

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2026.03.074>

УДК 669.295/297:621.785

**В.С. Труш**, <https://orcid.org/0000-0002-2264-3918>

**О.Г. Лук'яненко**, <https://orcid.org/0000-0001-6642-2300>

**І.М. Погрелюк**, <https://orcid.org/0000-0002-3009-2829>

**В.М. Федірко**, <https://orcid.org/0000-0002-4337-1691>

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів, Україна  
E-mail: trushvasyl@gmail.com

## Підвищення працездатності виробів з металів IV групи (Ti, Zr, Hf) та їхніх сплавів методами хіміко-термічної обробки

*Представлена членом-кореспондентом НАН України М.С. Хомою*

*Покращено експлуатаційні властивості тонкостінних виробів зі сплавів на основі титану, цирконію та гафнію шляхом модифікування їхніх приповерхневих шарів дифузійним насиченням киснем. За результатами аналізу масиву експериментальних даних визначено концентраційні профілі кисню в металах IV групи (Ti, Zr, Hf) та їхніх сплавах залежно від температурно-часових і газодинамічних параметрів насичення. Побудовано номограми для визначення параметрів оброблення з огляду на формування регламентованого (відносного приросту мікротвердості поверхні та розміру зміщеного шару) модифікованого приповерхневого шару або досяжної межі втоми.*

**Ключові слова:** титан, цирконій, гафній, хіміко-термічна обробка, приповерхневий шар, мікротвердість, втомна довговічність.

**Вступ.** Запорукою стрімкого розвитку високотехнологічних галузей (авіація, атомна енергетика і хімічне машинобудування) є використання металів IV групи (титану, цирконію й гафнію) та їхніх сплавів [1—4]. Невід'ємною умовою збільшення ресурсу тонкостінних елементів обладнання під час їх використання є підвищення довговічності за тривалих циклічних та статичних навантажень, що значною мірою залежить від структурно-фазового стану їхнього приповерхневого шару. Звідси підвищені вимоги до характеристик приповерхневих шарів матеріалів, що передбачає розроблення новітніх або удосконалення відомих методів їх оброблення [5—7].

---

Ц и т у в а н н я: Труш В.С., Лук'яненко О.Г., Погрелюк І.М., Федірко В.М. Підвищення працездатності виробів з металів IV групи (Ti, Zr, Hf) та їхніх сплавів методами хіміко-термічної обробки. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2026. № 3. С. 74—83. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2026.03.074>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2026. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Дифузійне насичення елементами втілення (киснем, азотом, вуглецем) прийнято вважати одним із ефективних методів керування, зокрема, структурно-фазовим станом та мікротвердістю, а відтак і фізико-механічними характеристиками [8—11]. Однак наявні у науково-технічній літературі дані орієнтовані на дослідження впливу об'ємного легування елементами втілення на експлуатаційні властивості, що унеможливує їх застосування до готових виробів. Тому постає проблема встановлення кореляційних залежностей між параметрами дифузійного насичення (тривалість, температура тощо) та характеристиками приповерхневого шару (мікротвердість, глибина модифікованого шару) та ресурсними характеристиками.

**Мета** дослідження — встановити закономірності впливу дифузійного насичення киснем металів IV групи (Ti, Zr, Hf) та їхніх сплавів на характеристики модифікованих приповерхневих шарів і підвищити працездатність тонкостінних виробів з них за циклічних навантажень.

**Матеріали та методи.** Для досліджень були вибрані промислові сплави на основі трьох металів IV групи — титану, цирконію та гафнію, а саме: тонколистовий (~1 мм) титан BT1-0, який належить до  $\alpha$ -сплавів, цирконієвий сплав Zr-1Nb та гафній марки ГФЕ-1 (табл. 1).

