

УДК 532.73:[669.296:621.785.532]

КІНЕТИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ АЗОТУВАННЯ СПЛАВУ Zr–1% Nb

В. С. ТРУШ¹, І. М. ПОГРЕЛЮК¹, Т. М. КРАВЧИШИН¹,
О. Г. ЛУК'ЯНЕНКО¹, П. І. СТОЄВ², В. М. ФЕДІРКО¹, І. В. КОВАЛЬЧУК¹

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Інститут фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій
ННЦ "ХФТ" НАН України, Харків

Досліджено кінетику азотування ($P_{N_2} = 10^5$ Па) тонколистових зразків (~ 1 mm) зі сплаву Zr–1% Nb у широкому температурному ($T = 550; 650; 750; 850$ і 950°C) та часовому ($\tau = 1; 5$ і 10 h) діапазонах. Виявлено, що азотування відбувається за законом, наближеним до параболического ($n \approx 2$). Встановлено, що енергія активації азотування сплаву в інтервалі $550\text{...}950^\circ\text{C}$ становить $131,8$ kJ/mol. Оцінено мікроструктуру приповерхневого шару сплаву після азотування, а також розподіл його приповерхневої твердості. Побудовано діаграму інтенсивності рефлексів фаз α -Zr і ZrN на поверхні сплаву після азотування.

Ключові слова: сплав Zr–1%Nb, азотування, приповерхневий шар, мікроструктура, кінетика зміни маси, мікротвердість, параметри кристалічної ґратки.

The kinetic characteristics of thin-sheet (~ 1 mm) samples from the Zr–1% Nb alloy after treatment in a nitrogen medium ($P_{N_2} = 10^5$ Pa) in a wide temperature ($T = 550; 650; 750; 850$ and 950°C) and time ($\tau = 1; 5$ and 10 h) ranges are investigated. It is determined that the nitriding of the alloy under study occurs according to a rule close to parabolic ($n \approx 2$). It has been established that the activation energy of nitriding of the alloy in the temperature range of $550\text{...}950^\circ\text{C}$ is 131.8 kJ/mol. The microstructure of the near-surface layer of the alloy after nitriding is given. The distribution of near-surface microhardness on the Zr–1% Nb alloy is proposed. The diagram of the phases reflexes intensity of α -Zr and ZrN on the surface of the alloy after treatment in a nitrogen gaseous medium is presented.

Keywords: Zr–1% Nb alloy, nitriding, surface layer, microstructure, mass change kinetics, microhardness, crystal lattice parameters.

Вступ. Цирконієві сплави з різними легувальними додатками володіють поліпшеними механічними та міцнісними властивостями, підвищеною корозійною тривкістю під час експлуатації у воді високих параметрів за інтенсивного нейтронного опромінення [1–3]. Їх використовуватимуть і в нових типах реакторів за підвищених температур експлуатації тепловидільних елементів, щоб збільшити ступінь вигорання ядерного палива і тривалість експлуатації цирконієвих оболонок [4, 5]. Водночас на можливість їх застосування суттєво впливають елементи проникнення – азот та кисень [6–10]. Однак у деяких випадках дозоване об'ємне легування елементами проникнення [11–15] неможливо застосувати до готових виробів. Поліпшити їх експлуатаційні властивості можна, формуючи різними методами модифіковані шари [16, 17]. Адже структурно-фазовий стан приповерхневого шару значно впливає на функціональні характеристики цирконієвих виробів, особливо виготовлених з тонкостінного матеріалу (до ~ 3 mm). Елементи проникнення (азот та кисень) перебувають у твердому розчині в сплавах цирконію і титану та посилюють опір термічній та радіаційній повзучості, підвищують втомну довговічність, границі міцності та жаротривкості [18–23]. Перспективне для ке-

рування структурно-фазовим станом приповерхневого шару дифузійне насичення з контрольованого газового середовища. Тому сьогодні інтенсивно розробляють способи хіміко-термічної обробки (ХТО) сплаву Zr–1% Nb, щоб забезпечити високі експлуатаційні характеристики виробів.

