

УДК 621.039.53:533.9

ВЛИЯНИЕ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА СТРУКТУРУ ПОВЕРХНОСТИ СПЛАВОВ ЦИРКОНИЯ

В.Г. Кириченко, О.В. Коваленко, В.Н. Леонов, С.В. Старостенко

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина

61108, г. Харьков, пр. Курчатова, 31

E-mail: kirichenko@pht.univer.kharkov.ua

Поступила в редакцию 16 мая 2011 г.

Представлены результаты исследования влияния ионного облучения на структуру поверхностных слоев сплавов циркония. Облучение приводит к образованию аморфных фаз в слое глубиной до 0,3 мкм. Обнаружено, что термический отжиг облученных фольг сплавов приводит к двухстадийному фазовому превращению, завершающемуся формированием кристаллических фаз. Полученные данные сопоставлены с известными результатами нейтронного облучения сплавов циркалой-2 и других, представленных в работе в виде 3D-диаграмм. Верификация данных для модельных и реальных сплавов позволила выделить характерные особенности поведения сплавов при имитационном и нейтронном облучении.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: радиационная стойкость, цирконий, сплавы, поверхность, ионное облучение, аморфизация, кристаллизация.

INFLUENCE OF ION IRRADIATION ON THE STRUCTURE SURFACE OF ZIRCONIUM ALLOYS

V.G. Kirichenko, O.V. Kovalenko, V.N. Leonov, S.V. Starostenko

Kharkiv National Karazin University

31 Kurchatov St., Kharkov, 61108, Ukraine.

The results of studying the influence of ion irradiation on the surface structure of the zirconium alloys layers are presented. Irradiation leads to the formation of amorphous phases in a layer of depth up to 0.3 microns. It was found that thermal annealing of the irradiated foils of alloys leads to a two-stage phase transformation, culminating in the formation of crystalline phases. The obtained data are compared with results of neutron irradiation of alloys zircalloy-2 and others, presented in the article in the form of 3D-diagrams. Data verification for model and real alloys possible to identify the characteristic features of the behavior of alloys in the simulation and neutron irradiation.

KEY WORDS: radiation stability, Zirconium, alloys, surface, ion irradiation, amorphisation, crystallization.

ВПЛИВ ІОННОГО ОПРОМІНЕННЯ НА СТРУКТУРУ ПОВЕРХНІ СПЛАВІВ ЦИРКОНІЮ

В.Г. Кіриченко, О.В. Коваленко, В.Н. Леонов, С.В. Старостенко

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

61108, Харків, пр.Курчатова, 31.

Представлені результати дослідження впливу іонного опромінення на структуру поверхневих шарів сплавів цирконію. Опромінення призводить до утворення аморфних фаз у шарі глибиною до 0,3 мкм. Виявлено, що термічний відпал опроміненних фольг сплавів призводить до двостадійного фазового перетворення, яке закінчується формуванням кристалічних фаз. Отримані дані зведені з відомими результатами нейтронного опромінення сплавів циркалой-2 та інших, представлених в роботі у вигляді 3D-діаграм. Верифікація даних для модельних та реальних сплавів дозволила виділити характерні особливості поведінки сплавів при імітаційному та нейтронному опроміненні.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: радіаційна стійкість, цирконій, сплави, поверхня, іонне опромінення, аморфізація, кристалізація.

В ядерной энергетике важна проблема модернизации конструкционных материалов для активной зоны ядерных реакторов. К конструкционным материалам ядерных реакторов принадлежат аустенитные, ферритные, ферритно-мартенситные и другие сорта сталей и сплавов, графит и углеродные материалы, циркониевые сплавы, различные керамические материалы. Цирконий, обладающий низкими коэффициентами поглощения тепловых нейтронов, а также удачным сочетанием других ядерных и физических характеристик и механических свойств, представляет собой наиболее востребованный в ядерной энергетике конструкционный материал. Существует проблема повышения радиационной стойкости циркониевых сплавов для ядерных реакторов нового поколения [1-4]. Ядерно-физические методы микроскопического исследования твердых тел широко используются для всестороннего изучения циркониевых сплавов, аустенитных и ферритных сталей, неорганических соединений. Мессбауэровская спектроскопия позволяет информативно исследовать электронную и спиновую структуру, локальное атомное окружение ядер зондов (Fe^{57} , Sn^{119} , J^{129} и др.) в металлах, сплавах, интерметаллических соединениях [5]. Применение мессбауэровской спектроскопии в изучении циркония и его сплавов с добавками Fe^{57} и Sn^{119} способствовало получению новых данных о структуре и фазовом составе интерметаллических фаз, фазовых превращениях и сегрегационных процессах в сложнолегированных сплавах при комплексной термомеханической обработке, электронном, и лазерном облучении, коррозии и наводораживании.

