

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА Zr1Nb

**В.А. Белоус, П.Н. Вьюгов, А.С. Куприн, С.А. Леонов, Г.И. Носов, В.Д. Овчаренко, Л.С. Ожигов, А.Г. Руденко, В.И. Савченко, Г.Н. Толмачева, В.М. Хороших**  
*Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”*

*Украина*

Поступила в редакцию 09.01.2013

В работе приводятся результаты исследований влияния ионно-плазменной обработки (ИПО), включающей осаждение ионно-плазменных покрытий и ионную имплантацию, на механические свойства образцов из отрезков твельных трубок циркониевого сплава Zr1Nb. Были получены однослойные (TiN), многослойные (Ti + TiN)<sub>x</sub>, (Zr + ZrN)<sub>x</sub> и многокомпонентные наноструктурные TiAlN, TiAlSiN, TiAlYN покрытия. Ряд образцов был облучен ионами Zr<sup>+</sup>, Mo<sup>+</sup>, N<sub>2</sub><sup>+</sup> и O<sub>2</sub><sup>+</sup>. После ИПО образцы подвергались испытаниям на растяжение. Осаждение упрочняющих ионно-плазменных покрытий приводит к увеличению предела прочности  $\sigma_B$  на разрыв от 12 до 21% при 350 °С, а условный предел текучести  $\sigma_{0.2}$  остаётся при этом практически неизменным. После ионного облучения заметно увеличился (до 16%) условный предел текучести  $\sigma_{0.2}$ . Показано, что исследуемые покрытия толщиной ~5 мкм обладают высокой твёрдостью (до 45 ГПа), а после ИПО отмечено увеличение твердости и модуля упругости образцов.

**Ключевые слова:** ионно-плазменные покрытия, ионная имплантация, циркониевые сплавы, механические свойства, испытания на растяжение.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІОННО-ПЛАЗМОВОЇ ОБРОБКИ НА МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИРКОНІЄВОГО СПЛАВУ Zr1Nb

**В.А. Білоус, П.М. В'югов, О.С. Купрін, С.О. Леонов, Г.І. Носов, В.Д. Овчаренко, Л.С. Ожигов, О.Г. Руденко, В.І. Савченко, Г.М. Толмачова, В.М. Хороших**

У роботі наводяться результати досліджень впливу іонно-плазмової обробки (ІПО), що включає осадження іонно-плазмових покриттів та іонну імплантацію, на механічні властивості зразків з відрізків твельних трубок цирконієвого сплаву Zr1Nb. Були отримані одношарові (TiN), багатшарові (Ti + TiN)<sub>x</sub>, (Zr + ZrN)<sub>x</sub> і багаткомпонентні наноструктурні TiAlN, TiAlSiN, TiAlYN покриття. Ряд зразків були імплантовані іонами Zr<sup>+</sup>, Mo<sup>+</sup>, N<sub>2</sub><sup>+</sup> і O<sub>2</sub><sup>+</sup>. Після ІПО зразки піддавалися випробуванням на розтягування. Осадження зміцнюючих іонно-плазмових покриттів призводить до збільшення межі міцності  $\sigma_B$  на розрив від 12 до 21% при 350 °С, а умовна межа плинності  $\sigma_{0.2}$  залишається при цьому практично незмінною. Після іонного опромінення помітно збільшилась (до 16%) умовна межа плинності  $\sigma_{0.2}$ . Показано, що досліджувані покриття товщиною ~5 мкм мають високу твердість (до 45 ГПа), а після ІПО відзначено збільшення твердості та модуля пружності зразків.

**Ключові слова:** іонно-плазмові покриття, іонна імплантація, цирконієві сплави, механічні властивості, випробування на розтяг.

## INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF ION-PLASMA TREATMENT ON MECHANICAL PROPERTIES OF ZIRCONIUM ALLOY Zr1Nb

**V.A. Belous, P.N. V'ygov, A.S. Kuprin, S.A. Leonov, G.I. Nosov, V.D. Ovcharenko, L.S. Ozhigov, A.G. Rudenko, A.G. Savchenko, G.N. Tolmachova, V.M. Khoroshikh**

The paper presents the results of the effect of ion-plasma treatment (IPT), which includes ion-plasma deposition of coatings and ion implantation. The mechanical properties of the segments of zirconium alloy Zr1Nb tubes after IPT were studied. Were obtained by single-layer (TiN), multilayer (Ti + TiN)<sub>x</sub>, (Zr + ZrN)<sub>x</sub>, and multicomponent nanostructured TiAlN, TiAlSiN, TiAlYN coatings. A series of samples was implanted by ions Zr<sup>+</sup>, Mo<sup>+</sup>, N<sub>2</sub><sup>+</sup> and O<sub>2</sub><sup>+</sup>. After IPT, the samples were tested in tension. Deposition of ion-plasma coatings increases the tensile strength  $\sigma_B$  from 12 to 21% at 350 °С, and the yield strength  $\sigma_{0.2}$  remains unchanged. After ion implantation significantly increased (to 16%) yield strength  $\sigma_{0.2}$ . It is shown that the investigated coatings thickness of about 5 microns have high hardness (45 GPa), and after IPT the hardness and elastic modulus are increased.

**Keywords:** ion-plasma coatings, ion implantation, zirconium alloys, mechanical properties, tensile test.

## ВВЕДЕНИЕ

Циркониевые сплавы вследствие ряда достоинств (малое сечение захвата тепловых нейтронов, высокая температура плавления, хорошие механические свойства и высокая коррозионная стойкость) являются основным компонентом конструкционных сплавов для атомной техники. По совокупности своих ядерных и технологических свойств циркониевые сплавы являются одними из лучших материалов для оболочек твэлов [1].

Основной задачей в развитии энергетического реакторостроения является повышение эксплуатационной надежности и безопасности реакторов, улучшение их экономических показателей. Возрастание мощности ядерных реакторов, увеличение глубины выгорания топлива, продление ресурса ТВС требует улучшения эксплуатационных характеристик циркониевых сплавов, используемых для изготовления твэлов. Перспективным в этом направлении является изменение состояния поверхности циркониевых изделий путём её модификации ионно-плазменной обработкой (ионной имплантацией и осаждением ионно-плазменных защитных покрытий, отличающихся по составу, структуре и свойствам от основного материала). В последнее время появился ряд работ, в которых изучалось влияние ионно-плазменной обработки на коррозионное поведение циркониевых сплавов [2 – 4]. Гораздо меньше данных о влиянии ИПО на механические свойства циркониевых сплавов. Так в работе [5] показано, что вследствие облучения ионами переходных металлов в поверхности циркониевых сплавов формируются градиентные наноструктурные слои с повышенными твердостью и модулем упругости, а облучение полиэнергетическими ионами  $Mo^+$  приводит к существенному уменьшению (в 2 – 3 раза) скорости ползучести сплава Zr1Nb. Осаждение защитных многослойных и многокомпонентных наноструктурных ионно-плазменных покрытий повышает твердость поверхностного слоя на циркониевых сплавах [6, 7].

В данной работе приведены результаты исследования влияния ионно-плазменной обработки (ИПО), включающей осаждение

ионно-плазменных покрытий и ионную имплантацию, на механические свойства твэльных трубок из сплава Zr<sub>1</sub>Nb.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

На образцы, изготовленные из отрезков твэльных трубок длиной 80 мм, и диаметром 9,2 мм осаждались бескапельные покрытия на установке типа “Булат-6” с использованием прямолинейных фильтров плазменных потоков [8]. Токи вакуумной дуги изменялись в пределах 80 ÷ 100 А, а прикладываемый к образцам отрицательный потенциал – 50 ÷ 100 В. Давление реакционного газа азота составляло 0,4 ÷ 0,6 Па. Толщина покрытий составляла величину порядка 4 – 5 мкм. Наноструктурные покрытия на основе TiN дополнительно легировались элементами: Al, Y и Si. Многослойные покрытия были выполнены на основе чередующихся слоев Ti/TiN и Zr/ZrN.