Мета дослідження – встановити кінетику азотування сплаву Zr–1% Nb у газоподібному азоті ($P_{N_2} = 10^5$ Pa) за температур 550; 650; 750; 850 і 950°C упродовж 1; 5 і 10 h та його вплив на властивості поверхні та приповерхневого шару металу.

Матеріал та методика. Випробовували зразки, вирізані механічно з тонкого листа (~ 1 mm) сплаву (98,97 mass% Zr; 1,03 Nb) українського виробництва (ТУ 001.257-85) після ХТО в азоті. Приріст маси визначали, зважуючи зразки на вагах OHAUS Voyager V 10640, які забезпечують похибку вимірювання $\pm 0,0001$ g. Мікротвердість та її розподіл по перетину зразків встановлювали приладом ПМТ-3М за навантаження 0,49 N. Мікроструктуру приповерхневого шару досліджували на “скісних” шліфах, використовуючи мікроскоп “Eriquant” зі системою візуалізації зображення. Для виявлення структури після різних режимів ХТО сплав травили реактивом: 1 vol. part HF (флуоридна кислота) + 1 vol. part HNO₃ (нітратна кислота) + 3 vol. part C₃H₅(OH)₃ (гліцерин). Перетравлені шліфи висвітлювали реактивом: 5 ml HF (флуоридна кислота) + 95 ml HNO₃ (нітратна кислота). Шорсткість поверхні вимірювали профілометром 176021, який відповідає типу II (ступінь точності 2 за ГОСТ 19300-86).

Параметри ґратки та фазовий склад поверхневих шарів металу визначали на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3.0 у монохроматичному CuK_α-випромінюванні з фокусуванням трубки за схемою Бреґга–Брентано. Напруга на аноді рентгенівської трубки 30 kV за струму 20 mA. Сканували з кроком 0,05°. Використовували пакети програмного забезпечення FullProfSuite, за допомогою яких виконували Фур’є-обробку дифрактограм, фіксували місця дифракційних максимумів відбиття та періоди ґраток, ідентифікованих за даними картотеки JCPDS–ASTM фаз.

Результати та їх обговорення. Після термооброблення сплаву в азоті питомий приріст маси прямо пропорційно залежить як від часу, так і від температур насичення (табл. 1; рис. 1).

Таблиця 1. Питомий приріст маси ($\Delta M / S$, $\mu\text{g}/\text{mm}^2$) зразків зі сплаву Zr–1% Nb залежно від температури та тривалості азотування за тиску $P_{N_2} = 10^5$ Pa

T, °C	T, K	$(\Delta M / S) \pm \sigma, \mu\text{g}/\text{mm}^2$				
		τ, min показник	0	60	300	600
550	823	$\Delta M / S$	0	0,165609	0,289720	0,421404
		$\pm\sigma$	0	0,117655	0,429319	0,334230
650	923	$\Delta M / S$	0	0,350778	0,799802	1,361710
		$\pm\sigma$	0	0,162143	0,256462	0,321199
750	1023	$\Delta M / S$	0	0,518433	0,955161	2,029953
		$\pm\sigma$	0	0,115207	0,389932	0,538308
850	1123	$\Delta M / S$	0	1,882173	3,698168	5,951948
		$\pm\sigma$	0	0,492178	0,562390	0,771349
950	1223	$\Delta M / S$	0	3,863226	7,193399	10,546580
		$\pm\sigma$	0	0,417977	0,572849	0,729334

Рис. 1. Кінетичні криві та рівняння апроксимації зміни питомого приросту маси зразками зі сплаву Zr-1% Nb за тиску азоту 10^5 Pa залежно від температури:
 1 – 550°C, $\Delta M/S = 0,0322 \cdot \tau^{0,3954}$, $R^2 = 0,9875$;
 2 – 650°C, $\Delta M/S = 0,0325 \cdot \tau^{0,5755}$, $R^2 = 0,9896$;
 3 – 750°C, $\Delta M/S = 0,05 \cdot \tau^{0,5553}$, $R^2 = 0,9203$;
 4 – 850°C, $\Delta M/S = 0,6613 \cdot \tau^{0,4247}$, $R^2 = 0,9842$;
 5 – 950°C, $\Delta M/S = 0,6613 \cdot \tau^{0,4247}$, $R^2 = 0,9921$.