Целью настоящей работы является изучение структуры интерметаллических фаз при облучении и исследование последовательности фазовых превращений в приповерхностных слоях облученных циркониевых сплавов при последующем термическом отжиге.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование включений интерметаллических фаз в цирконии, содержащем в целом до 1-2% легирующих элементов, такими традиционными методами фазового анализа, как рентгено- и электронография, затруднено из-за их недостаточной чувствительности в этой области концентраций. Представляющими интерес добавками в циркониевых сплавах являются олово и железо. Поэтому вследствие высокой чувствительности мессбауэровской спектроскопии на ядрах Fe^{57} и Sn^{119} этот метод можно использовать для решения перечисленных выше задач исследования олово- и железосодержащих циркониевых сплавов. Для проведения исследования были изготовлены сплавы: Zr-0,31%Fe; Zr-0,63%Fe; Zr-0,31%Fe-M (M=1%Sn; 0,28V; 0,3%Cr; 0,3-0,5%Mo; 0,5-2,5%Nb; 1%Ta; 0,3%Cu) и Zr-0,5%Fe-0,5%Sn-1%Nb). Методика их приготовления описана в [6]. Добавки железа обогащены стабильным изотопом Fe^{57} . Перед облучением деформированные фольги отжигали в вакууме $1,3 \cdot 10^4$ Па. Облучение ионами Fe^{4+} с энергией $E = 600$ кэВ флюенсом $\Phi = 2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$ проводили на ускорителе тяжелых ионов. После облучения проводили изохронный отжиг в диапазоне 370-970 К. Использовалась мессбауэровская спектроскопия на ядрах ^{57}Fe и ^{119}Sn , как в геометрии поглощения γ -квантов, так и в геометрии обратного рассеяния с регистрацией электронов внутренней конверсии (МСКЭ). В последнем случае регистрировались электроны внутренней конверсии, испускаемые при резонансном рассеянии мессбауэровских γ -квантов. Для регистрации электронов конверсии применялся газоразрядный проточный детектор со смесью He-5%CH₄. Использовались источники резонансных γ -квантов Co^{57} в Cr и $CaSn^{119m}O_3$. Рентгенографическое исследование сплавов проводили на установке ДРОН-3,0 в $Cu-k_\alpha$ -излучении. Рентгеноспектральный анализ поверхности отожженных образцов сплавов циркония производили на спектрометре "СamebaX MBX 268". Получены распределения ряда легирующих добавок и O, N, C по сечению интерметаллидов в поверхностном слое. Идентификацию фаз производили методом МСКЭ. Мессбауэровские спектры обратного рассеяния описывают распределение интерметаллических фаз в приповерхностных слоях, и увеличение интенсивности спектров соответствует росту концентрации интерметаллических фаз в поверхностном слое глубиной до 0,3 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены результаты рентгеноспектрального анализа поверхности отожженного образца сплава Zr-0,63%Fe для обнаруженного на поверхности сплава интерметаллического включения, которые свидетельствуют о возможности прямого наблюдения распределения циркония и железа, соотношение которых в интерметаллическом включении примерно соответствует составу фазы Zr_3Fe .

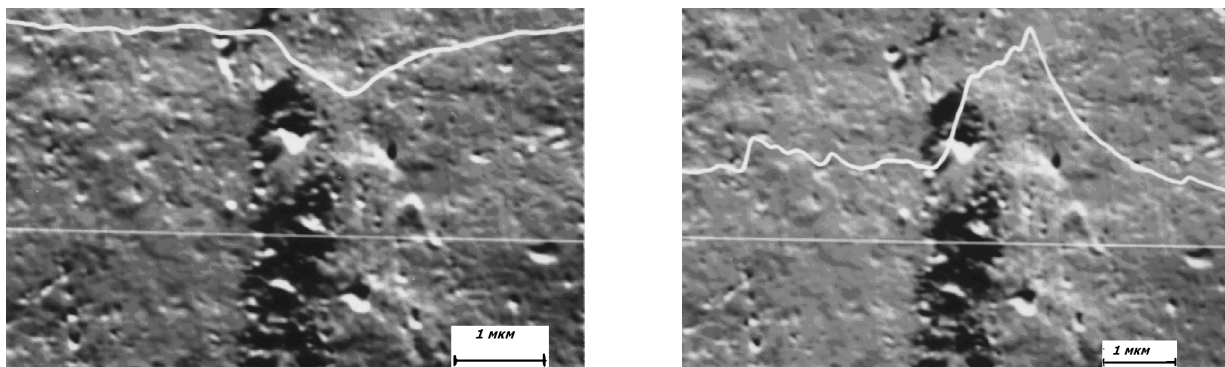


Рис.1. Микрофотографии интерметаллического включения на поверхности сплава Zr-1,03%Fe после отжига при 1070 К в течение 5 ч. Слева - распределение Zr по линии сканирования по поперечному сечению включения; справа – распределение Fe по линии сканирования по поперечному сечению включения