Для облучения образцов ионами  $Zr^+$ ,  $Mo^+$ ,  $N_2^+$  и  $O_2^+$  установка “Булат-6” была дополнительно оснащена источником газовой плазмы и высоковольтной системой доускорения ионов. Облучение проводилось в среднеэнергетическом диапазоне энергий при дозе ионного облучения  $10^{17} \div 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>.

Нанотвёрдость ( $H$ ) и модуль Юнга ( $E$ ) осажденных конденсатов и имплантированных слоев измеряли с помощью прибора Nano-indenter G200 на плоских полированных образцах из сплава Zr1Nb, подвергнутых ИПО одновременно с трубками в тех же условиях.

Образцы после ИПО подвергались испытаниям на растяжение в установке “ИНСТРОН-5581” (рис. 1) и вакуумной машине



Рис. 1. Общий вид установки “ИНСТРОН-5581”.

1246P-2/2300 (рис. 2).

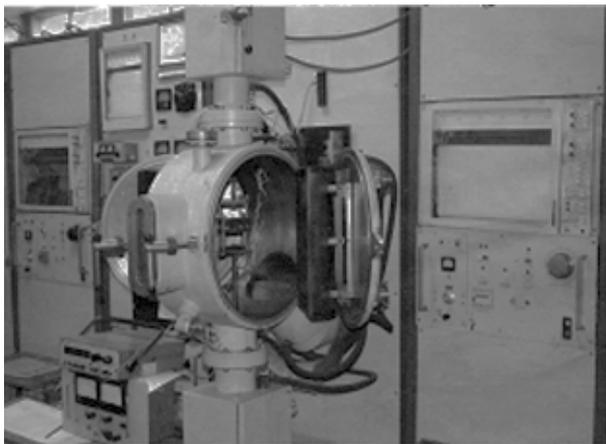


Рис. 2. Общий вид установки 1246P-2/2300.

Из полученных диаграмм растяжения при скорости 1 мм/мин определялись предел прочности  $\sigma_B$ , условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , общее  $\delta_5$  и равномерное  $\delta_p$  удлинение. Испытания проводились при температуре +20 °С и +350 °С. С помощью измерения резонансной частоты при изгибных колебаниях на установке ИВТ-3 определялся модуль упругости образцов с осажденными покрытиями  $E = C \cdot f^2$ , где  $f$  – резонансная частота изгибных колебаний, а  $C$  – константа [9].

Также оценивался показатель степени деформационного упрочнения  $n$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Ионно-плазменные покрытия.** В табл. 1, приведены сравнительные результаты наноиндентирования различных по составу покрытий и исходного сплава. Все покрытия обладают высокими твёрдостью ( $H$ ) и модулем упругости ( $E$ ). Максимальной твёрдостью (45 ГПа) обладает многокомпонентное наноструктурное покрытие  $Ti_{77,9}Al_{19,2}Si_{2,7}N$ .

Таблица 1  
Состав, толщина, твердость и модуль Юнга покрытий

Состав покрытий	$d$ , мкм	$H$ , ГПа	$E$ , ГПа
Без покрытия	–	2,8	110
TiN	5	31	438
$(Ti + TiN)_x$	5	29	380
$(Zr + ZrN)_x$	5	27	280
$Ti_{67}Al_{33}N$	4	32	341
$Ti_{68,4}Al_{31,1}Y_{0,5}N$	5	33	352
$Ti_{77,9}Al_{19,2}Si_{2,7}N$	4	45	425

Испытания на растяжение показали, что осаждение упрочняющих ионно-плазменных покрытий всех исследованных составов на образцы из твэльных трубок сплава Zr1Nb приводит также к улучшению их объемных механических характеристик. Так предел прочности  $\sigma_B$  на разрыв при 350 °С увеличивается от 12 до 21% (рис. 3), а условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$  остаётся практически неизменным и только для покрытия  $Ti_{77,9}Al_{19,2}Si_{2,7}N$  возрастает на 9%, незначительно растёт объёмный модуль упругости.