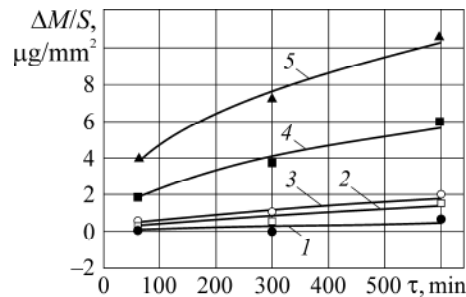


Fig. 1. Kinetic curves and approximation equations of specific weight gain changes of Zr-1% Nb alloy samples at a nitrogen pressure of 10^5 Pa depending on temperature:
 1 – 550°C, $\Delta M/S = 0.0322 \cdot \tau^{0.3954}$, $R^2 = 0.9875$; 2 – 650°C, $\Delta M/S = 0.0325 \cdot \tau^{0.5755}$, $R^2 = 0.9896$;
 3 – 750°C, $\Delta M/S = 0.05 \cdot \tau^{0.5553}$, $R^2 = 0.9203$; 4 – 850°C, $\Delta M/S = 0.6613 \cdot \tau^{0.4247}$, $R^2 = 0.9842$;
 5 – 950°C, $\Delta M/S = 0.6613 \cdot \tau^{0.4247}$, $R^2 = 0.9921$.

За формулою $(\Delta M/S)^n = k \times t \rightarrow \Delta M/S = (k \times t)^{1/n}$ розраховували степеневий показник закону азотування (n) сплаву за відповідної температури, а за кінетичними залежностями (рис. 1) – його ступінь (табл. 2).

Вважали (табл. 2), що азотування сплаву відбувається за законом, наближеним до параболічного ($n \approx 2$) (рис. 2). Після аналітичних розрахунків отримали значення константи параболічної швидкості процесу залежно від температури (табл. 3).

За законом Арреніуса $k_p = A \times \exp(-E/RT)$ визначили енергію активації азотування сплаву за зміною константи параболічної швидкості від оберненої температури (рис. 3).

Таблиця 2. Визначення степеневого показника в законі азотування сплаву Zr-1% Nb залежно від температури

T, °C	1/n	n
550	0,3954	2,53
650	0,5753	1,74
750	0,5553	1,80
850	0,4858	2,06
950	0,4274	2,34

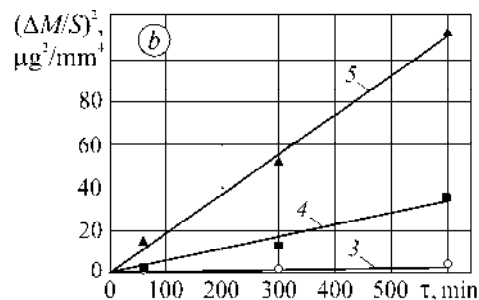
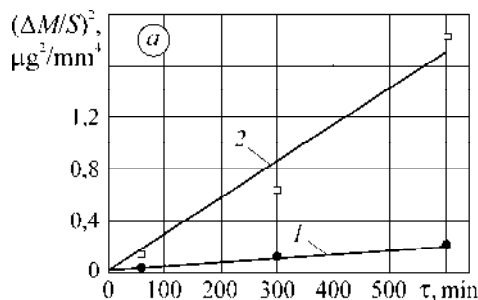


Рис. 2. Криві та рівняння апроксимації квадратичної залежності зміни питомого приросту маси зразками сплаву Zr-1% Nb внаслідок азотування за тиску газоподібного азоту 10^5 Pa від температури (a): 1 – 550°C, $(\Delta M/S)^2 = 0,0003 \cdot \tau$, $R^2 = 0,9938$;
 2 – 650°C, $(\Delta M/S)^2 = 0,0029 \cdot \tau$, $R^2 = 0,9681$; b): 3 – 750°C, $(\Delta M/S)^2 = 0,0061 \cdot \tau$, $R^2 = 0,9020$;
 4 – 850°C, $(\Delta M/S)^2 = 0,0564 \cdot \tau$, $R^2 = 0,9829$; 5 – 950°C, $(\Delta M/S)^2 = 0,1833 \cdot \tau$, $R^2 = 0,9963$).