Фаза Zr_3Fe однозначно идентифицирована с помощью мессбауэровской спектроскопии в геометрии обратного рассеяния (рис. 2). Термическая обработка позволяет достигать концентрации атомов-информаторов Fe от 2 до 6,5% в приповерхностном слое по сравнению с 0,3-0,6% в исходном состоянии.

На рис. 2, 3 приведены мессбауэровские спектры необлученной и облученной сторон фольги сплава Zr-Fe.

Облучение ионами Fe^{4+} при $T=300$ К дозой $2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$ сплавов Zr-0,51%Fe, Zr-1,03%Fe приводит к значительному изменению фазового состава интерметаллидов в приповерхностном слое сплавов.

Ионное облучение сплава привело к аморфизации интерметаллической фазы Zr_3Fe и переходу атомов Fe в метастабильную фазу Zr_7Fe_{24} . Изохронный отжиг приводит к обратному превращению – распаду аморфной фазы через формирование на промежуточном этапе в диапазоне температур отжига 720-820 К метастабильной фазы $m-Zr_3Fe$ и переходу атомов Fe в кристаллическую фазу Zr_3Fe со структурой типа Re_3B .

Зависимость суммарного относительного содержания аморфной фазы и метастабильной фазы $m-Zr_3Fe$ от температуры отжига сплава Zr-0,63%Fe приведена на рис. 4. Наибольшая доля этих фаз наблюдается при температурах 650-700 К. Далее, при увеличении температуры отжига эта доля резко уменьшается, что связано с ростом кристаллической фазы. На рис. 5 представлена зависимость растущей кристаллической фазы от температуры отжига.

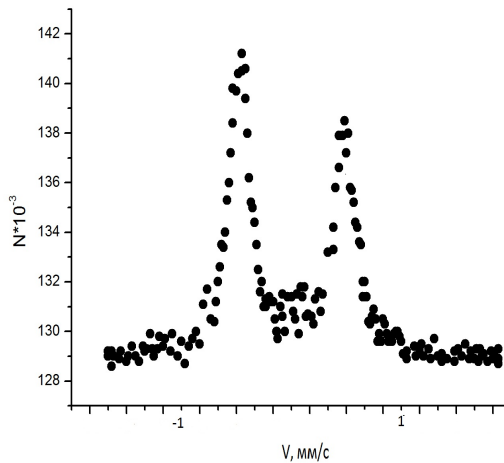


Рис. 2. МСКЭ спектр необлученной стороны фольги сплава Zr-1,03ат%Fe после отжига 970 К, 1 ч

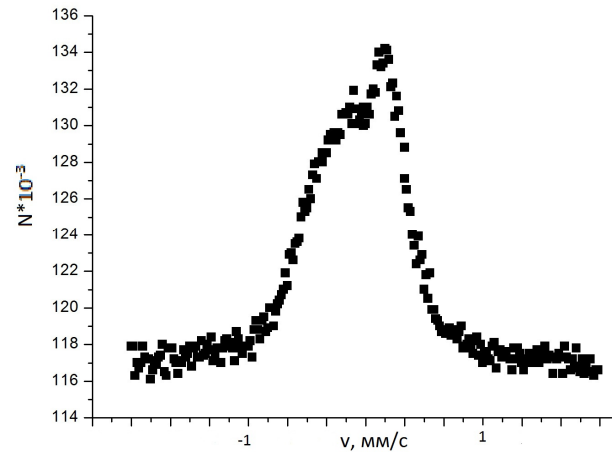


Рис.3. МСКЭ спектр облученной стороны фольги сплава Zr-1,03ат%Fe

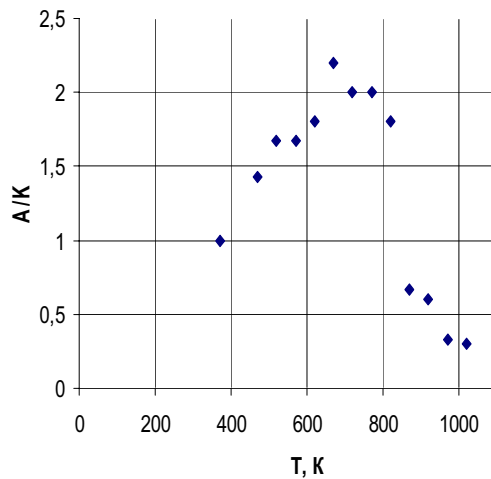


Рис.4. Зависимость содержания аморфной и метастабильной фазы А относительно кристаллической фазы К от Т отжига

