

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОТВЕРДОСТИ ПО ГЛУБИНЕ ЦИРКОНИЕВОГО  
СПЛАВА Э110 ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ И  
НАВОДОРОЖИВАНИЯ**

Бабихина М.Н.

Научный руководитель: Кудияров В.Н., ассистент

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: [m.babihina@mail.ru](mailto:m.babihina@mail.ru)

**STUDIES OF THE MICROHARDNESS DEPTH DISTRIBUTION IN THE ZIRCONIUM ALLOY ZR-  
1NB AFTER IRRADIATION BY PULSED ELECTRON BEAM AND HYDROGENATION**

Babikhina M.N.

Scientific supervisor: assistant of General Physics department Kudiiarov V.N.

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: [m.babihina@mail.ru](mailto:m.babihina@mail.ru)

**Введение.** Цирконий и сплавы на его основе являются одним из важнейших элементов активной зоны атомных энергетических реакторов, так как цирконий обладает низким сечением захвата нейтронов, хорошей коррозионной стойкостью. Однако, в процессе эксплуатации ядерного реактора такие элементы подвержены наводороживанию и водородному охрупчиванию, что может привести к разрушению циркониевых изделий. Для предотвращения проникновения водорода в циркониевые сплавы используется модифицирование поверхности циркониевых сплавов импульсными электронными пучками (ИЭП). Это обусловлено тем, что после модифицирования в материале образуется поверхностный слой ~ 10 мкм, в котором накапливается водород при наводороживании [1, 2]. Для подтверждения такого эффекта в настоящей работе проведено исследование распределения микротвердости по глубине образцов циркониевого сплава Э110 после облучения импульсным электронным пучком и наводороживания.

**Материал и методика исследований.** Для исследования были изготовлены образцы циркониевого сплава Э110 размерами 20×20×0,6. Облучение образцов осуществлялось на установке «Соло» в ИСЭ СО РАН, с двух сторон при плотности энергии 18 Дж/см<sup>2</sup>, число импульсов равнялось 3, длительность импульсов составила 50 мкс. Наводороживание проводилось на установке Gas Reaction Controller [3] при 2 атм., температуре 350 °С до концентрации 500 ppm. Анализ распределения водорода в подготовленных образцах осуществлялся на спектрометре плазмы тлеющего разряда Profiler 2. Микротвердость серии из 40 измерений при нагрузке 50 г измерялась с помощью твердомера HV-1000, схема которого представлена на рисунке 1.

Твердомер по Микро-Виккерсу HV-1000 состоит из столика (1), на который помещается образец до высоты на которой находится 40X объектив (2). Затем устанавливаем испытательную нагрузку с помощью рукоятки регулировки испытательного усилия (3).

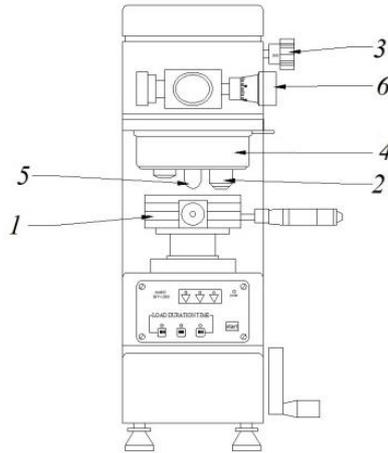


Рис. 1. Схема твердомера по Микро-Виккерсу HV-1000: 1 – стол; 2 – 40X объектив; 3 – рукоятка регулировки испытательного усилия; 4 – вращающаяся головка; 5 – индентор; 6 – измерительный маховик.

После переведения вращающейся головки (4) на индентор (5) начинаем проводить индентацию поверхности алмазной пирамидкой. После этого переводим положение вращающейся головки на 40X объектив и находим в окуляр объектива отпечаток алмазной пирамидки на поверхности образца. Затем измеряем длины диагоналей получившегося отпечатка с помощью измерительного маховика (6). Далее по шкале измерительного маховика определяем длину диагонали в 40X объективе. После чего по формуле (1) определяем твердость:

$$HV = 1,8544 * \frac{F}{\left(\frac{d}{40}\right)^2}, \quad (1)$$

где  $d$  – диагональ отпечатка в 40X объективе;  $F$  – испытательное усилие, кг; 40 – увеличение объектива.

**Результаты исследований.** На рисунке 2 представлено распределение микротвердости по поперечному шлифу циркониевого сплава Э110 после облучения импульсным электронным пучком и после облучения ИЭП и наводороживания.