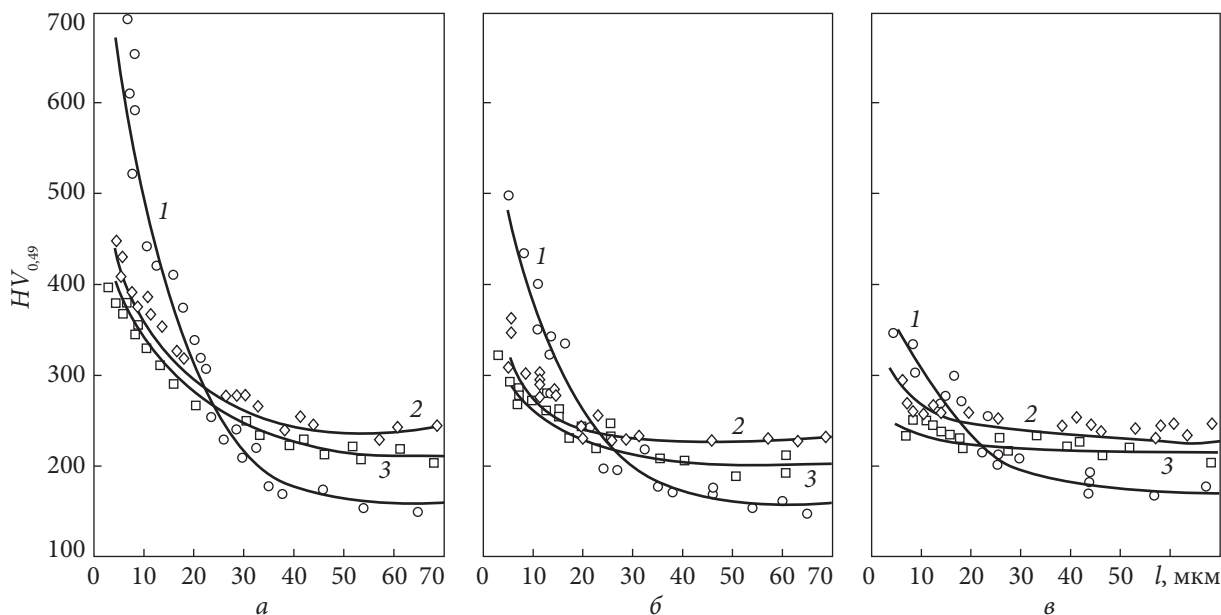
Модифіковані приповерхневі шари на зразках формували дифузійним насиченням у контрольованому кисневмісному газовому середовищі за температури ( $T$ ) 550—950 °С, тривалості ( $\tau$ ) 3—8 год, залишкового тиску газового середовища (повітря) ( $P$ )  $1,33 \cdot 10^{-3}$ — $1,33 \cdot 10^{-1}$  Па. Швидкість нагрівання становила  $\approx 200$  °С/год, а охолодження зразків відбувалося з піччю. Під час їх охолодження за температури 270 °С до камери печі напускали повітря для утворення тонкої оксидної плівки, яка запобігає насиченню металу воднем за нормальних атмосферних умов.

Металографічні дослідження зразків до та після модифікування приповерхневого шару киснем проводили за допомогою оптичної (“Epiquant”, “Neophot-2”), а фрактографічні — сканувальної електронної мікроскопії на мікроскопі EVO40XVP (“Carl Zeiss”, Німеччина).

Мікротвердість вимірювали приладом ПМТ-3М за навантаження 0,49 Н із поверхні і в серцевині зразків та на поперечних перерізах (для визначення розподілу мікротвердості за товщиною). Визначали середні значення 5—10 замірів на одному рівні. Для порівняння впливу хіміко-термічної обробки на мікротвердість поверхні аналізованих сплавів оперува-

Таблиця 1. Вміст легувальних елементів у досліджуваних сплавах, мас. %

BT1-0 (ГОСТ 19807-91)		Zr-1Nb (ТУ У 1.27-8-53-01)		ГФЕ-1 (ТУ У 14312708.183-95)	
Fe	<0,25	Nb	<1	Zr	<1,0
Si	<0,1	Cu	<0,0004	Ni	<0,2
Al	<0,7	Fe	<0,0005	Nb	<0,01
O	<0,20	Al	<0,0005	Mo	<0,01
H	<0,01	Ni	<0,0035	W	<0,01
N	<0,04	Cr	<0,0009	O	<0,05
C	<0,07	O	<0,0002	N	<0,005
Сума інших домішок	<0,3	N	<0,00017	C	<0,01



**Рис. 1.** Розподіл мікротвердості ( $HV_{0,49}$ ) по глибині ( $l$ ) приповерхневого шару зразків технічного титану ВТ1-0 (1) і сплавів Zr-1Nb (2) та ГФЕ-1 (3) після оброблення впродовж 5 год за температури 750 °С та залишкового тиску газового середовища  $133 \cdot 10^{-3}$  Па (а),  $133 \cdot 10^{-4}$  Па (б),  $133 \cdot 10^{-5}$  Па (в)

ли відносним приростом твердості поверхні (ВПТП):  $\delta H^{\text{пов}} = ((H^{\text{пов}} - H^{\text{серц}}) / H^{\text{серц}}) \cdot 100 \%$ , де  $H^{\text{пов}}$  та  $H^{\text{серц}}$  — мікротвердість поверхні зразка та його серцевини відповідно.