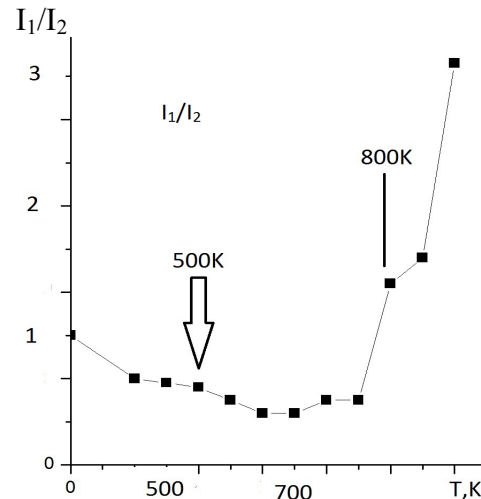


Рис. 5. Зависимость доли кристаллической фазы на облученной стороне фольги сплава Zr-Fe от температуры отжига

На рис. 5 стрелкой отмечена температура 500 К, соответствующая началу перехода атомов железа из распадающейся аморфной фазы в метастабильную фазу $m\text{-Zr}_3\text{Fe}$ и вертикальной линией – температура 800 К, соответствующая началу перехода атомов железа в формирующуюся кристаллическую фазу Zr_3Fe . Получено значение энергии активации процесса перехода атомов железа из метастабильной в кристаллическую фазу Zr_3Fe при изохронном отжиге в диапазоне 770-970 К, равное $(1,2 \pm 0,2)$ эВ. Это значение с точностью до ошибки эксперимента совпадает с энергией активации, характерной для миграции железа в циркониевых сплавах по межфазным и межзеренным границам. Процесс кристаллизации характеризуется образованием зародышей, растущих до включений с размерами 10-120 нм.

Таким образом, становится возможным регулирование как относительного содержания интерметаллических нанокристаллических фаз в поверхностных слоях сплавов (толщиной до 3000 Å) за счет проведения предварительной термомеханической обработки, так и степени кристалличности этих фаз за счет ионного облучения и последующего изохронного отжига. На рис. 6, 7 представлены результаты расчетов с помощью программы SRIM-2006 профилей распределения атомов железа, а также введенных дефектов в цирконий.

Полученные подобным образом расчетные профили распределения имплантированных атомов Fe и образовавшихся дефектов для сплава несколько отличаются от чистого циркония, что обусловлено сегрегацией интерметаллидов в данном сплаве в приповерхностном слое [6]. Профили концентрации имплантированных ионов железа, как и профили повреждений находятся ближе к поверхности образца сплава, чем для чистого циркония. Уровень радиационных повреждений (смещений на атом - сна) $D = \Phi \times \sigma_d \times t$, где Φ – плотность потока ионов; σ_d – поперечное сечение; t – время облучения. При миграции вакансий в материалах появляются поры, стимулирующие диффузионные процессы и снижающие эксплуатационные параметры сплавов. Одним из воз-

можных путей снижения подвижности вакансий и уменьшения порообразования является ослабление дальнего порядка, что становится возможным при аморфизации интерметаллических фаз, объемная доля которых в поверхностном слое может достигать 10-12 %.

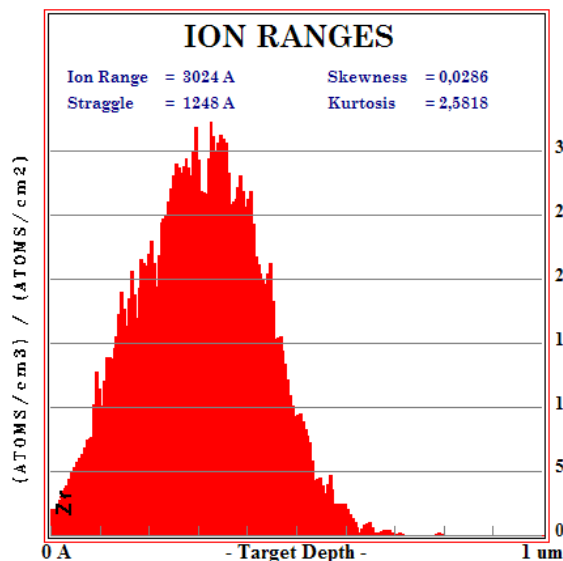


Рис. 6. Расчетный профиль концентрации атомов железа в поверхностном слое циркония.

