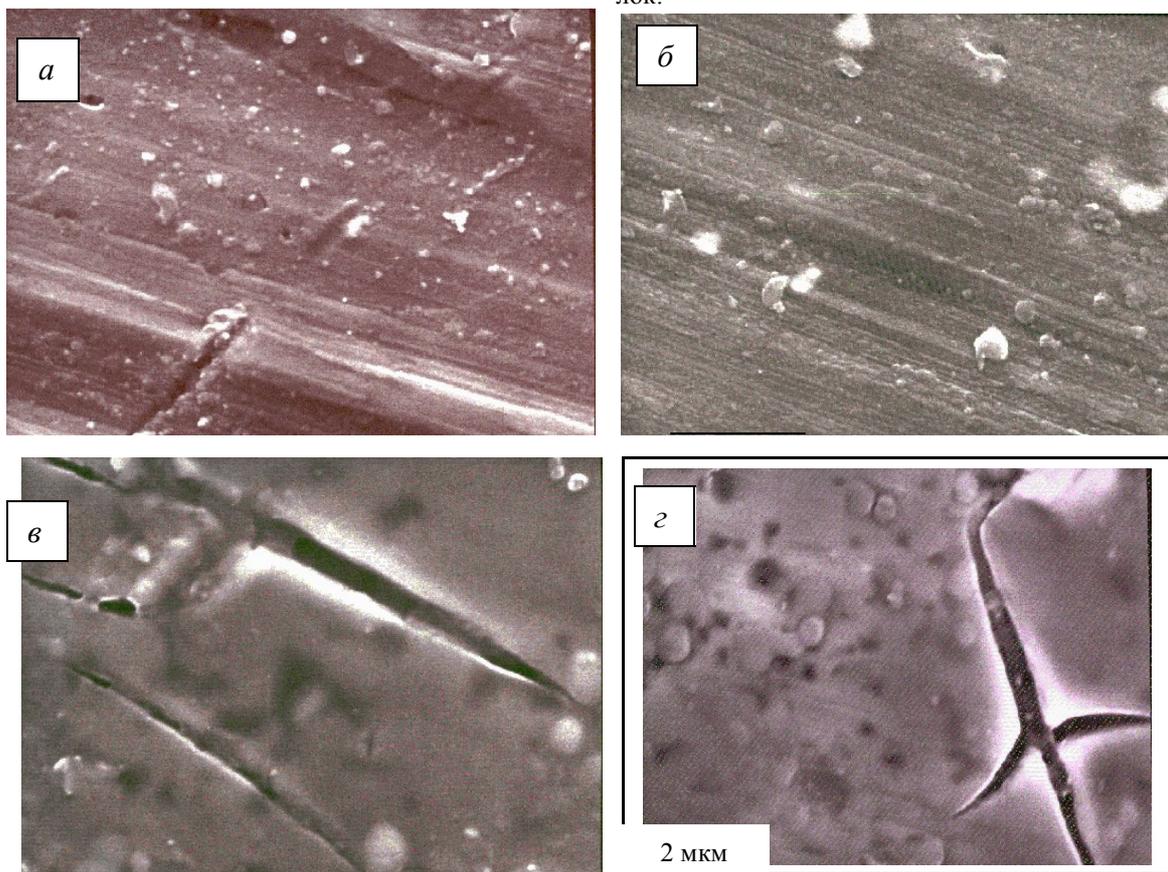
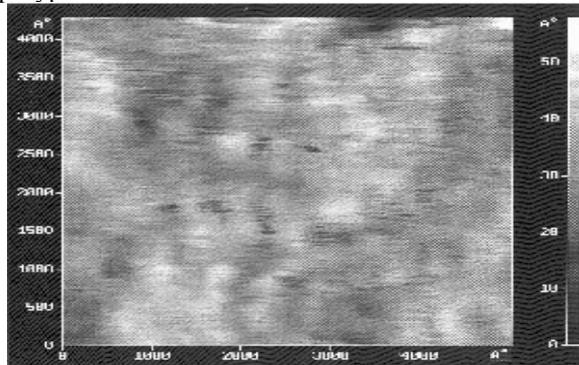


