

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА НАНОСТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО ЦИРКОНИЯ

А.Н. Довбня, В.А. Мац, В.И. Соколенко

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

E-mail: vsokol@kipt.kharkov.ua

Исследовано влияние электронного облучения на наноструктуру деформационного происхождения в чистом цирконии. Наноструктурное состояние со средним размером зерна 80 нм было получено путем прокатки при 300 К на степень 3,9. Показано, что в наноструктурированном Zr в процессе облучения реализуются возвратные процессы, сопровождающиеся увеличением степени однородности и дисперсности наноструктуры. Обоснована определяющая роль деформационных границ раздела при протекании дислокационного возврата, инициируемого потоками радиационных точечных дефектов.

ВВЕДЕНИЕ

Комплекс определенных физических свойств металлов и сплавов можно сформировать в результате механических, термических или термомеханических обработок, вызывающих направленное изменение структурного состояния. Уровень деградации этих свойств при последующих внешних воздействиях (температурно-силовых, ультразвуковых, радиационных и др.) определяется степенью устойчивости структуры. Следует отметить, что в ряде случаев наиболее резкая трансформация структуры некоторых материалов наблюдается на начальных этапах воздействий – при облучении относительно малыми дозами [1-3]; испытании на растяжение, немногим превышающее предел текучести [4]; ультразвуковой обработке в зависимости от амплитуды колебаний [5]. В указанных работах исследовались в основном материалы с предварительно созданной дефектной структурой. При этом подчеркивалось значение фактора однородности распределения дефектов и микронапряжений в кристаллической решетке, в частности, при взаимодействии решеточных и радиационно-индуцированных дефектов. Представляют научный и практический интерес исследования поведения регулярных структур, в частности нанометрического масштаба, под действием облучения. Целью настоящей работы являлось изучение влияния сравнительно небольших доз облучения электронами энергией 10 МэВ на изменение параметров наноструктурного состояния циркония, предварительно деформированного на большие степени.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследовался поликристаллический цирконий электронно-лучевой плавки, содержащий следующие примеси в массовых процентах: Hf-0,05; Fe-0,03; Ni-0,02; Al-0,005; Si-0,008; C-0,008; N-0,005; O-0,05. Деформация образцов в виде полос сечением 3×4 мм осуществлялась прокаткой при комнатной температуре. Примененный режим

дробной прокатки (степень разового обжатия не превышала 1 %) позволил достичь большой степени абсолютной деформации ($\varepsilon = 3,9$) без нарушения сплошности заготовок.

Облучение проводилось на выходе ускорителя «КУТ» пучком электронов со средним током 10 мкА и энергией 10 МэВ до дозы $D = 6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ при температуре, не превышающей 76 °С.

Структура исследовалась при помощи электронного микроскопа ЭМВ-100БР на просвет при ускоряющем напряжении 100 кэВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Структурные исследования показали, что при последовательном увеличении степени обжатия в процессе прокатки циркония происходит интенсивное дефектонакопление, коллективное взаимодействие дислокаций, смена мод пластического течения с развитием дисклинационных механизмов образования фрагментированного, в итоге, наноструктурированного состояния кристаллической решетки со средним размером субзерен $\langle d \rangle = 82 \text{ нм}$. Сформировавшаяся наноструктура характеризуется достаточно высокой объемной концентрацией границ различной мощности $C_v^{\text{гп}} = 4,3 \%$ и значительным уровнем упругих микронапряжений, увеличивающихся по мере приближения к границе.

В таблице приведены значения среднего размера субзерен ($\langle d \rangle$), плотности дислокаций в них (N_d), объемной концентрации границ ($C_v^{\text{гп}}$), величин микронапряжений. Из таблицы следует, что после облучения наноструктурное состояние материала сохранилось, однако изменились количественные значения структурных параметров.