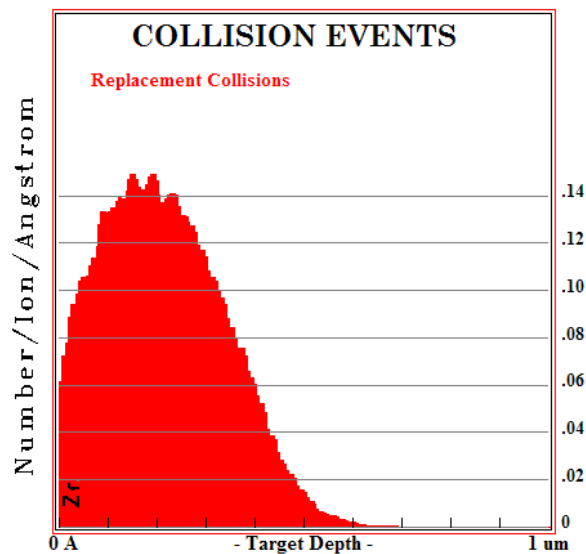


Рис. 7. Профиль повреждений в поверхностном слое циркония после облучения ионами железа.

Другой важной проблемой является собственно аморфизация сплавов и интерметаллидов под влиянием облучения, особенно при облучении тяжелыми ионами тонкого (до 3000 Å) поверхностного слоя. При последующем обжиге образовавшегося аморфного состояния сплавов формируются метастабильные и кристаллические фазы, при этом температуры кристаллизации и энтропия активации кристаллизации зависит от состава сплава [7]. В случае двойных сплавов Zr-Fe облучение приводит к аморфизации интерметаллических включений. Наименьшее воздействие ионное облучение оказывает на фазовый состав интерметаллидов в четверном сплаве Zr-0,5%Fe-0,5%Sn-1%Nb.

При получении и трактовке экспериментальных данных по структуре и фазовому составу циркониевых сплавов необходимо учитывать следующее:

- малую растворимость большинства металлических легирующих и большую растворимость технологических добавок в α -Zr.
- достаточно большую растворимость ряда металлов в β -области диаграмм состояния Zr-M
- необходимость учитывать роль α -стабилизаторов и β -стабилизаторов при легировании циркония
- наличие в составе наноразмерных включений, интерметаллических фаз двух, по крайней мере, фаз с разной кристаллической структурой. Так, например, в сплавах Zr-Fe-Nb (концентрация Fe составляла 0,51at%, Nb-0,5; 1,0; 2,5at%) как было показано нами ранее [5] в α -области формируются фазы типа $(Zr_{1-x}Nb_x)Fe_2$ (фаза 1) и $(Zr_{1-x}Nb_x)_2Fe$ (фаза 2). При увеличении концентрации Nb относительная доля фазы 1 уменьшается, при этом не наблюдается перехода атомов Fe в твердый раствор (ввиду ограниченной растворимости) или в выделения β -Nb (ввиду их малой концентрации в α -области). Термический отжиг приводит также к перераспределению фаз в интерметаллических включениях (распаду фазы 1 и росту фазы 2), миграции интерметаллических фаз с последующим выходом на поверхность образца сплава в виде пластин толщиной 0,05-1 мм. В приближении Аррениуса для процесса поверхностной сегрегации получены значения эффективной энергии активации, оказавшиеся близкими для исследованных сплавов (0,5-0,7 эВ). Такие значения энергии активации характерны для процессов, обусловленных миграцией границ зерен в поликристаллических материалах и диффузией атомов примесей по межфазным границам и свободной поверхности. Спектры МСКЭ на ядрах ^{119}Sn для оловосодержащих сплавов циркония представлены одиночными линиями, соответствующими позициям замещения циркония атомами олова, причем ТМО существенно не влияет на локальное окружение олова в исследованных сплавах. Это свидетельствует об отсутствии сегрегации примеси олова вследствие нахождения атомов олова в твердом растворе на основе циркония.

Полученные в [8-10] результаты в виде 2D-графиков для цирколия-2 представлены нами в виде 3D-диаграмм (рис. 8, 9). С помощью «SPLAIN» можно интерполировать полученные экспериментальные результаты в 3-х координатном базисе: «степень холодной деформации образцов - η » - «смещения на атом - D» - «деформация при облучении (DPP) - δ ».