Рис. 3. Структура поверхности алюминия в исходном состоянии (а) и после облучения ионами  $^{84}Kr$  с энергией 245 МэВ флюенсом  $10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> при комнатной температуре и углах наклона  $\alpha=0^\circ$  (б) и  $75^\circ$  (в, г)

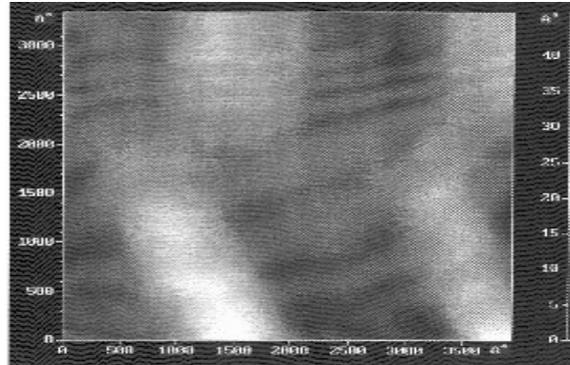
Поверхность образцов, облученных ионами ксенона флюенсом  $10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>, практически не отличалась от исходной, как в случае облучения ионами криптона. Для исследования газовой десорбции и

подвижности газовых пузырьков, а также эволюции структуры поверхности образцы, облученные ионами ксенона, были отожжены при температурах 250, 480 и 600°C в течение 15 мин. Для определения диа-

метра 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  $-20^{\circ}\text{C}$ .



*a*



*б*

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

После отжига при температуре  $480^{\circ}\text{C}$  (рис. 5) наблюдаются в достаточном количестве более глубокие ямки (диаметром  $\sim 0,8$  мкм), «пузырьковые» кратеры и чешуйки, а также микротрещины.

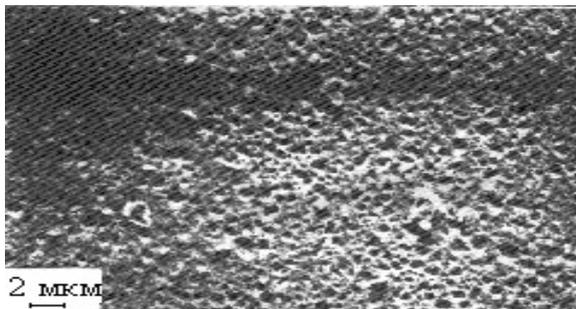


Рис. 5. Структура поверхности алюминия, облученного ионами  $^{129}\text{Xe}$  ( $E=124$  МэВ) до дозы  $1,3 \cdot 10^{15}$  ион/см $^2$ , после отжига при  $480^{\circ}\text{C}$  15 мин

Это свидетельствует о том, что происходит скопление газов под поверхностью 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  $6 \cdot 10^5$  см $^{-2}$ . Большая часть поверхности имеет губчатую структуру.

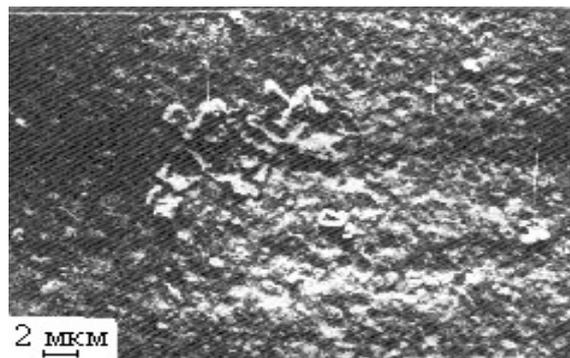


Рис. 6. Структура поверхности алюминия, облученного ионами  $^{129}\text{Xe}$  ( $E=124$  МэВ) до дозы  $1,3 \cdot 10^{15}$  ион/см $^2$ , после отжига при  $600^{\circ}\text{C}$  15 мин

После отжига при  $600^{\circ}\text{C}$  вся поверхность оказалась покрытой губчатой структурой и «пузырьковыми» кратерами (рис. 6). Количество пузырьков в губчатой структуре и в кратере равно соответственно  $6 \cdot 10^{11}$  и  $4 \cdot 10^{11}$  см $^{-2}$ , а диаметр 5,5 и 6 нм.