Fig. 2. Curves and approximation equations of squared dependence of the change in the specific weight gain of the Zr-1% Nb alloy samples as a result of nitriding at a nitrogen gas pressure of 10^5 Pa depending on temperature (a): 1 – 550°C, $(\Delta M/S)^2 = 0.0003 \cdot \tau$, $R^2 = 0.9938$;
 2 – 650°C, $(\Delta M/S)^2 = 0.0029 \cdot \tau$, $R^2 = 0.9681$; b): 3 – 750°C, $(\Delta M/S)^2 = 0.0061 \cdot \tau$, $R^2 = 0.9020$;
 4 – 850°C, $(\Delta M/S)^2 = 0.0564 \cdot \tau$, $R^2 = 0.9829$; 5 – 950°C, $(\Delta M/S)^2 = 0.1833 \cdot \tau$, $R^2 = 0.9963$).

Отже, енергія активації азотування сплаву за тиску азоту 10^5 Pa в інтервалі 550...950°C становить 131,8 kJ/mol. Через розчинення азоту у приповерхневому

Таблиця 3. Зміна константи параболічної швидкості (k_p) азотування сплаву Zr-1% Nb залежно від температури

$T, ^\circ\text{C}$	T, K	$1000 / RT$	k_p
550	823	0,146142	0,0003
650	923	0,130308	0,0029
750	1023	0,117571	0,0061
850	1123	0,107101	0,0281
950	1223	0,098344	0,1833

шарі змінюється структура металу (рис. 4). ДюрOMETричним та профілометричним методами встановили твердість і шорсткість поверхні та приповерхневого шару сплаву після азотування (табл. 4; рис. 5). Згідно з отриманими результатами зі зростанням температури та тривалістю витримки в азоті твердість і шорсткість поверхні, а також розмір зміцненого шару збільшуються, що корелює з кінетичними залежностями зміни маси (див. рис. 1). Це пояснюють тим, що з підвищенням температури в сплаві зростають реакційна активність та дифузійна рухливість азоту.

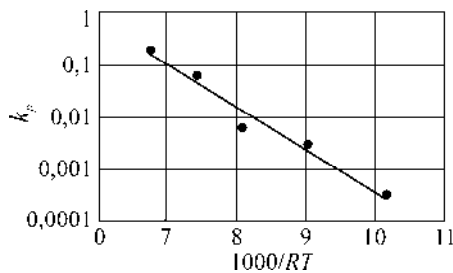


Рис. 3. Визначення енергії активації азотування сплаву Zr-1% Nb за зміною константи параболічної швидкості (k_p) азотування від оберненої температури:

$$k_p = 64671 \times e^{(-131800/RT)}, R^2 = 0,9766.$$

Fig. 3. Determination of the activation energy of the Zr-1% Nb alloy nitriding according to the change in the parabolic rate constant (k_p) of nitriding on the inverse temperature:

$$k_p = 64671 \times e^{(-131800/RT)}, R^2 = 0.9766.$$

Таблиця 4. Характеристики поверхні ($HV_{0,49}$, R_a) та розмір зміцненого шару (l) зразків зі сплаву Zr-1% Nb залежно від температури азотування

$T, ^\circ\text{C}$	Твердість $HV_{0,49}$, шорсткість поверхні R_a та розмір зміцненого шару l	Тривалість оброблення, h		
		1	5	10
550	$HV_{0,49}$	215 ± 10	220 ± 10	245 ± 25
	$R_a, \mu\text{m}$	0,061	0,047	0,044
	$l, \mu\text{m}$	0...2	4...6	10...13
650	$HV_{0,49}$	250 ± 10	350 ± 15	435 ± 15
	$R_a, \mu\text{m}$	0,049	0,080	0,125
	$l, \mu\text{m}$	4...6	7...11	16...20
750	$HV_{0,49}$	450 ± 45	720 ± 70	970 ± 50
	$R_a, \mu\text{m}$	0,327	0,535	0,582
	$l, \mu\text{m}$	13...17	38...42	53...58
850	$HV_{0,49}$	1015 ± 60	1155 ± 60	1300 ± 670
	$R_a, \mu\text{m}$	0,595	0,603	0,656
	$l, \mu\text{m}$	47...53	62...67	100...110
950	$HV_{0,49}$	1670 ± 100	1743 ± 80	1635 ± 100
	$R_a, \mu\text{m}$	0,387	0,483	0,745
	$l, \mu\text{m}$	210...220	550...570	630...660