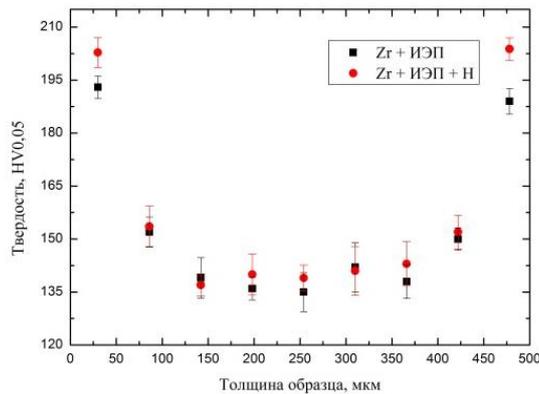


Рис. 2. Распределение микротвердости по поперечному шлифу циркониевого сплава Э110 после облучения ИЭП и после облучения ИЭП и наводороживания

Облучение импульсным электронным пучком при плотности энергии 18 Дж/см<sup>2</sup> тремя импульсами по 50 мкс каждый приводит к поверхностному упрочнению циркониевого сплава Э110, что связано со структурно-фазовыми изменениями в поверхностных слоях материала в результате высокоскоростно-

го нагрева и быстрого охлаждения при облучении [1-2]. Как видно из рисунка 2 на глубине до 50 мкм значение микротвердости составляет  $\sim 195$  HV<sub>0,05</sub> и спадает с дальнейшим увеличением глубины до значения  $\sim 140$  HV<sub>0,05</sub>. Последующее наводороживание при 350 °С и давлении водорода 2 атм. до концентрации 500 ppm приводит к увеличению твердости только на глубине до 50 мкм. Такой результат связан с тем, что после облучения ИЭП водород в циркониевом сплаве при указанных параметрах наводороживания локализуется в поверхностном слое и не проникает в глубину материала.

Для определения локализации водорода после наводороживания образцов до и после облучения ИЭП проведено исследование распределения водорода по глубине при помощи спектрометра Profiler-2. Результаты исследования представлены на рисунке 3. Как показали исследования, в циркониевом сплаве Э110 после модифицирования импульсным электронным пучком водород концентрируется в поверхностном слое материала [2].

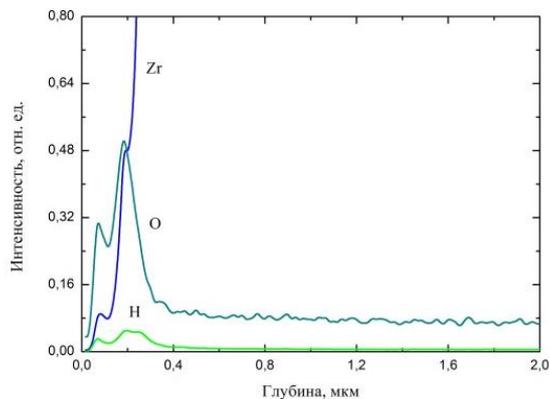


Рис. 3. Распределение элементов по глубине циркониевого сплава Э110 после облучения ИЭП и наводороживания

**Закключение.** В работе проведено исследование распределения микротвердости по поперечному шлифу циркониевого сплава Э110 после облучения импульсным электронным пучком и последующего наводороживания. Как показали исследования облучение импульсным электронным пучком при плотности энергии 18 Дж/см<sup>2</sup> тремя импульсами по 50 мкс каждый приводит к увеличению микротвердости слоя на глубине до 50 мкм в  $\sim 1,5$  раз. Последующее наводороживание до концентрации 500 ppm приводит к увеличению твердости на глубине до 50 мкм, что связано с локализацией водорода в поверхностном слое при наводороживании. Такой результат подтверждается исследованием распределения водорода по глубине циркониевого сплава Э110 после облучения и наводороживания.

#### Список литературы:

1. Чернов И. П. и др. Исследование влияния водорода на свойства модифицированного импульсным электронным пучком циркониевого сплава Zr1% Nb //Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83. – №. 9. С. – 38-42.
2. Pushilina N. S. et al. Hydrogen effect on zirconium alloy surface treated by pulsed electron beam //Journal of Nuclear Materials. – 2015. - №456. – С. 311-315.
3. Kudiiarov V. N. et al. Application of automated complex Gas Reaction Controller for hydrogen storage materials investigation //Advanced Materials Research. – 2013. – Т. 740. – С. 690-693.