

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)_x, (Zr + ZrN)_x и многокомпонентные наноструктурные TiAlN, TiAlSiN, TiAlYN покрытия. Ряд образцов был облучен ионами Zr⁺, Mo⁺, N₂⁺ и O₂⁺. После ИПО образцы подвергались испытаниям на растяжение. Осаждение упрочняющих ионно-плазменных покрытий приводит к увеличению предела прочности σ_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)_x, (Zr + ZrN)_x і багаткомпонентні наноструктурні TiAlN, TiAlSiN, TiAlYN покриття. Ряд зразків були імплантовані іонами Zr⁺, Mo⁺, N₂⁺ і O₂⁺. Після ІПО зразки піддавалися випробуванням на розтягування. Осадження зміцнюючих іонно-плазмових покриттів призводить до збільшення межі міцності σ_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)_x, (Zr + ZrN)_x, and multicomponent nanostructured TiAlN, TiAlSiN, TiAlYN coatings. A series of samples was implanted by ions Zr⁺, Mo⁺, N₂⁺ and O₂⁺. After IPT, the samples were tested in tension. Deposition of ion-plasma coatings increases the tensile strength σ_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 Zr₁Nb.

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/см².

Нанотвёрдость (H) и модуль Юнга (E) осажденных конденсатов и имплантированных слоев измеряли с помощью прибора Nanoindenter 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).

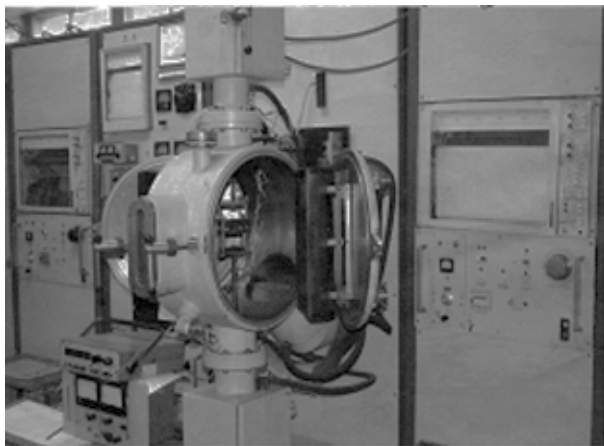


Рис. 2. Общий вид установки 1246P-2/2300.

Из полученных диаграмм растяжения при скорости 1 мм/мин определялись предел прочности σ_B , условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, общее δ_5 и равномерное δ_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 σ_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.

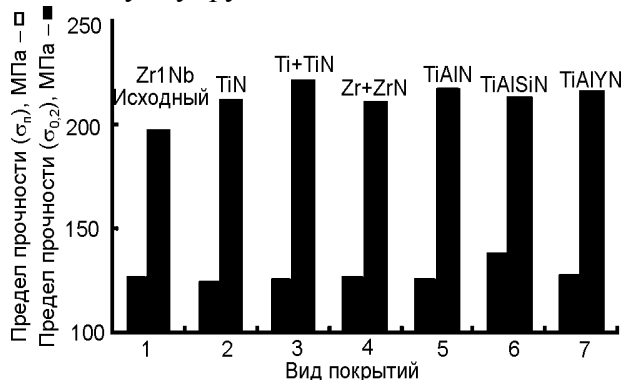


Рис. 3. Зависимость предела прочности σ_B (\square) и условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ (\circ) образцов от вида ионно-плазменных покрытий: 1 – исходный образец; 2 – TiN; 3 – $(Ti + TiN)_x$; 4 – $(Zr + ZrN)_x$; 5 – TiAlN; 6 – TiAlSiN; 7 – TiAlYn. Температура испытаний $T = 350$ °С.