За даними про розмір зміцненого шару обчислювали ефективний коефіцієнт дифузії азоту D_{ef} (m^2/s) в сплаві у діапазоні $550...950^\circ C$: $D_{ef} = D_0 \times \exp(-E/RT)$, де $D_0 = (0,000126 \pm 0,000046) m^2/s$, $E = (164,815 \pm 4,320) kJ/mol$.

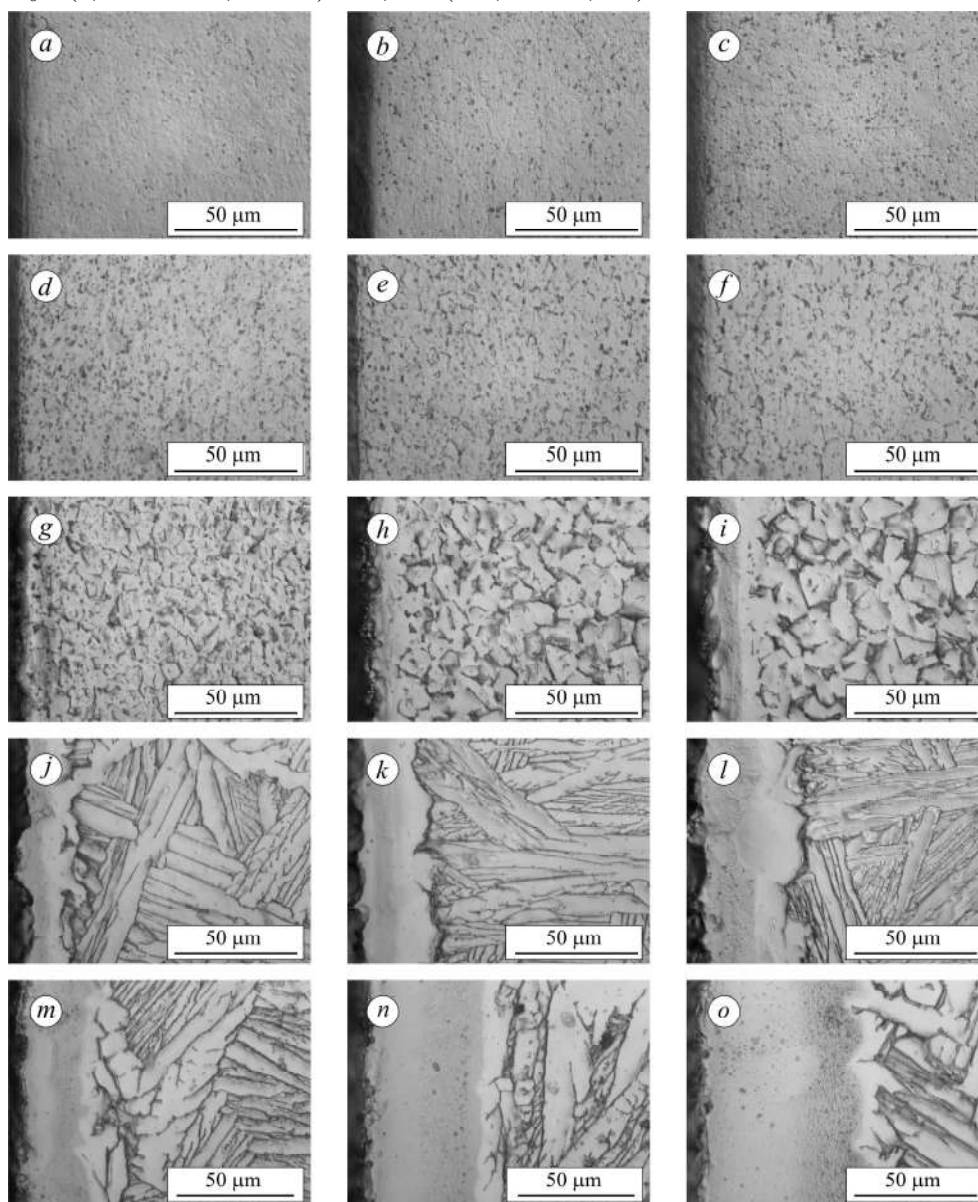


Рис. 4. Структура приповерхневого шару сплаву Zr-1% Nb після оброблення в азоті за тиску $P_{N_2} = 10^5$ Па при $550^\circ C$ (a-c); $650^\circ C$ (d-f); $750^\circ C$ (g-i); $850^\circ C$ (j-l); $950^\circ C$ (m-o) за витримки 1 h (a, d, g, j, m); 5 (b, e, h, k, n) і 10 (c, f, i, l, o).

Fig. 4. Structure of the near-surface layer of Zr-1% Nb alloy after treatment in the nitrogen environment at a pressure of $P_{N_2} = 10^5$ Pa at $550^\circ C$ (a-c); $650^\circ C$ (d-f); $750^\circ C$ (g-i); $850^\circ C$ (j-l); $950^\circ C$ (m-o) under exposure 1 h (a, d, g, j, m); 5 (b, e, h, k, n) and 10 (c, f, i, l, o).

Дифрактограми, зняті з поверхні азотованих зразків, свідчать, що з підвищенням температури та з тривалістю насичення в азоті, з одного боку, зменшується інтенсивність рефлексів фази α -Zr, а з іншого – зростає інтенсивність рефлексів фаз ZrN та Zr₂N (рис. 5). Це пов'язано зі збільшенням товщини шару нітрідів ZrN і Zr₂N, через що зростає їх екранувальний ефект для підшару α -Zr.

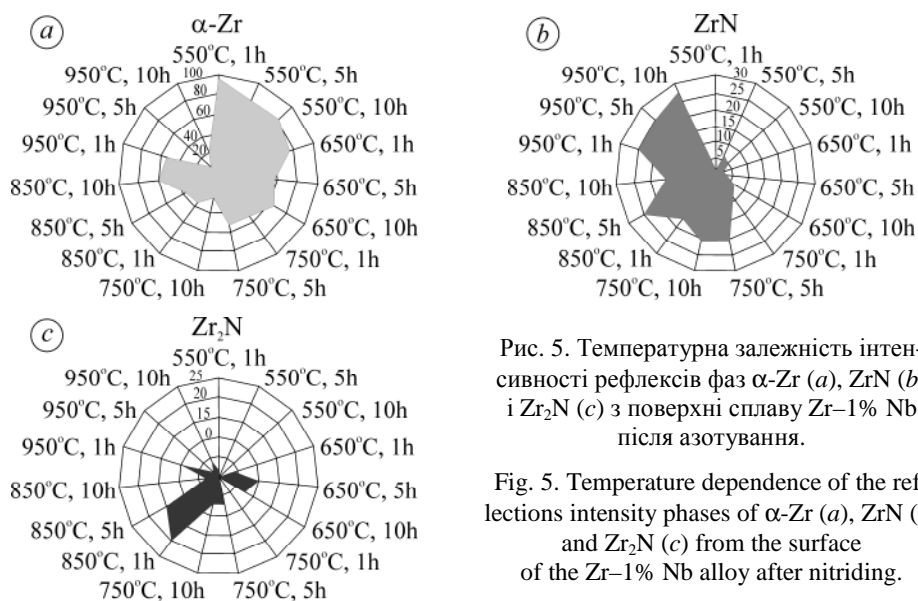


Рис. 5. Температурна залежність інтенсивності рефлексів фаз α -Zr (a), ZrN (b) і Zr_2N (c) з поверхні сплаву Zr–1% Nb після азотування.