Для випробувань на малоциклову втому за симетричного чистого згину використали плоскі зразки, ширина робочої частини яких становила 3 мм, а товщина — 1 мм. Частота навантаження під час випробувань на втому симетричним чистим згином становила  $\nu = 0,5$  Гц, а амплітуда деформації змінювалася в діапазоні  $\pm \epsilon_a = 0,8\text{—}1,2 \%$ .

**Результати та їх обговорення.** Досліджено вплив розрідження кисневмісного середовища (в діапазоні від  $133 \cdot 10^{-5}$  до  $133 \cdot 10^{-3}$  Па) під час модифікування поверхні тонколистових зразків із технічного титану ВТ1-0, цирконієвого сплаву Zr-1Nb та гафнію ГФЕ-1 за температури 750 °С упродовж 5 год на характеристики приповерхневого шару — мікротвердість поверхні модифікованого шару та її топографію, зміну мікротвердості в приповерхневих шарах. Встановлено, що глибина модифікованих киснем шарів зменшувалася в ряду: ВТ1-0  $\rightarrow$  Zr-1Nb  $\rightarrow$  ГФЕ-1 (рис. 1). Така закономірність якісно зберігалася незалежно від розрідження середовища під час модифікування поверхні зразків, а кількісно найвиразніше виявилася за найменшого з використаних розріджень —  $133 \cdot 10^{-3}$  Па (див. рис. 1, а).

Вплив температурно-часових параметрів дифузійного насичення титану, цирконію, гафнію киснем на формування дифузійної зони оцінювали, використовуючи відомий розв'язок рівняння Фіка:

$$C(x, \tau, T) = C^s(T) \cdot \operatorname{erfc} \left( x / 2\sqrt{D(T)} \cdot \tau \right),$$

де  $C(x, \tau, T)$  — концентрація кисню на відстані  $x$  від поверхні металу за тривалості процесу  $\tau$  і температури  $T$ ;  $C^s(T)$  — рівноважна із середовищем його приповерхнева концентрація

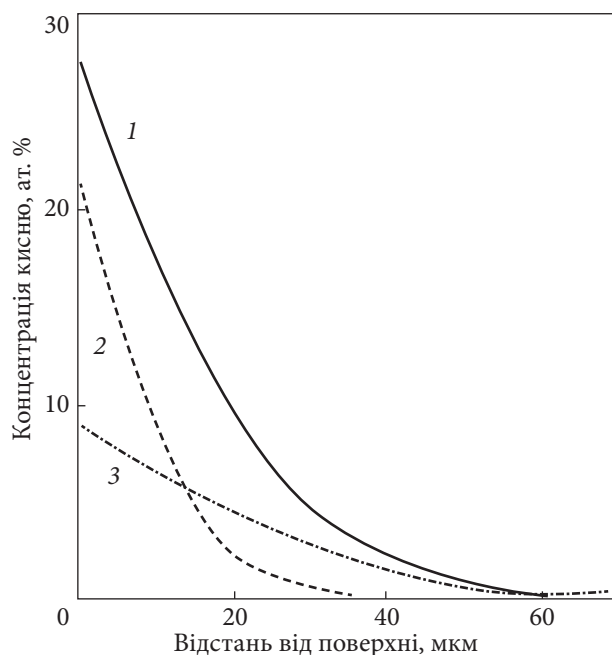
за температури  $T$ ;  $D(T)$  — коефіцієнт дифузії. Розглянуто варіанти, коли насичення титану, цирконію, гафнію призводить до формування лише дифузійного шару. Вважали також, що в ізотермічних умовах насичення поверхнева концентрація елементу втілення (кисню) незмінно відповідала його максимальній розчинності відповідно до діаграм стану для кисню. На основі розподілу мікротвердості вздовж перерізу зразків обчислено ефективні коефіцієнти дифузії кисню в металах IV групи за температури насичення 350—950 °С: для титану  $D(T) = 0,012 \cdot \exp(-45\,250/RT)$  см<sup>2</sup>/с; для цирконію  $D(T) = 0,3 \cdot \exp(-57\,000/RT)$  см<sup>2</sup>/с; для гафнію  $D(T) = 30 \cdot \exp(-58\,000/RT)$  см<sup>2</sup>/с.

