

## ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА СИСТЕМЫ Zr-Nb-H

Е.Н. Степанова<sup>1)</sup>, Г.П. Грабовецкая<sup>2)</sup>, М.А. Кругляков<sup>1)</sup>, Р.С. Лаптев<sup>1)</sup>, А.Д. Тересов<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
пр. Ленина 30, Томск 634055, Россия

<sup>2)</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики  
прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический 2/4, Томск 634055, Россия

<sup>3)</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной  
электроники СО РАН, пр. Академический 2/3, Томск 634055, Россия,  
enstepanova@tpu.ru, grabg@ispms.ru, kruglyakov97@tpu.ru, laptev.roman@gmail.com,  
tad514@sibmail.com

Влияние режимов облучения импульсным электронным пучком (ИЭП) на структуру и механические свойства сплава Zr-1Nb с содержанием водорода 0.0014 и 0.21 мас.% (далее сплавы Zr-1Nb и Zr-1Nb-0.21H). Методами оптической и электронной микроскопии, а также рентгеноструктурного анализа установлено, что облучение исследуемых циркониевых сплавов в режиме без плавления поверхности не изменяет морфологию и фазовый состав сплавов. После облучения ИЭП в режиме плавления поверхности в приповерхностном слое сплавов наблюдается растворение частиц фазы  $\beta$ -Nb и формирование пластинчатой структуры независимо от концентрации водорода. Определены механические свойства сплавов в зависимости от режима облучения ИЭП. Показано, что формирование пластинчатой структуры в приповерхностном слое приводит к повышению прочностных характеристик сплавов Zr-1Nb и Zr-1Nb-0,21H при растяжении в интервале температур 293–673 К на 25–10%.

**Ключевые слова:** циркониевый сплав; водород; импульсный электронный пучок; рентгеноструктурный анализ; позитронная спектроскопия; электронная микроскопия; прочностные характеристики.

## EFFECT OF IRRADIATION WITH A PULSED ELECTRON BEAM ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF Zr-Nb-H SYSTEM ALLOY

E.N. Stepanova<sup>1)</sup>, G.P. Grabovetskaya<sup>2)</sup>, M.A. Kruglyakov<sup>1)</sup>, R.S. Laptev<sup>1)</sup>, A.D. Teresov<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Ave., 634055 Tomsk, Russia

<sup>2)</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS,  
2/4 Akademicheskoy Ave., 634055 Tomsk, Russia

<sup>3)</sup>Institute of High-Current Electronics SB RAS, 2/3 Akademicheskoy Ave., 634055, Tomsk, Russia,  
enstepanova@tpu.ru, grabg@ispms.ru, kruglyakov97@tpu.ru, laptev.roman@gmail.com,  
tad514@sibmail.com

The effect of pulsed electron beam (PEB) irradiation modes on structure and mechanical strength of the Zr-1 wt.% Nb alloy with a hydrogen content of 0.0014 and 0.21 wt.% (hereinafter, Zr-1Nb and Zr-1Nb-0.21H alloys, respectively). Using optical and electron microscopy, as well as X-ray diffraction analysis, it has been established that irradiation of Zr-1Nb and Zr-1Nb-0.21H alloys in the mode without surface melting does not change the morphology and phase composition of their structure. After irradiation with PEB in the surface melting mode, dissolution of particles of the  $\beta$ -Nb phase and the formation of a lamellar structure are observed in the near-surface layer of the alloys, regardless of the hydrogen concentration. The mechanical strength of the near-surface layer of the alloys is determined depending on the mode of irradiation with the PEB. It is shown that the formation of a lamellar structure in the near-surface layer leads to an increase in the strength characteristics of the Zr-1Nb and Zr-1Nb-0.21H alloys under tension in the temperature range of 293–673 K by 25–10%.

**Keywords:** zirconium alloy; hydrogen; pulsed electron beam; X-ray diffraction analysis; positron spectroscopy; electron microscopy; strength characteristics.

## Введение

В последние годы для повышения эксплуатационных характеристик металлических материалов и создания защитных покрытий используется модификация поверхности путем ее облучения электронными пучками. В процессе воздействия ИЭП в приповерхностных слоях материала возникают большие градиенты температур и напряжений, в результате чего происходит образование дефектов. На плотность и тип образующихся при облучении дефектов может также влиять присутствие в материале водорода. Водород может индуцировать образование в материале новых дефектов и активно взаимодействовать с уже имеющимися дефектами структуры [1]. Все это может влиять на механические свойства облученного материала.

Целью данной работы было исследование влияния режима облучения ИЭП на структуру и механические свойства циркониевых сплавов Zr-Nb и Zr-Nb-H.

## Материал и методы исследования

В качестве материала исследования был использован сплав циркония Zr-1Nb. Наводороживание сплава до концентрации ~0.21 мас.% проводили методом Сиверста ( $T=773$  К,  $p=1$  атм). Облучение сплава было проведено тремя импульсами ИЭП с длительностью импульса 50 мкс и частотой  $0.3$  с<sup>-1</sup> с плотностью энергии  $5$  Дж/см<sup>2</sup> (без плавления поверхности – режим 1) и  $12$  Дж/см<sup>2</sup> (с плавлением поверхности – режим 2) [2]. Испытания на растяжение проводили при температурах  $293$ – $873$  К с начальной скоростью  $6.9 \cdot 10^{-3}$  с<sup>-1</sup>. Исследование влияния формирования в приповерхностном слое пластинчатой структуры на характеристики ползучести циркониевых сплавов было проведено при  $673$  К в интервале скоростей  $10^{-5}$ – $10^{-7}$  с<sup>-1</sup>.