Характеристика структуры	$\langle d \rangle$, нм	N_d , см^{-2}	$C_v^{\text{гп}}$, 10^{-2}	σ , МПа
Деформация	82	$3,4 \cdot 10^{10}$	4,3	1,7
Деформация + облучение	70	$1,5 \cdot 10^{10}$	5,3	1,0

Необходимо отметить, что представленные в таблице значения σ носят оценочный характер и служат, скорее, индикатором изменений упруго-напряженного состояния решетки. Напряжения определялись по искривлению отдельно стоящей дислокации, как по стреле прогиба струны. При расчетах изогнутая дислокация рассматривалась как балка, закрепленная с двух концов, и

$$\Delta = \frac{p \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad [6]$$

использовалась зависимость Δ между усилием p , действующим на балку, и стрелой ее прогиба Δ . Здесь l – хорда дислокационного сегмента; E – модуль Юнга; I – момент деформации.

Полученные результаты свидетельствуют о достаточно активном развитии возвратных процессов при электронном облучении наноструктурированного Zr. Признаки возврата отмечаются как в кристаллической, так и в граничной фазе. В теле субзерен в ~2 раза снижается плотность дислокаций, изменяется характер их распределения. Плотность деформационных границ раздела увеличилась на ~20 %.

Возвратные процессы, протекающие в процессе облучения в деформационных границах, прежде всего, следует связать с высокой скоростью восходящей диффузии радиационно-индуцированных точечных дефектов. Границы дисклинационного происхождения являются сильно искаженными областями, содержащими аморфные, квазиаморфные и дислокационные участки с высокой плотностью граничных дислокаций и дислокаций несоответствия [7]. Высокий градиент напряжений в объеме субзерен, короткие диффузные пути в границах, наличие

ненасыщенных связей определяют функцию границ как интенсивных стоков для направленных потоков комплексов типа «вакансия–примесь». Наиболее интенсивное перемещение дислокаций происходит в вершинах оборванных границ и в приграничных зонах, характеризующихся максимальной концентрацией напряжений. Микроскольжение и переползание дислокаций инициируется взаимодействием их с потоками точечных дефектов радиационного происхождения, в результате чего происходит исчезновение «хвостов» оборванных границ. Таким образом, морфологически трансформация наноструктуры сводится к уменьшению среднего размера субзерен и увеличению концентрации границ.

Кроме стимулирования точечными дефектами возвратные процессы могут быть связаны с непосредственным влиянием облучения на дислокационную систему кристалла. В частности, облучение может вызывать образование нелинейных сильно локализованных возбуждений кристаллической решетки (дискретных бризеров [8], квидонов [9]), стимулирующих отрыв дислокаций от стопоров, их локальные перемещения, что обусловит в нашем случае активизацию возвратных процессов в участках границ с высокой концентрацией напряжений. В пользу реалистичности этих эффектов свидетельствуют особенности деформационного поведения ряда металлов и сплавов (Al, Cu, Al-Mg) в условиях электронного облучения [10-11].

На рис. 1 показана наноструктура в цирконии, сформированная после деформации и в результате облучения (б).

