



**Институт физики прочности и
материаловедения СО РАН, г.
Томск**

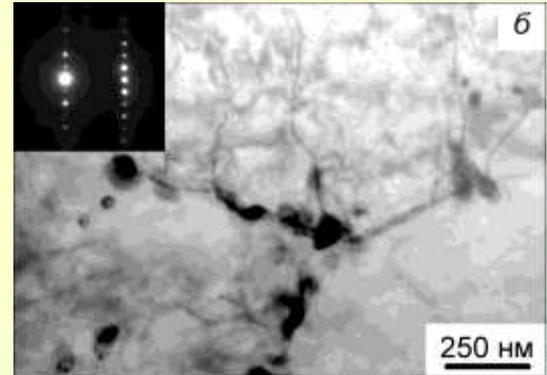
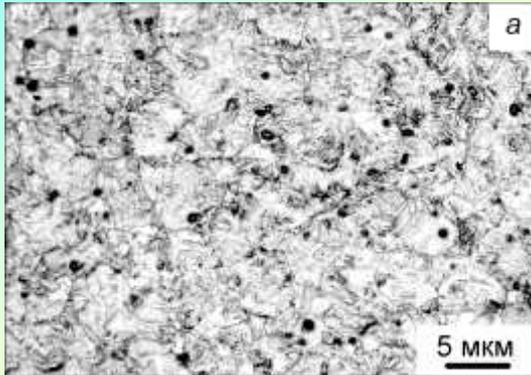
**ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫМ
ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ НА ДЕФЕКТНУЮ
СТРУКТУРУ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СПЛАВОВ
СИСТЕМЫ Zr-Nb-H**

М.А. Кругляков, Е.Н. Степанова, Г.П. Грабовецкая

Микроструктура сплавов Zr-1Nb и Zr-1Nb-0,21H в 2 ИСХОДНОМ СОСТОЯНИИ

Nb	Fe	H	Zr
1,0	< 0,05	0,0016	остальное

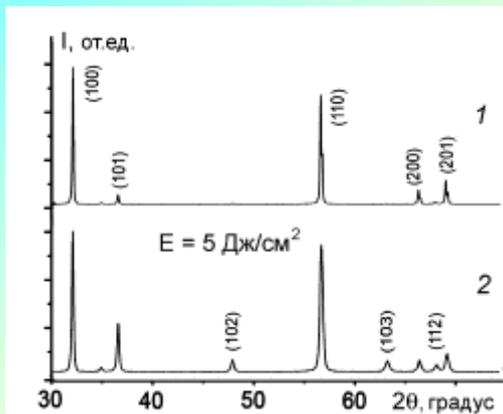
Nb	Fe	H	Zr
1,0	< 0,05	0,21	остальное



Промышленный сплав Zr-1Nb (марка Э110) имеет поликристаллическую структуру с размером зерен фазы α -Zr в поперечном сечении 3-5 мкм, в продольном – 8-12 мкм. Вторичные фазы в виде частиц, размерами 10-50 нм присутствуют объеме и на границах зерен сплава. Общая объемная доля вторичных фаз не превышает 2 об. %. Наводороживание сплава до концентрации $\sim 0,21$ мас.% не изменяет размеры зерен и выделений вторичных фаз.

Фазовый состав сплавов Zr-1Nb и Zr-1Nb-0,21H

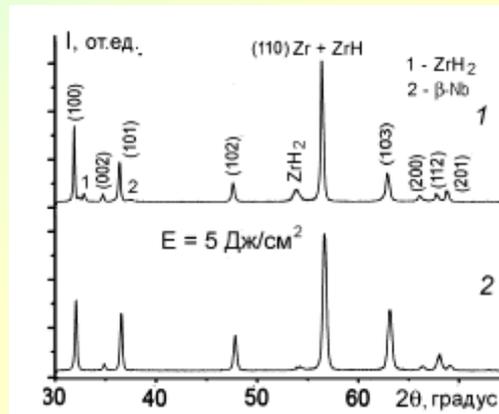
Zr-1Nb



$$\rho - 1,6 \cdot 10^{13} \rightarrow 1,5 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$$