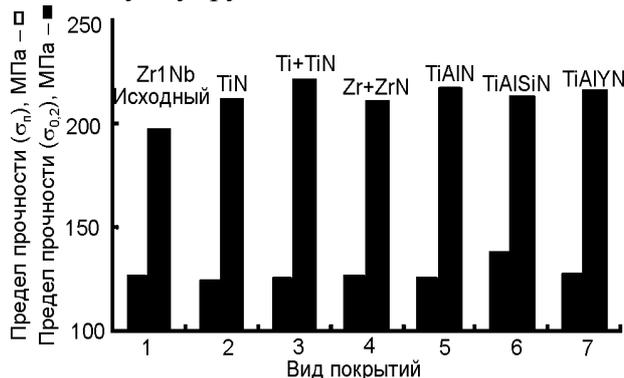


Рис. 3. Зависимость предела прочности  $\sigma_B$  ( $\square$ ) и условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$  ( $\circ$ ) образцов от вида ионно-плазменных покрытий: 1 – исходный образец; 2 – TiN; 3 –  $(Ti + TiN)_x$ ; 4 –  $(Zr + ZrN)_x$ ; 5 – TiAlN; 6 – TiAlSiN; 7 – TiAlYn. Температура испытаний  $T = 350$  °С.

Зависимость общего относительного удлинения образцов при испытаниях на растяжение от вида ионно-плазменных покрытий представлена на рис. 4.

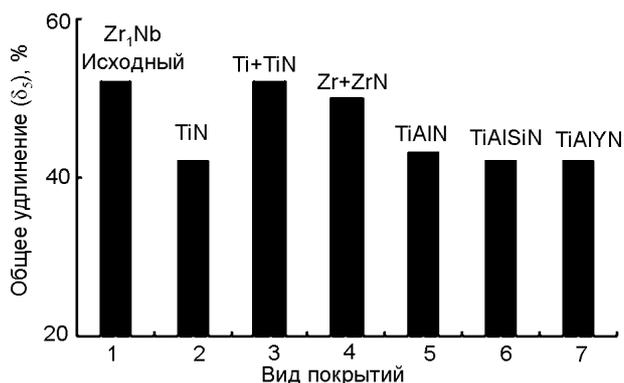


Рис. 4. Зависимость общего удлинения  $\delta_5$  от вида ионно-плазменных покрытий: 1 – исходный образец; 2 – TiN; 3 –  $(Ti + TiN)_x$ ; 4 –  $(Zr + ZrN)_x$ ; 5 – TiAlN; 6 – TiAlSiN; 7 – TiAlYn. Температура испытаний  $T = 350$  °С.

Как видно из рис. 4, пластичность образцов после осаждения многослойных  $(Ti + TiN)_x$  и  $(Zr + ZrN)_x$  покрытий осталась практически неизменной при сохранении высоких прочностных характеристик. Для остальных по-

крытий  $\delta_5$  несколько уменьшилось. Равномерное относительное удлинение  $\delta_p$  для всех видов покрытий значительно меньше, чем полное, и составляет  $\delta_p = (22 \pm 2)\%$ . Незначительное изменение  $\Delta\delta_p = \pm 2\%$  свидетельствует о стабильности материала покрытий.