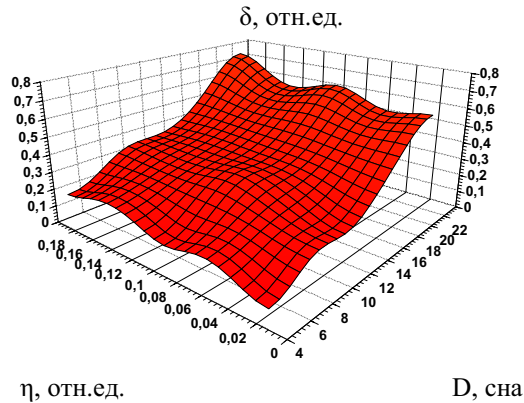


Рис. 8. 3D-диаграмма для циркалоя-2

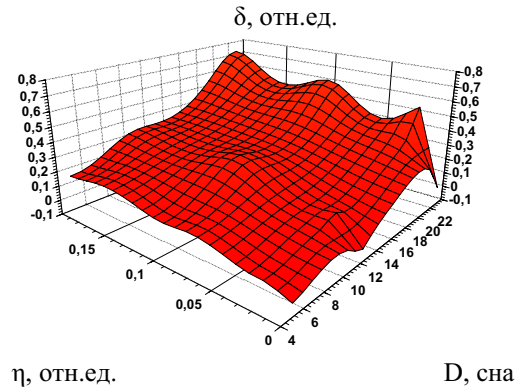


Рис. 9. 3D-диаграмма для циркалоя-2 с учетом закаленных образцов

Эти результаты для трех степеней предварительной холодной деформации образцов 2% (0,02) ХД, 10% (0,1) ХД и 20% (0,2) ХД, соответствующих величин смещений (сна) и относительного удлинения образцов при облучении представлены на рис. 8. Видно, что в диапазоне до 23 сна деформация при облучении ведет себя немонотонно, тогда как при анализе двухмерных графиков эта немонотонность не отмечалась. Немонотонность поведения деформации радиационного роста увеличивается при включении в интерполяционную схему экспериментальных данных для закаленных образцов (рис. 9). Возможно, немонотонность обусловлена недостаточно полным набором данных и суженным диапазоном входных параметров. Для определения причин такого немонотонного поведения деформации радиационного роста в диапазоне до 23 сна и до 20% ХД заменим входные параметры интерполяционной схемы следующим образом: выберем экспериментальные данные для расширенного диапазона степени холодной деформации (до 80% ХД) [10]. Полученная для таких экспериментальных данных диаграмма представлена на рис. 10.

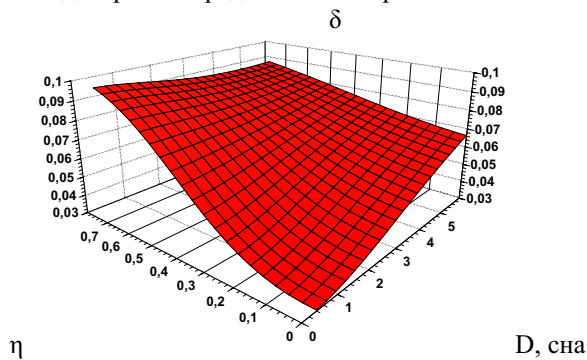
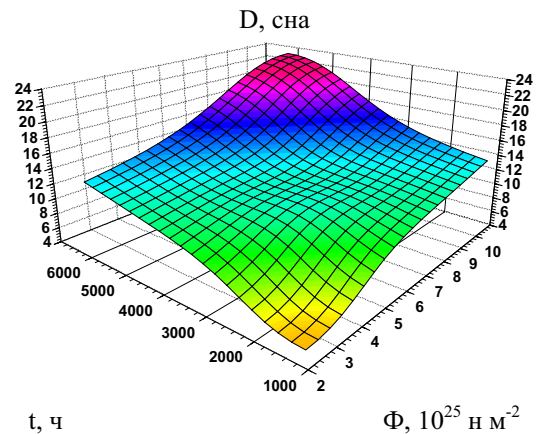
Рис. 10. 3D-диаграмма для циркалоя-2 для суженного диапазона доз и расширенного диапазона степеней ХД. δ , η - в относительных единицах.

Рис. 11. Расширенная 3D-диаграмма в сплавах циркония в условиях влияния нейтронно-температурного поля в активной зоне ядерного реактора