Из полученных результатов следует, что при температурах ниже  $250^{\circ}\text{C}$  не происходит видимых структурных изменений поверхности Al, имплантированного ксеноном, за исключением образования 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 они сохраняются даже после отжига при 550°C.

Согласно данным работы [16], давление, требуемое для возникновения трещины, возрастает с уменьшением плотности пузырьков, вокруг которых возникает значительные деформации. Электронно-микроскопические исследования после отжига при 550°C показали, что средний диаметр пузырьков равен 6,7 нм (рис. 8), а количество пузырьков составляет примерно  $7,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  [16]. Этот диаметр пузырьков в 4 раза больше, а их количество в 8 раз меньше, чем при комнатной температуре (соответственно 1,6 нм и  $5,9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ) (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  $1,3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ .

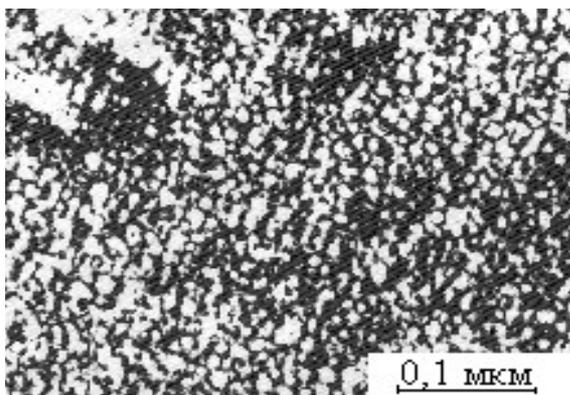


Рис. 7. Микроструктура алюминия, облученного ионами  $^{129}\text{Xe}$  ( $E=124 \text{ МэВ}$ ) до дозы  $1,3 \cdot 10^{15} \text{ ион/см}^2$ , при комнатной температуре (ПЭМ, темное поле)

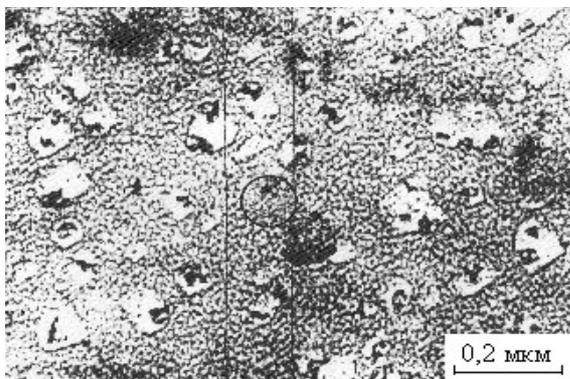


Рис. 8. Поверхность алюминия, облученного ионами  $^{129}\text{Xe}$  ( $E=124 \text{ МэВ}$ ) до дозы  $10^{16} \text{ ион/см}^2$ , после отжига при 550°C [15]

Образование микротрещин можно объяснить следующим образом. Согласно работе [11], зависимость между давлением газа  $P$  внутри пузырьков ра-

диуса  $r_b$  и средней величиной микронапряжений  $\sigma_n$  между пузырьками задается уравнением

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

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

Принимая напряжение образования трещин равным  $\sigma_n = 0,0026\mu$  (здесь  $\mu = 26,5 \text{ ГПа}$  [14] – модуль сдвига), а  $\gamma = 0,9 \text{ Дж/м}^2$  [15] и предполагая, что пузырьки распределены равномерно в приповерхностном слое толщиной  $L = 12 \text{ нм}$ , что было подтверждено стереоскопическими наблюдениями, получаем, что давление образования микротрещин равно 0,7 ГПа для простой кубической решетки пузырьков и 1,4 ГПа для произвольного расположения пузырьков [16]. Давление в пузырьках, согласно данным работы [17], при 550°C составляет 3,7 ГПа, т.е. 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 микротрещин при комнатной температуре. Это факт подтвержден анализом электронограмм [10].

Для практики длительного хранения отработанного топлива исследовательских реакторов очень важно определение температуры, выше которой на поверхности имплантированного алюминия появляются губчатая и «пузырьковая» структуры 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.