Показатель степени деформационного упрочнения находится на уровне  $n = 0,2$ . В частности он может быть использован для определения живучести оболочек ТВЭЛ при изучении критической деформации потери пластической устойчивости из соотношения  $\epsilon_\theta = n/2$ , где  $\epsilon_\theta$ -окружная деформация [10]. Объемный модуль упругости при 20 °С изменяется незначительно.

Таким образом, полученные вакуумно-дуговые покрытия дают возможность, наряду с улучшением поверхностных свойств конструкционных материалов из Zr1Nb, также повысить объемно-прочностные свойства изделий – твэлов.

**Ионная имплантация.** На основании измерений, проведенных с помощью наноиндентора (Nanoindenter G200) установлено, что после облучения полиэнергетическими (15 ÷ 60 кэВ) ионами металлов Mo<sup>+</sup> и Zr<sup>+</sup> и газовыми ионами N<sub>2</sub><sup>+</sup> и O<sub>2</sub><sup>+</sup> с энергией 15 кэВ в плоских образцах, вырезанных из твэльных трубок сплава Zr1Nb, формируются градиентные наноструктурные слои с увеличенными значениями твердости и модуля упругости.

На рис. 5 показана зависимость твердости поверхности таких образцов после имплантации от глубины внедрения индентора.

Как видно из рис. 5, твердость поверхности сплава после имплантации возросла в 2,5

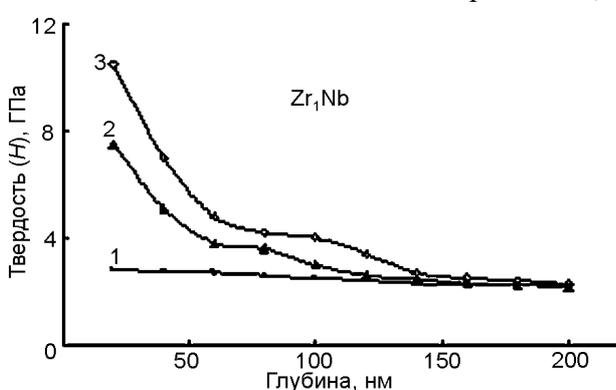


Рис. 5. Зависимость твердости от глубины индентирования сплава Zr1Nb исходного (1) и облученного ионами Mo<sup>+</sup> (2) и Zr<sup>+</sup> (3) с энергией 15 ÷ 60 кэВ, доза 10<sup>18</sup> ион/см<sup>2</sup>.

÷ 3 раза. С увеличением толщины модифицированного слоя от 20 до 200 нм нанотвердость монотонно снижается до значений, характерных для объема материала. При этом модуль упругости поверхности сплава Zr<sub>1</sub>Nb вырастает на 20 ÷ 30% (120 ÷ 140 ГПа).

Испытание таких образцов на растяжение показало заметное увеличение условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$  для всех облученных образцов (рис. 6). Максимальное увеличение  $\sigma_{0,2}$  (на 16%) было получено при облучении полиэнергетическими ионами циркония. Видно, что условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$  возрастает с увеличением ускоряющего отрицательного потенциала  $E_p$ , прикладываемого к подложке с образцами. При этом предел прочности  $\sigma_b$  для всех облученных образцов остался практически неизменным.

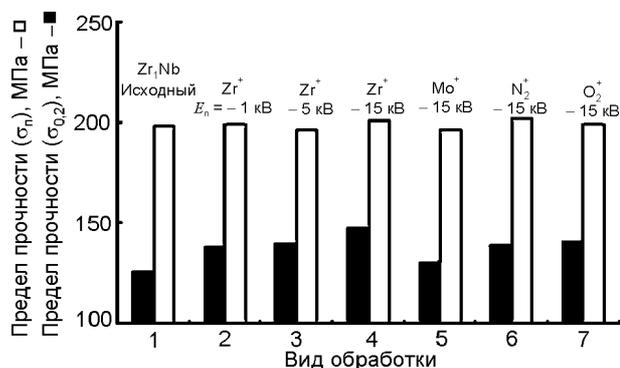


Рис. 6. Зависимость предела прочности  $\sigma_b$  (□) и условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$  (■) образцов после облучения от вида и энергии ионов. Температура испытаний  $T = 350$  °С.