Ґрунтуючись на попередньо отриманих результатах, аналітично розраховували концентраційні профілі кисню в металах IV групи залежно від режиму насичення (температура, тривалість, розрідження) киснем (рис. 2).

Узагальнення отриманих даних щодо коефіцієнтів дифузії кисню в титані, цирконії та гафнії і побудованих профілів його розподілу в приповерхневому шарі дають можливість прогнозувати градієнт мікротвердості у приповерхневих шарах залежно від режимів оброблення. Подальші дослідження були зосереджені на визначенні довговічності зразків із зміцненим приповерхневим шаром за різних умов навантаження.

За результатами випробувань титанових, цирконієвих, гафнієвих сплавів зі зміцненим приповерхневим шаром (після дифузійного насичення киснем) за умов циклічних і статичних навантажень визначено оптимальні режими їх оброблення в кисневмісному газовому середовищі для забезпечення властивостей, що відповідають регламентним вимогам.

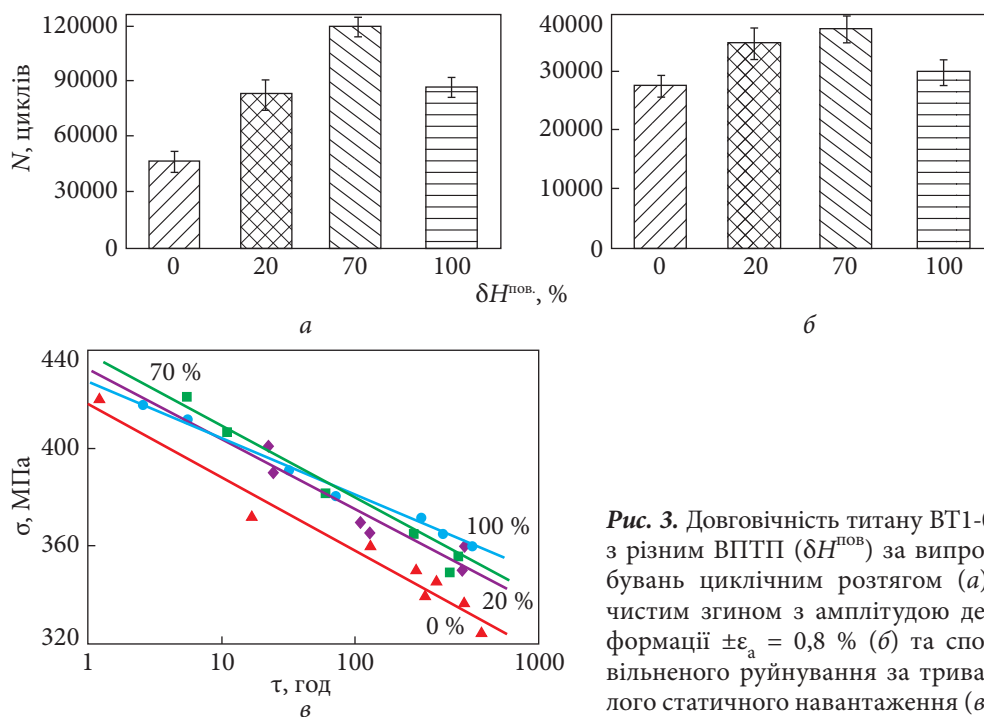
Зміцнення приповерхневого шару титану ВТ1-0 в межах  $\delta H^{\text{пов}} = 0—100\%$ ,  $l = 5—40$  мкм через малу частку в перерізі зразка практично не впливає на короткочасні міцнісні властивості (табл. 2). Але, зміцнення дифузійним насиченням киснем приповерхневого шару металу позитивно впливає на втомну довговічність зразків титану ВТ1-0 за умов цикліч-