$$\Delta\varepsilon - 3,2 \cdot 10^{-4} \rightarrow 1,0 \cdot 10^{-3}$$

Zr-1Nb-H



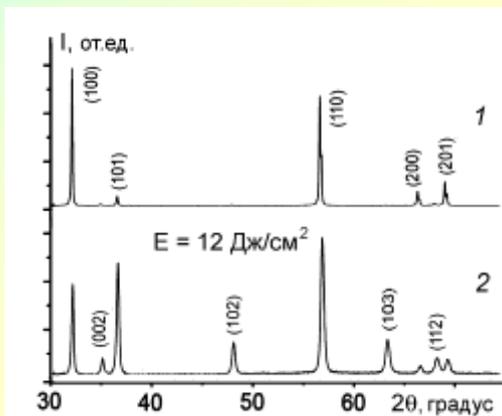
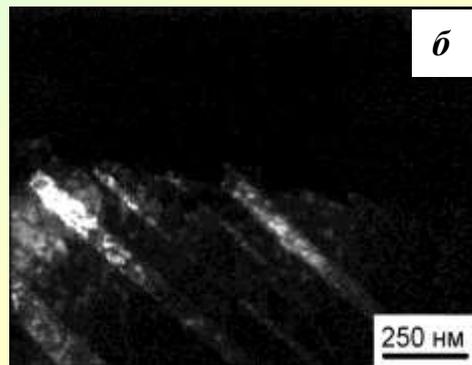
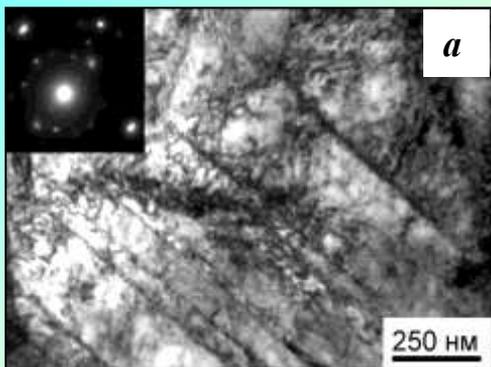
$$\rho - 3,0 \cdot 10^{14} \rightarrow 6,7 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$$

$$\Delta\varepsilon - 1,4 \cdot 10^{-3} \rightarrow 2,1 \cdot 10^{-3}$$

Образцы сплавов Zr-1Nb и Zr-1Nb-H облучали импульсным электронным пучком с плотностью энергии 5 (режим без плавления) и 12 Дж/см² (режим плавления поверхности) Образцы облучали тремя импульсами с длительностью импульса – 50 мкс и частотой – 0,3 с⁻¹.

Структура приповерхностного слоя сплавов Zr-1 Nb

4



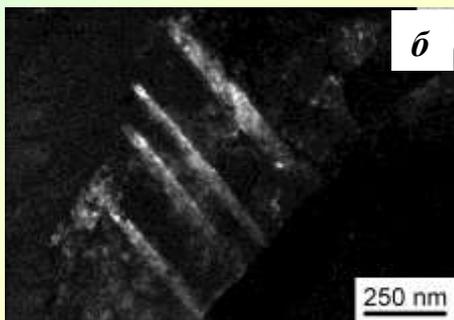
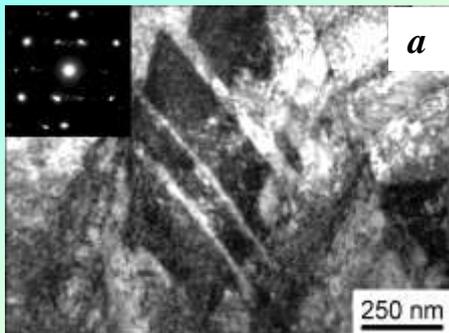
$$\rho \ 1,6 \cdot 10^{13} \rightarrow 3,2 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$$

$$\Delta \varepsilon \ 3,2 \cdot 10^{-4} \rightarrow 1,310^{-3}$$

В объеме зерен поверхностного слоя формируется пластинчатая структура с размерами пакетов параллельных пластин 1.5-2.5 мкм. Ширина пластин в пакетах колеблется от 20 до 300 нм