## Результаты и их обсуждение

Исследуемый Zr-1Nb сплав имеет поликристаллическую структуру с размером зерен фазы  $\alpha$ -Zr в поперечном сечении  $3$ - $5$

мкм, в продольном –  $8$ - $12$  мкм. На границах и в объеме зерен присутствуют частицы вторичных фаз  $\beta$ -Nb и  $\beta$ -Zr, общая объемная доля которых ~2.5 об.%.

Размеры зерен и выделений вторичных фаз в процессе наводороживания не изменялись, но рентгеноструктурный анализ показал наличие в сплаве Zr-1Nb-H выделений гидридов ZrH и ZrH<sub>2</sub>.

Облучение ИЭП в режиме 1 не изменяет средний размер зерен, объемную долю и распределение частиц вторичных фаз в сплавах. В то же время в приповерхностном слое обоих сплавов увеличивается как плотность дислокаций с  $1.6 \cdot 10^{13}$  до  $1.5 \cdot 10^{14}$  м<sup>-2</sup>, так и величина микроискажений кристаллической решетки фазы  $\alpha$ -Zr – с  $3.2 \cdot 10^{-4}$  до  $1.0 \cdot 10^{-3}$ , что свидетельствует об увеличении внутренних напряжений в приповерхностном слое.

В результате облучения ИЭП в режиме 2 в приповерхностном слое сплава Zr-1Nb толщиной  $8$ - $12$  мкм формируется пластинчатая структура с размерами пакетов параллельных пластин  $1$ - $2$  мкм [3]. Ширина пластин в пакетах колеблется от  $20$  до  $300$  нм. Пластины являются  $\alpha$ - и  $\alpha'$ -фазами циркония. В модифицированном слое отсутствуют выделения фазы  $\beta$ -Nb. Плотность дислокаций и величина микроискажений кристаллической решетки фазы  $\alpha$ -Zr после облучения в режиме 2 увеличиваются по сравнению с необлученным и облученным в режиме 1 сплавами.

После облучения в режиме 2 в приповерхностном слое сплава Zr-1Nb-H также формируется пластинчатая структура и увеличиваются плотность дислокаций и величина микроискажений кристаллической решетки. В основном объеме указанные параметры структуры практически не отличаются от исходных значений. При этом в приповерхностном слое шириной ~2 мкм гидриды не наблюдаются, но общая концентрация водорода в сплаве уменьшается незначительно (на  $0.003$ – $0.006$  мас. %).

Механические испытания показали, что облучение ИЭП в режиме 1 практически

не изменяет прочностные и пластические характеристики исследуемых сплавов. После облучения в режиме 2 прочностные характеристики обоих сплавов в интервале температур 293-673 К увеличиваются на 25-15 %. При более высоких температурах испытания (723-873 К) облучение ИЭП в режиме 2 практически не влияет на прочностные и пластические характеристики обоих сплавов.

Детальное исследование деформационного рельефа после растяжения при комнатной температуре показало, что в процессе деформации на стадии упрочнения на поверхности образцов сплава Zr-1Nb-H образуются микротрещины. В объеме сплава трещины отсутствуют. После облучения указанного сплава в режиме 2 трещины на его поверхности после деформации на стадии упрочнения не наблюдаются. Поверхность разрушения сплава как до, так и после облучения имеет вид вязко-хрупкого излома. Можно предполагать, что растворение гидридов в приповерхностном слое в процессе облучения задерживает образование поверхностных трещин, что приводит к увеличению однородной деформации.

На кривых ползучести исследуемых сплавов как до, так и после облучения имеются три стадии ползучести: неустановившаяся, установившаяся и ускоренная. Облучение сплавов ИЭП в режиме 2 приводит к снижению скорости установившейся ползучести при увеличении времени до разрушения и деформации, достигаемой на стадии установившейся ползучести.

Зависимость скорости установившейся ползучести от напряжения обоих сплавов как до, так и после облучения в исследуемых условиях удовлетворительно описывается степенным законом ползучести. При этом значения показателей чувствительности скорости установившейся ползучести к напряжению существенно выше, соответствующих значений этого показателя для циркония, деформация которого при исследуемой температуре осуществ-

ляется скольжением дислокаций. В то же время величина эффективной энергии активации ползучести исследуемых сплавов близка к энергии активации объемной самодиффузии циркония. Все это указывает на то, что основным механизмом деформации исследуемых сплавов как до, так и после облучения является переползание дислокаций, контролируемое объемной самодиффузией циркония.

### Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что облучение ИЭП в режиме 1 не изменяет морфологию структуры и фазовый состав сплавов Zr-1Nb и Zr-1Nb-H. В результате облучения ИЭП в режиме 2 в поверхностном слое сплавов формируется пластинчатая структура с повышенной твердостью и сопротивлением пластической деформации, что приводит к повышению трещиностойкости и прочностных характеристик сплавов Zr-1Nb и Zr-1Nb-0,21H на 25–10% при растяжении в интервале температур 293-673 К. Переползание дислокаций, контролируемое объемной самодиффузией циркония, является основным механизмом деформации исследуемых сплавов как до, так и после облучения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-29-00156).

### Библиографические ссылки

1. Varvenne C., Mackain O., Proville L., Clouet E. Hydrogen and vacancy clustering in zirconium. *Acta Material* 2016; 102(1): 56-69.
2. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке. *Известия вузов. Физика* 2008; 51(5): 505-516.
3. Stepanova E.N., Grabovetskaya G.P., Mishin I.P., Teresov A.D., Syrtanov M.S. Structure and mechanical properties of the Zr-Nb-H system alloys after pulsed electron beam exposure. *AIP Conference Proceedings* 2018; 2051: 020295.