Fig. 5. Temperature dependence of the reflections intensity phases of α -Zr (a), ZrN (b) and Zr_2N (c) from the surface of the Zr–1% Nb alloy after nitriding.

Згідно з результатами рентгенофазових досліджень, рефлекси фаз ZrN та Zr_2N на поверхні сплаву після азотування фіксують, починаючи з оброблення при 650°C упродовж 5 h. Тому можна припустити, що за нижчої температури нітриди цирконію (ZrN, Zr_2N) значної товщини не формуються.

ВИСНОВКИ

Досліджено кінетику азотування зразків сплаву Zr–1% Nb, вирізаних з тонколистового матеріалу (~ 1 mm), після дифузійного насичення в газоподібному азоті ($P_{N_2} = 10^5$ Pa) за 550; 650; 750; 850 і 950°C упродовж 1; 5 і 10 h. Встановлено, що азотування відбувається за законом, наближеним до параболічного. Енергія активації процесу в досліджуваному температурному інтервалі становить 131,8 kJ/mol. Виявлено відмінності мікроструктури приповерхневого шару сплаву після азотування залежно від температури та тривалості процесу. Визначено ефективний коефіцієнт дифузії азоту в сплаві у діапазоні 550...950°C: $D_{ef.} = (0,000126 \pm \pm 0,000046) \times \exp(-(164815 \pm 4320) / RT)$ m²/s. З ростом температури та зі збільшенням тривалості витримки в азоті товщина нітридного шару, твердість, шорсткість поверхні та розмір зміцненого дифузійного шару підвищуються. За температури, нижчої від 650°C, товстий шар нітридів цирконію (ZrN, Zr_2N) не виникає.

1. Cahn R. W., Haasen P., and Kramer E. J. Zirconium alloys in nuclear applications // Mat. Sci. and Techn. – 2006. 10.1002/9783527603978. DOI:10.1002/9783527603978.mst0111
2. Lemaignan C. and Motta A. T. Zirconium alloys in nuclear applications // Mat. Sci. and Techn. – 2006. – P. 2–51. DOI:10.1002/9783527603978.mst0111
3. Motta A. T., Couet A., and Comstock R. J. Corrosion of zirconium alloys used for nuclear fuel cladding // Annual Rev. of Mat. Res. – 2015. – 45. – P. 311–343.
4. Features of the mechanical behavior of fuel elements tubes of Zr–1%Nb under conditions simulating breakdown of cooling / O. M. Ivasishin, V. N. Voevodin, A. I. Dekhtyar, P. E. Markovsky, M. M. Pylypenko, S. D. Lavrinenko, and R. G. Gontareva // Problems of Atomic Sci. and Techn. – 2015. – № 5 (99). – P. 53–60.
5. Banerjee S. and Banerjee M. K. Nuclear applications: zirconium alloys // Reference Module in Mat. Sci. and Mat. Eng. – 2016. – P. 1–15. DOI:10.1016/B978-0-12-803581-8.02576-5
6. Creep flow and fracture behavior of the oxygen-enriched alpha phase in zirconium alloys / R. Chosson, A. F. Gourgues-Lorenzon, V. Vandenberghe, J. C. Brachet, and J. Crépin // Scripta Mat. – 2016. – 117. – P. 20–23.