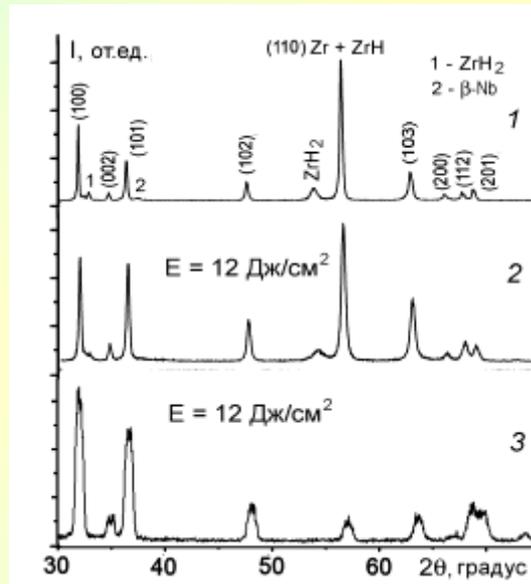
Структура поверхностного слоя сплава Zr-1Nb-0,21H

5



$$\rho \ 3,0 \cdot 10^{14} \rightarrow 7,4 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$$

$$\Delta \epsilon \ 1,4 \cdot 10^{-3} \rightarrow 2,9 \cdot 10^{-3}$$

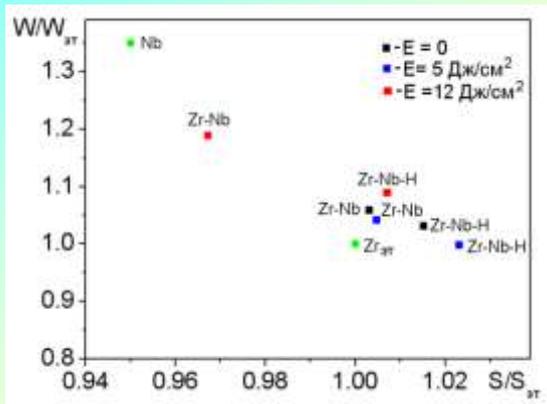


В приповерхностном слое сплава Zr-1Nb-H шириной ~ 1 мкм гидриды не наблюдаются. При этом общая концентрация водорода в сплаве уменьшается незначительно (на 0,003–0,004 мас. %).

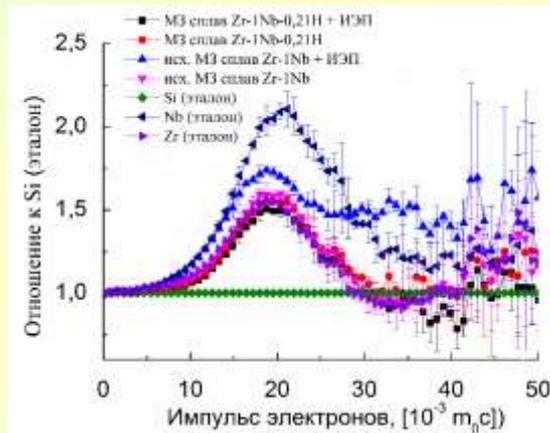
Дефектная структура при поверхностного слоя сплавов Zr-1Nb и Zr-1Nb-0,21H

6

Взаимосвязь параметров импульсного
распределения аннигиляции позитронов



Спектры временного распределения
аннигиляции позитронов



Параметры S - и W характеризуют
процессы аннигиляции позитронов
с валентными и остовными
электронами соответственно.