Увеличение условного предела текучести сплава после имплантации может быть объяснено тем, что внедрённые атомы и радиационные дефекты, способствуют закреплению дислокаций и повышают уровень напряжений, необходимый для активации дислокационных источников вблизи поверхности материала.

На рис. 7 показана зависимость общего удлинения образцов при испытаниях на растяжение.

Величина общего удлинения  $\delta_5$  при облучении ионами металлов немного снизилась, а после облучения газовыми ионами возросла (на 10%). Также ионное облучение приводит к небольшому увеличению объемного модуля упругости.

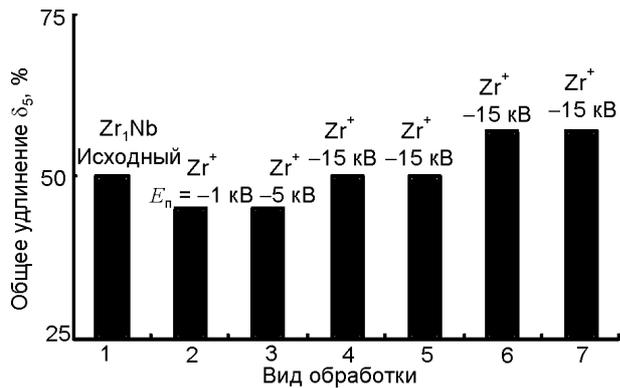


Рис. 7. Зависимость величины общего удлинения  $\delta_5$  при растяжении образцов после облучения от вида и энергии ионов. Температура испытаний  $T = 350$  °С.

Как показали ранее проведенные измерения [13], глубина слоя с имплантированными атомами достигает 200 нм. Из результатов исследований видно, что имплантация оказывает влияние не только на свойства поверхностного слоя (нанотвердость, модуль упругости), но и на некоторые объемные характеристики (предел текучести, общее удлинение).

Полученные результаты могут быть объяснены в рамках подхода, предложенного авторами работы [11], заключающегося в том, что наноструктурирование поверхности и нанесение наноструктурных покрытий приводит к увеличению макро- механических свойств всего материала в целом.

С другой стороны, в работе [12], обнаружено, что облучение поверхности трубки из сплава  $Zr_1Nb$  ионами гелия с энергией 2 кэВ вызывает переориентацию зерен, подобную происходящей при полной рекристаллизации. Это свидетельствует, по мнению авторов, о распространении в теле оболочки трубы упругих волн, возникающих в поверхностном слое при торможении ионов. Т.е. в определенных режимах обработки ионами происходят структурные изменения по всей глубине стенки трубки, которые изменяют механические свойства образцов.

При использовании вакуумно-дугового способа для нанесения покрытий поверхность деталей, как правило, подвергается предварительной обработке потоками металлических ионов с энергией  $\sim 1 - 2$  кэВ и сопровождается в процессе осаждения бомбардировкой ионами более низких энергий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показана перспективность использования метода ионно-плазменной обработки для улучшения механических свойств твэльных трубок из сплава  $Zr1Nb$ . При этом увеличиваются как поверхностные, так и объемно-прочностные свойства трубок. Осаждение ионно-плазменных покрытий приводит к увеличению предела прочности  $\sigma_b$  до 21%, а ионная имплантация – к увеличению предела текучести  $\sigma_{0,2}$  до 16%.

2. Полученные ионно-плазменные конденсаты толщиной  $d \sim 5$  мкм обладают высокой твердостью ( $H$ ) и модулем упругости ( $E$ ). Максимальная твердость на поверхности образцов из сплава  $Zr1Nb$  (45 ГПа) получена при осаждении наноструктурного покрытия  $Ti_{77,9}Al_{19,2}Si_{2,7}N$ .