Анализируя эту диаграмму можно сделать вывод, что при низких значениях сна (до 6) не наблюдается немонотонного увеличения деформаций радиационного роста (ДРР) в зависимости, как от дозы, так и от степени холодной деформации. Однако, несмотря на монотонность поверхности 3D-диаграммы можно отметить следующее: значение деформации радиационного роста достигает более высоких значений при деформации 78% ХД, чем при больших значениях смещений, но меньших значениях деформации ХД. Таким образом, можно допустить, что за немонотонность поведения ДРР ответственны условия облучения и диапазон изменения смещений на атом, а за величину ДРР ответственно значение холодной деформации циркониевых сплавов. Так, нейтронное облучение ($E > 1$ МэВ) сплавов Zircaloy-2 (Zr-1,3%Sn-0,17%Fe-0,1%Cr-0,07%Ni) при температуре 315-325 °С в реакторных ячейках в зависимости от времени полного облучения и нейтронного потока приводит к следующим значениям смещений на атом (до 23 сна). Полученная нами на основе параметров облучения с помощью программы 3D-диаграмма представляет картину внутриреакторного облучения. Обычно, такая картина представляет собой исходное и меняющееся во времени состояние нейтронного поля в активной зоне реактора (рис. 11). Представленные на 3D-диаграмме данные, где по оси z показаны результирующие значения смещений на атом, характеризующие состояние данных образцов сплавов в процессе облучения, дают возможность судить о процессе изменения радиационной стойкости. Этот процесс также характеризуется немонотонностью поведения диаграммы. Об этом свидетельствует наличие широкого плато значений смещений на атом в

области времен t от 4000 ч до 6000 ч и флюенсов Φ от значений $2 \cdot 10^{25}$ н·м⁻² и до $11 \cdot 10^{25}$ н·м⁻². При дальнейшем увеличении диапазона параметров облучения – расширении временных и потоковых диапазонов (рис.11) – на диаграмме четко наблюдаются три характерных зоны изменения значений смещений при симбатной смене времени облучения и нейтронного потока: первая зона от нулевых значений параметров до значений 3500 ч и $6 \cdot 10^{25}$ н·м⁻², вторая от 4000 до 6000 ч и от 6 до $9 \cdot 10^{25}$ н·м⁻² и третья отличается повышенным ростом значений смещений выше этих значений параметров облучения.

Эти эффекты можно связать с двумя факторами: повышением жесткости нейтронного спектра при увеличении степени выгорания топлива и трансмутационными эффектами, которые приводят к появлению элементов с повышенным сечением поглощения тепловых нейтронов [11, 12]. При трансмутации циркониевых сплавов трансформация материала на межфазной поверхности металл-оксид включает увеличение или уменьшение объема. Необходимо рассмотреть и оценить эффекты влияния химического состава, сравнить условия эксплуатации ВВЭР и модельные тесты, оценить расхождение между этими данными.

Полученные нами экспериментальные данные на модельных циркониевых сплавах по обогащению поверхности атомами железа в составе интерметаллических фаз типа Zr_3Fe коррелируют с данными по повышению концентрации железа вблизи поверхности сплава в условиях эксплуатации. Это можно проиллюстрировать 3D-диаграммой изменения спектров рассеяния облученной ионами поверхности сплавов циркония в зависимости от температуры изохронного отжига (рис. 12).

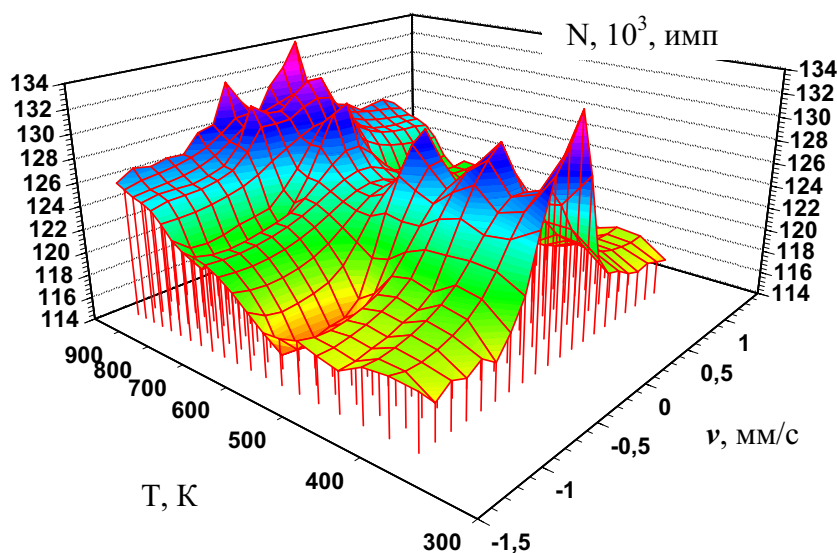


Рис. 12. 3D-спектральная диаграмма, иллюстрирующая изменение спектров рассеяния при изохронном отжиге

3D-спектральная диаграмма отражает в грубом приближении происходящие in-situ изменения фазового состава интерметаллических фаз в поверхностных слоях циркониевых сплавов.

В нашем случае процессы образования после облучения аморфных фаз и формирование в процессе отжига метастабильных фаз с переходом их в кристаллическую форму отражают существующие в динамическом режиме эксплуатации сплавов циркония (нейтронное облучение плюс постоянный отжиг при нижней границе температуры 350 °С) непрерывные превращения из кристаллической в аморфную фазу и наоборот. Возможно, что ход этих превращений зависит и одновременно влияет на зависимость ДРП от смещений на атом. Возможно, этими причинами обусловлено наличие широкого плато на 3D-диаграмме (рис. 11).