Дефектная структура приповерхностного слоя сплавов Zr-1Nb и Zr-1Nb-0,21H

Материал	E , Дж/см ²	τ_1 , пс	I_1 , %	τ_2 , пс	I_2 , %	τ_3 , пс	I_3 , %
Zr-1Nb (отжиг)	0	166±1	100	-	-	-	-
Zr-1Nb.	0	166±1	84	210±5	16	-	-
Zr-1Nb.	5	163±1	23	205±5	66	320	11
Zr-1Nb	12	166±1	66	205±5	21	193	26
Zr-1Nb-0,21H	0	163±1	53	205±5	47	-	-
Zr-1Nb-0,21H	5	166±1	5	204±5	95		
Zr-1Nb-0,21H	12	166±1	56	209±5	26	280	18

$\tau = 166 \pm 2$ пс – аннигиляцией позитронов в решетке циркония

$\tau = 193 \pm 5$ пс – аннигиляция на дефектах типа «вакансия-примесь» или межфазных границах.

$\tau = 215-220$ пс – аннигиляция на дефектах типа «дислокация»

$\tau = 205-210$ пс – аннигиляция на дефектах типа «водород-вакансионный комплекс»

$\tau = 320 \pm 10$ пс – аннигиляция на дефектах типа «вакансионный комплекс»

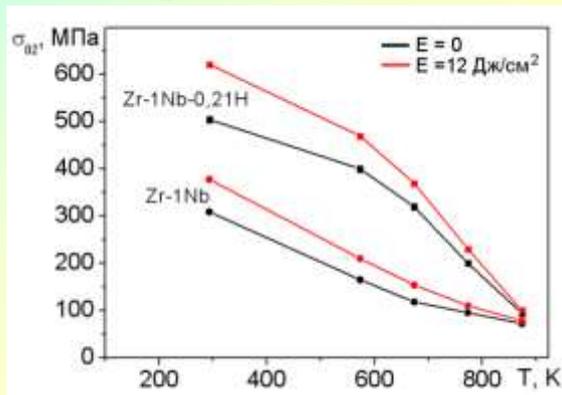
$\tau = 280 \pm 10$ пс – аннигиляция на дефектах типа «сложный водород-вакансионный комплекс» ($mV-nH$)

Механические свойства сплавов Zr-1Nb и Zr-1Nb-0,21H

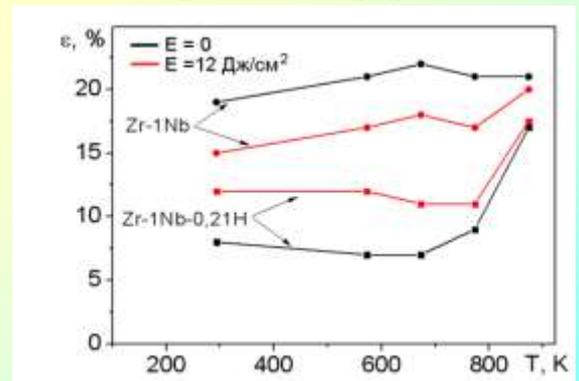
Механические свойства сплавов при 293 К

Материал	E, Дж/см ²	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	ε_B , %	δ , %
Zr-1Nb	0	300	445	18	36
Zr-1Nb	5	319	425	22	35
Zr-1Nb-H	0	505	612	8	17
Zr-1Nb-H	5	526	628	12	19