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

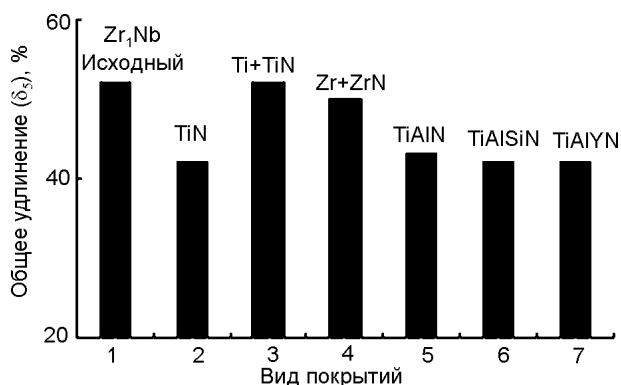


Рис. 4. Зависимость общего удлинения δ_5 от вида ионно-плазменных покрытий: 1 – исходный образец; 2 – TiN; 3 – $(Ti + TiN)_x$; 4 – $(Zr + ZrN)_x$; 5 – TiAlN; 6 – TiAlSiN; 7 – TiAlYn. Температура испытаний $T = 350$ °С.

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 δ_5 несколько уменьшилось. Равномерное относительное удлинение δ_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 ϵ_θ -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⁺ и Zr⁺ и газовыми ионами N₂⁺ и O₂⁺ 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

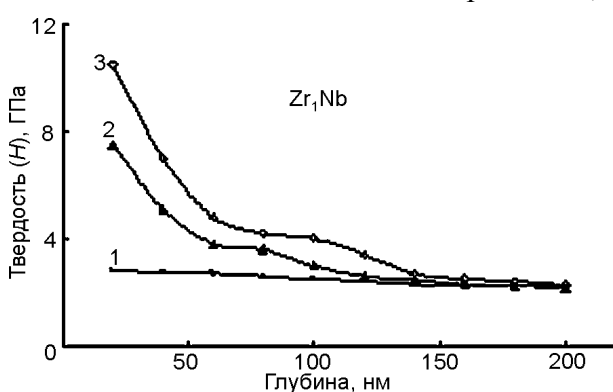


Рис. 5. Зависимость твердости от глубины индентирования сплава Zr1Nb исходного (1) и облученного ионами Mo⁺ (2) и Zr⁺ (3) с энергией 15 ÷ 60 кэВ, доза 10¹⁸ ион/см².

÷ 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 Zr₁Nb 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 σ_b для всех облученных образцов остался практически неизменным.

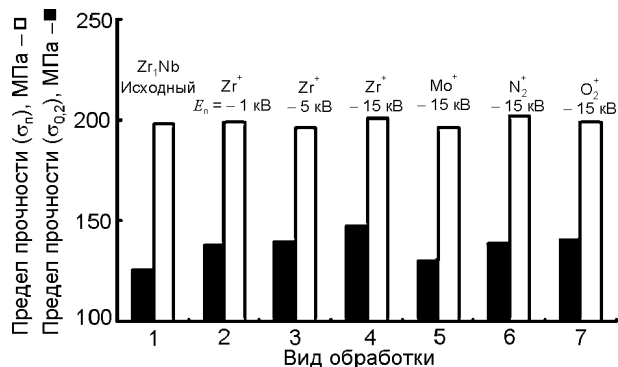


Рис. 6. Зависимость предела прочности σ_b (□) и условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ (■) образцов после облучения от вида и энергии ионов. Температура испытаний $T = 350$ °С.

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 δ_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.

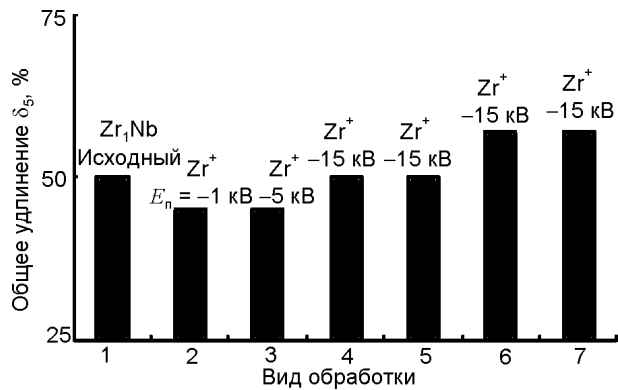


Рис. 7. Зависимость величины общего удлинения δ_5 при растяжении образцов после облучения от вида и энергии ионов. Температура испытаний $T = 350$ °С.

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 σ_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 поперечной 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. Vliyaniye implantacii ionov Al^+ , Mo^+ , Zr^+ na mehanicheskie svoystva cirkonievogo splava Zr₁Nb//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 obolochechnyh 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.