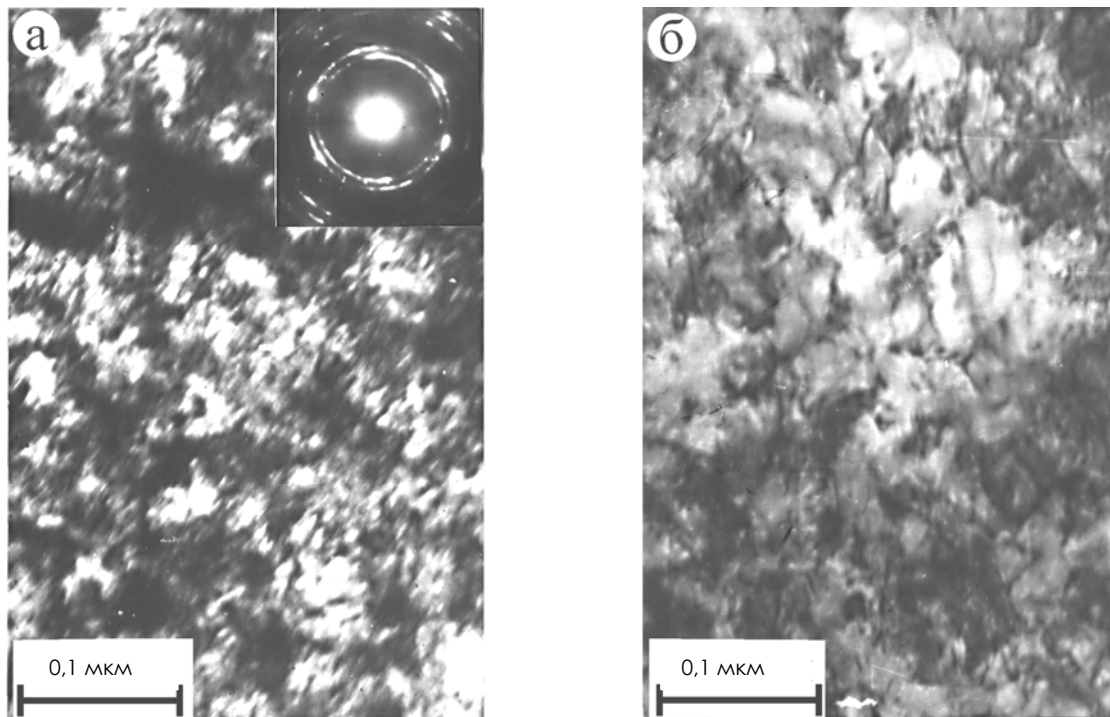


Рис. 1. Структура циркония после деформации на степень 3,9 при 300 К (а) и облучения электронами (б)

Распределение массива субзерен по размерам, по сравнению с их средними значениями, дает более полную морфологическую характеристику структуры. На рис. 2 приведены гистограммы субзерен циркония после деформации и облучения.

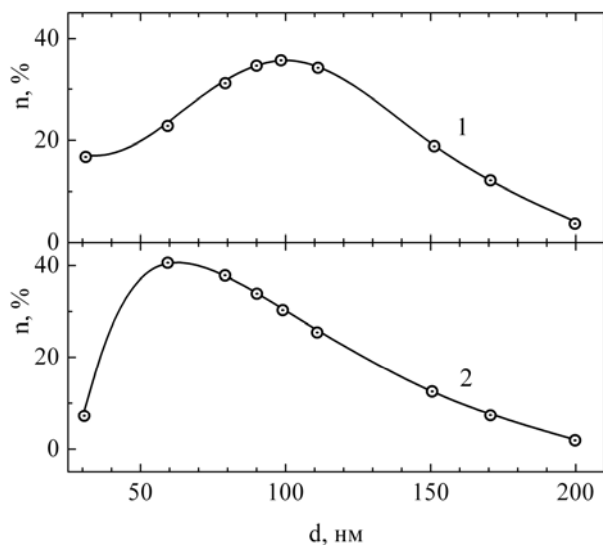


Рис. 2. Кривые распределения субзерен по размерам для деформированного циркония (1) и после его облучения (2)

Из рисунка видно, что после облучения асимметричный характер кривых сохранился, но основной массив субзерен сместился в область меньших размеров. Снизилось количество «малых» субзерен и субзерен с $d > 100$ нм, что свидетельствует об увеличении степени однородности и дисперсности наноструктуры. Увеличение протяженности и соответственно площади внутренних границ раздела наноструктурированного циркония в результате электронного облучения может обеспечить более высокую радиационную устойчивость структурного состояния циркония при последующих радиационных воздействиях.

ВЫВОДЫ

В результате больших пластических деформаций прокаткой при 300 К в цирконии получено наноструктурное состояние со средним размером субзерен ≈ 80 нм. Кинетика формирования основной части границ субзерен не является результатом динамической полигонизации и рекристаллизации и имеет дисклинационный характер.

Показано, что в результате облучения электронами ($E = 10$ МэВ, $D = 6 \cdot 10^{17}$ см²) в наноструктурированном цирконии происходит

развитие возвратных процессов, что приводит к увеличению степени однородности и дисперсности наноструктуры.