Предел текучести



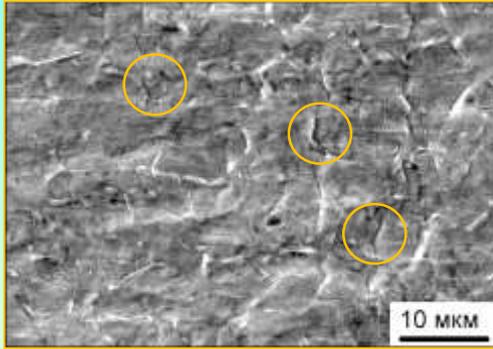
Однородная деформация



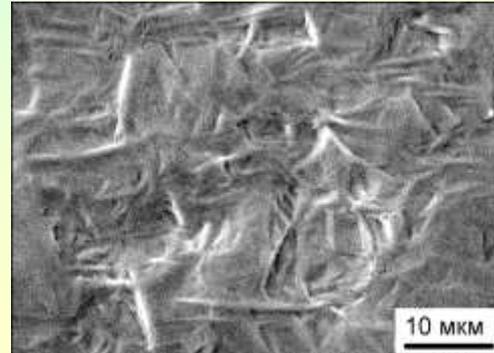
Температурная зависимость предела текучести и однородной деформации сплавов Zr-1Nb и Zr-1Nb-H

Разрушение сплава Zr-1Nb-0,21H

$E = 0$
 $\varepsilon = \sim 8 \%$

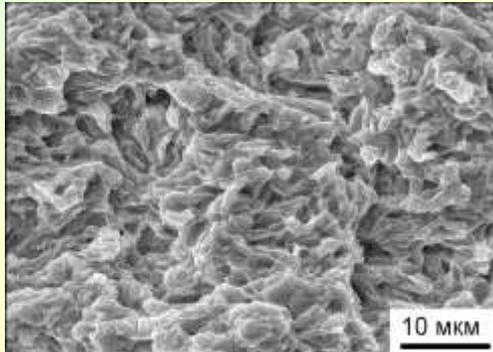


$E = 12 \text{ Дж/см}^2$
 $\varepsilon = \sim 9 \%$

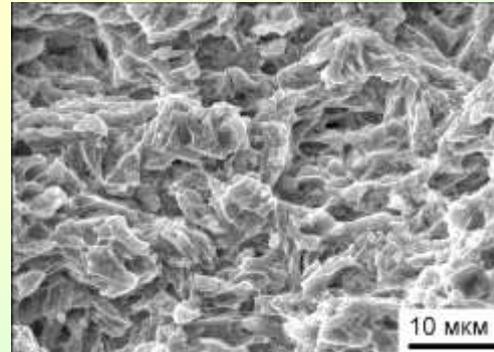


Деформационный рельеф рабочей части образца

$E = 0$



$E = 12 \text{ Дж/см}^2$



Фрактограммы поверхности разрушения

Заключение

Таким образом, облучение сплавов Zr-1Nb и Zr-1Nb-0,21H в режиме отсутствия плавления не изменяет размера зерен и выделений фазы β -Nb, но приводит к увеличению микроискажений кристаллической решетки фазы α -Zr и росту плотности дислокаций в приповерхностном слое. В результате облучения в режиме плавления в приповерхностном слое шириной 8-10 мкм сплавов Zr-1Nb и Zr-1Nb-0,21H формируется пластинчатая $\alpha+\alpha'$ структура с поперечным размером пластин 20-300 нм. При этом в приповерхностном слое наряду с ростом плотности дефектов, увеличивающих свободный объем (дислокации, вакансии и вакансионные комплексы), происходит растворение фазы β -Nb и формирование дефектов типа «вакансия-примесь». Присутствие водорода способствует при облучении импульсным электронным пучком в режиме плавления образованию в приповерхностном слое сплава Zr-1Nb-0,21H сложных водород-вакансионных комплексов. При этом дислокации остаются основным типом дефектов.

Облучение импульсным электронным пучком в режиме плавления поверхности приводит к росту прочностных характеристик образцов наводороженного сплава Zr-1Nb на 15–25 % по сравнению с не облученными образцами с соответствующей концентрацией водорода. При этом в 1,4-1,5 увеличивается однородная деформация наводороженного сплава, что свидетельствует о росте его сопротивления водородной хрупкости



Спасибо за внимание!