3. Имплантация полиэнергетических ионов  $Mo^+$  и  $Zr^+$  приводит к увеличению твердости поверхности в  $2,5 \div 3$  раза и росту модуля упругости на  $20 \div 30\%$  (до  $120 \div 140$  ГПа). Глубина упрочненного слоя достигает 200 нм.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Солонин М.И., Решетников Ф.Г., Иолтуховский А.Г., Никулина А.В. Новые конструкционные материалы активных зон ядерных энергетических установок//ФизХОМ. – 2001. – № 4. – С. 17-27.
2. Baeck J.H., Park K.B., Jeong Y.H. Oxidation kinetics of zircaloy-4 and Zr-1 Nb-1Sn-0,1Fe of temperature of 700 – 1200°//Journ. of Nucl. Mat. – 2004. – Vol. 340, No. 3. – P.443-456.
3. Park J.Y., Choi B.K., Jeong Y.H., Jung Y.H. Corrosion behavior of Zr alloys with a high Nb content//Journ. of Nucl. Mat. – 2005. – Vol. 335, No. 2-3. – P.237-246.
4. Peng D.Q., Bai X.D., Pan F., Sun H., Chen B.S. Surface analysis of Zircaloy-2 implanted with carbon before and after oxidation in air at 500°C //Materials Characterization. – 2006. – Vol. 56, Issue 2. – P. 112-120.
5. Белоус В.А., Карасева Е.В., Носов Г.И., Соколенко В.И., Хороших В.М., Толмачева Г.Н. Влияние имплантации ионов  $Al^+$ ,  $Mo^+$ ,  $Zr^+$  на механические свойства циркониевого сплава  $Zr_1Nb$ //Сб. тр. LI Междунар. конф. “Актуальные проблемы прочности” (Харьков, Украина). – 2011. – С.73.