7. Черняева Т. П., Стукалов А. И., Грицина В. М. Влияние кислорода на механические свойства циркония // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. – 2002. – № 1 (12). – С. 96–102.
8. Вахрушева В. С., Коленкова О. А., Сухомлин Г. Д. Влияние содержания кислорода на пластичность, повреждаемость и параметры акустической эмиссии металла труб из сплава Zr–1%Nb // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2005. – № 5 (88). – С. 104–109.
9. Tang Z. Z. Effect of nitrogen concentration to the structural, chemical and electrical properties of tantalum zirconium nitride films // *Ceramics Int.* – 2012. – № 38 (4). – P. 2997–3000. DOI:10.1016/j.ceramint.2011.11.07
10. Effect of nitrogen flow rate on structural and mechanical properties of zirconium tungsten nitride (Zr–W–N) coatings deposited by magnetron sputtering / P. Dubey, V. Arya, S. Srivastava, D. Singh, and R. Chandra // *Surf. and Coat. Techn.* – 2013. – **236**. – P. 182–187. DOI:10.1016/j.surfcoat.2013.09.04
11. Займовский А. С., Никулина А. В., Решетников Н. Г. Циркониевые сплавы в ядерной энергетике. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 252 с.
12. Ядерная энергетика: уч. пос. / Н. А. Азаренков, Л. А. Булавин, И. И. Залобовский, В. Г. Кириченко, И. М. Неклюдов, Б. А. Шилиев. – Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2012. – 536 с.
13. *Машиностроение*. Энциклопедия. Том IV-25: Машиностроение ядерной техники. В 2-х кн. Кн. 1. / Е. О. Адамов, Ю. Г. Драгунов, В. В. Орлов и др. / Под общ. ред. Е. О. Адамова. – М.: Машиностроение, 2005. – 960 с.
14. Gribaudo L., Arias D., and Abriata J. The N–Zr (Nitrogen–Zirconium) system // *J. of Phase Equilibria*. – 1994. – **15**, № 4. – P. 441–449.
15. Novel compounds in the Zr–O system, their crystal structures and mechanical properties / J. Zhang, A. R. Oganov, X. Li, H. Dong, and Q. Zeng // *Phys. Chem. Chem. Phys.* – 2015. – № 17 (26). – P. 17301–17310. DOI:10.1039/c5cp02252e
16. 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 // *Физ. инженерия поверхности*. – 2013. – **11**, № 1. – С. 97–102.
17. Влияние покрытий Cr, Cr–N и Cr–O_x на удержание и проникновение дейтерия в сплавы циркония Zr–1Nb / И. Е. Копанец, Г. Д. Толстолуцкая, А. В. Никитин, В. А. Белоус, А. С. Куприн, В. Д. Овчаренко, Р. Л. Василенко // *Вопросы атомной науки и техники*. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2015. – № 5 (99). – С. 81–86.
18. Trush V. S., Lukianenko O. H., Stoev P. I. Influence of modification of the surface layer by penetrating impurities on the long-term strength of Zr–1% Nb alloy // *Materials Science*. – 2020. – **55**, № 4. – P. 585–589. DOI:10.1007/s11003-020-00342-z
19. Fedirko V. N., Luk'yanenko A. G., and Trush V. S. Solid-solution hardening of the surface layer of titanium alloys. Part 2. Effect on metallographic properties // *Metal Sci. and Heat Treatment*. – 2015. – **56**, № 11. – P. 661–664. DOI: 10.1007/s11041-015-9818-1
20. Influence of thermochemical treatment on properties of tubes from Zr–1Nb alloy / V. S. Trush, V. N. Fedirko, A. G. Luk'yanenko, M. A. Tikhonovsky, and P. I. Stoev // *Problems of Atomic Sci. and Techn.* – 2018. – № 114 (2). – P. 70–75.
21. Topography, hardness, elastic modulus and wear resistance of nitride on titanium / I. M. Pohrelyuk, J. Padgurskas, S. M. Lavrys, A. G. Luk'yanenko, V. S. Trush, and R. Kreivaitis // *Proc. of BALTTTRIB'2017* / Ed. by prof. J. Padgurskas. – P. 41–46. DOI:10.15544/baltrib.2017.09
22. Influence of thermochemical treatment on the oxidation of fuel cladding tubes made of Zr–1%Nb alloy / V. M. Voyevodin, V. M. Fedirko, V. S. Trush, O. H. Luk'yanenko, P. I. Stoev, V. A. Panov, M. A. Tykhonovsky // *Materials Science*. – 2021. – **56**, № 4. – P. 509–515. DOI:10.1007/s11003-021-00457-x
23. Effect of thermochemical treatment in regulated gas media on the thermal resistance of Zr–1%Nb alloy / V. M. Fedirko, O. H. Luk'yanenko, V. S. Trush, P. I. Stoev, M. A. Tykhonovskiy // *Materials Science*. – 2016. – **52**, № 2. – P. 209–215. DOI: 10.1007/s11003-016-9945-x

Одержано 27.01.2022