ВЫВОДЫ

В результате ионного облучения поверхности модельных циркониевых сплавов формируются аморфные и метастабильные фазы, которые при последующем изохронном отжиге кристаллизуются в исходную фазу Zr_3Fe . Процесс формирования кристаллической фазы проходит в две стадии и контролируется движением межфазных и межзеренных границ. Проведенная 3D-интерполяция, полученных ранее другими авторами экспериментальных данных по нейтронному облучению, сопоставлена с данными по ионному облучению модельных циркониевых сплавов. Процессы образования аморфных фаз и формирование при отжиге метастабильных и кристаллических фаз отражают существующие режимы эксплуатации сплавов циркония, превращения из кристаллической в аморфную фазу и наоборот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Voevodin V.N. Konstrukcionnye materialy jadernoj energetiki - vyzov 21 veka // VANT. Serija FRP i RM. - 2007. - № 2 (90). - S. 10-22.
2. Nekljudov I.M., Voevodin V.N. Sovremennye zadachi radiacionnogo materialovedenija i «renessans» eksperimentov na us-

- koriteljah zarjazhennyh chastic: trudy XIX Mezhdunarodnoj konferencii po fizike radiacionnyh javlenij i ra-diacionnomu materialovedeniju // 6-11 sentjabrja, 2010g., Alushta, Krym, Har'kov, 2010g. - S. 5-6.
3. Eifert H.J., Elsher B., Buschow K.H.J. Electronic properties of amorphous Zr_xT_{1-x} alloys (T=Cu, Ni, Pd, Pt, Co, Rh) // Physical Review B. - 1984. - Vol. 29, №. 6. - P.2905-2911.
 4. Akebi M. Technical Aspects/Effects at Early Days of Nuclear Development-Birth of Zirconium Alloys and Channel Type Reactors // Nuclear Safety Research Association. - Kharkov, Nov. 2003. -16 p.
 5. Chekin V.V., Kirichenko V.G., Reznichenko Je.A. Sverhtonkie vzaimodejstvija i radiacionnye povrezhdenija v metallah. - Kiev: Viwa shkola, 1986. - 136s.
 6. Kirichenko V.G., Kirdin A.I. Jaderno-fizicheskoe metallovedenie splavov cirkonija // Visnik Harkivs'kogo nacional'nogo universiteta. Ser. fizichna "Jadra, chastinki, polja". - 2008. - №. 823. - Vyp. 3/39/. - C.25-45.
 7. A.S. SSSR, №.1253279. - 1985. Sposob podgotovki obrazcov splavov cirkonija k issledovaniju radiacionnyh povrezhdenij / Kirichenko V.G.
 8. Shikanova Ju.A., Filippov V.P., Petrov V.I., Novoselov A.E., Kobyljanskij G.P. Vlijanie na sostojanie atomov zheleza i olova, a takzhe na radiacionnyj rost model'nyh obrazcov cirkonievych splavov sostava i vida obrabotki / Tr. VI Mezhd. Ural'skogo Sem. «Radiacionnaja fizika metallov i splavov», Snezhinsk.- C.45.
 9. Kobyljanskij G.P., Novoselov A.E., Ostrovskij Z.E., Shamardin V.K. Trudy XVI Mezhdunarodnoj konferencii po fizike radiacionnyh javlenij i radiacionnomu materialovedeniju, 6-11 sentjabrja, 2004, Alushta, Krym. - S. 111.
 10. Kobyljansky G., Novoselov A., Ostrovsky Z., Obukhov A., Shishin V., Shishov V., Nikulina A., Peregud M., Mahmood S.T., White D., Lin Y-P., Dubecky M. Irradiation-induced growth strain and microstructure of recrystallized, cold-worked and quenched alloys Zry-2, NSF and E635 // 15th International Symposium on Zirconium in the Nuclear Industry, June 24-28, 2007, Sunriver Resort, Oregon, USA.
 11. Kumar A., Garner F.A. Transmutation-induced deposition profiles in halos surrounding spherical precipitates // Radiation Eff. - 1984. - Vol. 82. - P.61-72.
 12. Kirichenko V.G., Kirdin A.I. Modelirovanie jadernyh transmutacionnyh effektov i ih vlijanie na sostav intermetallidov v cirkonievych splavah // Visnik Harkivs'kogo nacional'nogo universiteta. Ser. fizichna "Jadra, chastinki, polja". - 2006. - №.744. - Vip. 3/31/. - C. 66-74.