6. Sung J.H., Kim T.H., Kim S.S. Fretting damage of TiN coated zircaloy-4 tube//Wear. – 2001. – Vol. 250, Issues 1-12. – P. 658-664.
7. Белоус В.А., Леонов С.А., Носов Г.И., Хороших В.М., Ломино Н.С., Толмачева Г.Н., Бровина М.А., Ермоленко И.Г. Модификация поверхности сплава Э110 осаждением многослойных Zr/ZrN покрытий и ионным облучением//Физическая инженерия поверхности. – 2009. – Т. 7, № 1-2. – С.76-81.
8. Аксёнов И.И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005. – 212 с.
9. Латифенко В.А.. Диагностика жесткости и прочности материалов. – Рига.: Зинатне, 1968. – 319 с.
10. Екобори Т. Физика и механика разрушения и прочности твёрдых тел. – М.: Металлургия, 1971. – 264 с.
11. Панин В.Е., Сергеев В.П., Панин А.В., Почивалов Ю.И. Наноструктурирование поверхностных слоёв и нанесение наноструктурных покрытий – эффективный способ упрочнения современных конструкционных и инструментальных материалов//Физика металлов и металловедение. – 2007. – Т. 104, № 6. – С. 650-660.
12. Перлович Ю.А., Исаенкова М.Г., Грехов М., Крымская О.А., Польский В.И. Изменение текстуры и структуры в объеме оболочечных труб из Zr-сплавов при поверхностной ионно-плазменной обработке//Тр. XIX междунар. конф. по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению (Алушта). – 2010. – С. 125-126.
13. Левенец В.В., Омельник А.П., Щур А.А., Белоус В.А., Носов Г.И. Применение реакции  $^{27}\text{Al}(p, g)^{28}\text{Si}$  для исследования градиентных материалов на основе циркония//Физика и химия обработки материалов. – 2007. – № 2. – С. 12-16.
4. Peng D.Q., Bai X.D., Pan F., Sun H., Chen B.S. Surface analysis of Zircaloy-2 implanted with carbon before and after oxidation in air at 500°C //Materials Characterization. – 2006. – Vol. 56, Issue 2. – P. 112-120.
5. Belous V.A., Karaseva E.V., Nosov G.I., Sokolenko V.I., Horoshih V.M., Tolmacheva G.N. Vliyanie implantacii ionov  $\text{Al}^+$ ,  $\text{Mo}^+$ ,  $\text{Zr}^+$  na mehanicheskie svoystva cirkonievogo splava Zr<sub>1</sub>Nb//Sb. tr. LI Mezhdunar. konf. "Aktualnye problemy prochnosti" (Har'kov, Ukraina). – 2011. – S.73.
6. Sung J.H., Kim T.H., Kim S.S. Fretting damage of TiN coated zircaloy-4 tube//Wear. – 2001. – Vol. 250, Issues 1-12. – P. 658-664.
7. Belous V.A., Leonov S.A., Nosov G.I., Horoshih V.M., Lomino N.S., Tolmacheva G.N., Brovina M.A., Ermolenko I.G. Modifikaciya poverhnosti splava E110 osazhdeniem mnogoslujnyh Zr/ZrN pokrytij i ionnym oblucheniem//Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti. – 2009. – Т. 7, № 1-2. – С.76-81.
8. Aksenov I.I. Vakuumnaya duga v erozionnyh istochnikah plazmy. – Harkov: NNC HFТИ, 2005. – 212 s.
9. Latishenko V.A.. Diagnostika zhestkosti i prochnosti materialov. – Riga.: Zinatne, 1968. – 319 s.
10. Ekobori T. Fizika i mehanika razrusheniya i prochnosti tverdyh tel. – M.: Metallurgiya, 1971. – 264 s.
11. Panin V.E., Sergeev V.P., Panin A.V., Pochivalov Yu.I. Nanostrukturirovanie poverhnostnyh sloev i nanesenie nanostrukturnyh pokrytij – effektivnyj sposob uprochneniya sovremennyh konstrukcionnyh i instrumental'nyh materialov//Fizika metallov i metallovedenie. – 2007. – Т. 104, № 6. – С.650-660.
12. Perlovich Yu.A., Isaenkova M.G., Grehov M.M., Krymskaya O.A., Pol'skij V.I. Izmenenie tekstury i struktury v ob'eme obolochecnyh trub iz Zr-splavov pri povernostnoj ionno-plazmennoj obrabotke//Тр. XIX mezhdunar. konf. po fizike radiacionnyh yavlenij i radiacionnomu materialovedeniyu (Alushta). – 2010. – S. 125-126.
13. Levenec V.V., Omelnik A.P., Schur A.A., Belous V.A., Nosov G.I. Primenenie reakcii  $^{27}\text{Al}(p, g)^{28}\text{Si}$  dlya issledovaniya gradientnyh materialov na osnove cirkoniya//Fizika i ximiya obrabotki materialov. – 2007. – № 2. – S. 12-16.

## LITERATURA

1. Solonin M.I., Reshetnikov F.G., Ioltuhovskij A.G., Nikulina A.V. Novye konstrukcionnye materialy aktivnyh zon yadernyh energeticheskikh ustanovok//FizHOM. – 2001. – № 4. – С. 17-27.
2. Baeck J.H., Park K.B., Jeong Y.H. Oxidation kinetics of zircaloy-4 and Zr-1 Nb-1Sn-0,1Fe of temperature of 700 – 1200°//Journ. of Nucl. Mat. – 2004. – Vol. 335, No. 3. – P.443-456.
3. Park J.Y., Choi B.K., Jeong Y.H., Jung Y.H. Corrosion behavior of Zr alloys with a high Nb content//Journ. of Nucl. Mat. – 2005. – Vol. 340, No. 2-3. – P. 237-246.