### 3. 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 твердого тела. Труды XI Межнационального совещания. Севастополь, 25-30 июня 2001 г.* М.: Изд-во НИИ ПМТ 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 твердого тела. Труды X Межнационального совещания, Севастополь, 3-8 июля 2000 г.* М.: Изд-во НИИ ПМТ МГИЭМ (ТУ), 2000, с. 42-50.

7. V.A. Skuratov, A. Illes, Z. Illes, K. Bodnar, A.Yu. Didyk, A.V. Arkhipov, K. Havancsák. 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. Кривохатский, В.В. Обнорский. Механизм распыления материалов тяжелыми 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. Yamaguchi, 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, N 5, p. 699-729.  
 15. C.T. Lynch. *Handbook of Materials Science*, CRC Press, Ohio (USA), 1974, v. 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 aluminium // *J. Nucl. Mater.* 1987, v. 149, N 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, N 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.

### МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ УЛАМКІВ ПОДІЛУ НА МАТЕРІАЛ ОБОЛОНОК ТЕПЛОВИДЛЯЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ РЕАКТОРІВ ВАЖКИМИ ІОНАМИ ВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ

*А. Хофман, А.Ю. Дідик, В.К. Сьоміна, В. Штеке*

Зразки алюмінію були опромінені іонами  $^{84}\text{Kr}$  з енергією 245 МэВ до флюенса  $10^{14}$  іон/см<sup>2</sup> під різними кутами до поверхні зразка й іонами  $^{129}\text{Xe}$  з енергією 124 МэВ до флюенса  $10^{15}$  іон/см<sup>2</sup> перпендикулярно до поверхні зразка. Методами скануючої і просвічуючої електронної мікроскопії досліджували зміни структури поверхні алюмінію, опроміненого іонами  $^{129}\text{Xe}$ , після відпалу при температурах 250, 480 і 600°C і іонами  $^{84}\text{Kr}$  безпосередньо після опромінення. Виявлено, що при відпалі відбуваються різні зміни структури поверхні імплантованого алюмінію. При температурі відпалу 250°C не спостерігається яких-небудь структурних змін поверхні. При 480°C з'явилися маленькі ямки уздовж границь субзерен, а при 600°C на імплантованій поверхні видні мікротріщини, маленькі ямки, пухирці, білістри, раковини, губчаста структура й лусочки. Після опромінення іонами  $^{84}\text{Kr}$  виявлена поява тріщин на поверхні алюмінію при збільшенні кутів опромінення, тобто при наближенні профілю залягання іонів криптону до поверхні. Обговорюється вплив температури на рухливість ксенону й формування пухирців, а також утворення мікротріщин.

## SIMULATION OF INFLUENCE OF URANIUM FISSION FRAGMENTS ON MATERIALS OF FUEL ELEMENTS OF REACTORS BY HIGH ENERGY HEAVY IONS

*A. Hofman, A.Yu. Didyk, V.K. Semina, W. Szteke*

Aluminum samples were irradiated by  $^{84}\text{Kr}$  ions with energy 245 MeV up to the fluence  $10^{14}$  ion/cm<sup>2</sup> at various angles to the sample surface and  $^{129}\text{Xe}$  ions with energy 124 MeV up to the fluence  $10^{15}$  ion/cm<sup>2</sup> perpendicular to surface. The changes of aluminum surface structure irradiated by  $^{129}\text{Xe}$  ions after annealing at temperatures 250, 480 and 600°C were studied using scanning and transmission electronic microscopy. The analogies studies were carried out at the aluminum samples directly after irradiation by  $^{84}\text{Kr}$  ions. It was shown that after annealing at various temperatures different changes take a place. Irradiated aluminum surface kept the initial structure after annealing at 250 °C. The small pits along the boundaries of sub grains were observed on the samples after annealing at 480°C. The micro cracks, small pits, bubbles, blisters, blebs, sponge structure and flaces form were detected on the irradiated aluminum surfaces after annealing at the 600°C. The creation of cracks were observed on the aluminum surface irradiated at various angles by  $^{84}\text{Kr}$  ions (without annealing), when the angles are increased. It can be explained by the changes of depth position of  $^{84}\text{Kr}$  ion profiles relatively to the surface (decreasing the distance between profile and surface). The influence of temperature on the mobility of implanted krypton ions and the bubble and crack creation is discussed.