Показана определяющая роль деформационных границ раздела при протекании дислокационного возврата, инициируемого радиационными дефектами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.Н. Воеводин, И.М. Неклюдов. *Эволюция структурно-фазового состояния и радиационная стойкость конструкционных материалов*. Киев: «Наукова думка», 2006, 376 с.
2. Н.А. Демин, Ю.В. Конобеев // *Атомная энергия*. 1980, №48, в. 1, с. 20-24.
3. П.А. Платонов. *Действие ядерных излучений на материалы*. М.: Изд-во АН СССР, 1962, с. 106-120.
4. Е.Э. Засимчук, С.И. Селицер // *Металлофизика*. 1982, №4, в. 6, с.75-80.
5. А.В. Мац, В.М. Нетесов, В.И. Соколенко // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2011, №4, с. 108-111.
6. П. Хирш, А. Хови, Р. Николсон и др. *Электронная микроскопия тонких кристаллов*. М.: «Мир», 1968, 574 с.
7. В.В. Рыбин. *Большие пластические деформации и разрушение металлов*. М.: «Металлургия», 1986, 224 с.
8. S. Flach, A.V. Gorbach. Discrete breathers. *Advances in theory and applications // Phys. Rep.* 2008, v. 467, p. 1-116.
9. F.M. Russell, J.C. Eilbeck. Evidence for moving breathers in a layered crystal insulator at 300 K // *Europhys. Lett.* 2007, v. 78, p. 10004-100011.
10. В.И. Дубинко, А.Н. Довбня, В.А. Кушнир, И.В. Ходак, В.П. Лебедев, В.С. Крыловский, С.В. Лебедев, В.Ф. Клепиков. Деформация поликристаллов Al, Cu в условиях дифференциального и непрерывного высокоэнергетического электронного облучения // *Материалы 51 Международной конференции «Актуальные проблемы прочности», 16-20 мая 2011 г.* Харьков: ННЦ ХФТИ, 2011, с. 137.
11. В.И. Дубинко, В.А. Кушнир, И.В. Ходак, В.П. Лебедев, В.С. Крыловский, С.В. Лебедев, В.Ф. Клепиков. Влияние высокоэнергетичного электронного облучения на неустойчивость пластического течения промышленного сплава Al-3%Mg // *Материалы 51 Международной конференции «Актуальные проблемы прочности», 16-20 мая 2011 г.* Харьков: ННЦ ХФТИ, с. 139.

Статья поступила в редакцию 24.07.2012 г.

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОННОГО ОПРОМІНЕННЯ НА НАНОСТРУКТУРНИЙ СТАН ДЕФОРМОВАНОГО ЦИРКОНІЮ

А.М. Довбня, В.О. Мац, В.І. Соколенко

Досліджено вплив електронного опромінення на наноструктуру деформаційного походження в чистому цирконії. Наноструктурний стан з середнім розміром зерна 80 нм було отримано шляхом прокатки при 300 К на степінь 3,9. Показано, що в процесі опромінення в наноструктурованому Zr реалізуються поворотні процеси, що супроводжуються збільшенням однорідності і дисперсності наноструктури. Обґрунтована визначальна роль деформаційних меж розділу при зворотному дислокаційному проходженні, що ініціюється потоками радіаційних точкових дефектів.

INFLUENCE OF ELECTRON IRRADIATION ON NANOSTRUCTURED STATE OF STRAINED ZIRCONIUM

A.N. Dovbnya, V.A. Mats, V.I. Sokolenko

The influence of electron irradiation on the nanostructure of deformation origin in pure zirconium was investigated. The nanostructure state of the middle grain size of 80 nm was obtained by rolling at 300 K on a degree 3.9. It is shown that during irradiation the processes of recovery which are accompanied with increase of homogeneity and dispersion of nanostructure, are realized in nanostructured Zr. The main role of deformation interfaces at dislocation recovery initiated by the streams of radiation point defects is reasonable.