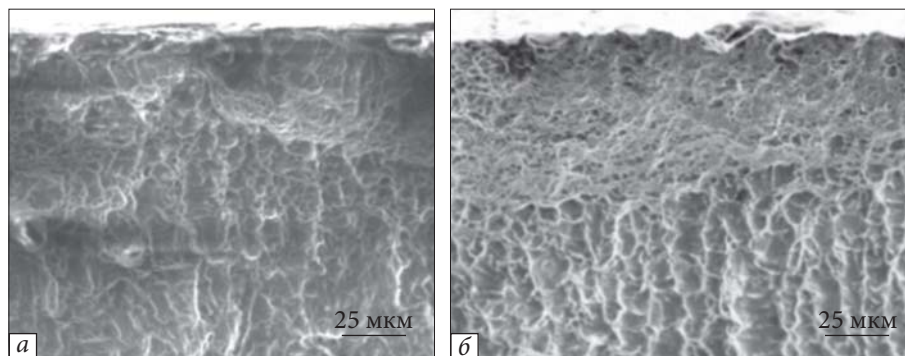
Таблиця 2. Короткочасна міцність ( $\sigma_B$ ) та пластичність ( $\delta$ ) зразків титану ВТ1-0 залежно від рівня поверхневого зміцнення ( $\delta H^{\text{пов}}$ )

$\delta H^{\text{пов}}$ , %	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
0 (вихідний стан)	$327 \pm 12$	$40,0 \pm 2,0$
20	$330 \pm 15$	$40,5 \pm 3,5$
70	$337 \pm 13$	$39,1 \pm 3,1$
100	$331 \pm 17$	$38,2 \pm 2,2$

◀ **Рис.2.** Розраховані концентраційні профілі розподілу кисню у приповерхневому шарі титану (1), цирконію (2) та гафнію (3) за умов насичення киснем (850 °С, 5 год,  $133 \cdot 10^{-3}$  Па)



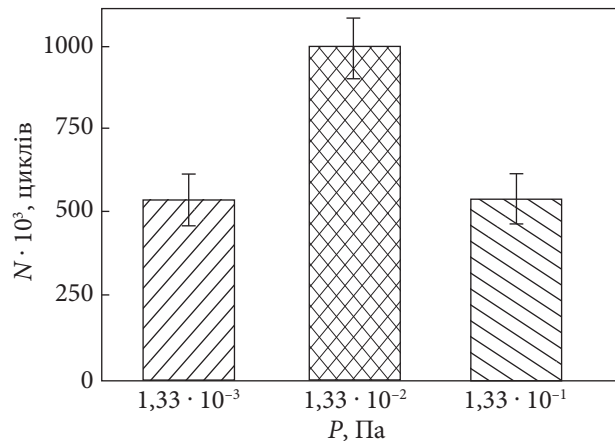
**Рис. 3.** Довговічність титану VT1-0 з різним ВПТП ( $\delta H^{пов}$ ) за випробувань циклічним розтягом (а), чистим згином з амплітудою деформації  $\pm \epsilon_a = 0,8 \%$  (б) та сповільненого руйнування за тривалого статичного навантаження (в)



**Рис. 4.** Поверхня зламу зразків сплаву Zr-1Nb, оброблених у розрідженому (вакуумі) (а) і кисневмісному (б) середовищі, після випробувань циклічним розтягом

ного розтягу і залежить від  $\delta H^{пов}$ . Максимальна кількість циклів до руйнування за  $\sigma_a = 340$  МПа ( $\sigma_a = 0,75 \cdot \sigma_b$ ) зафіксована при  $\delta H^{пов} = 70 \%$  і становить  $\sim 122$  тис. циклів, що у 2,5 рази перевищує такі значення у вихідному стані (рис. 3, а). За інших значень  $\delta H^{пов}$  кількість циклів до руйнування є більшою відносно вихідного стану, але меншою, ніж при  $\delta H^{пов} = 70 \%$ . Також зафіксовано підвищення втомної довговічності зразків титану VT1-0 за амплітуди деформації  $\pm \epsilon_a = 0,8 \%$  у разі чистого згину за різних значень ВПТП (див. рис. 3, б). Аналогічно ВПТП впливає й на тривалу статичну міцність титану VT1-0 (див. рис. 3, в).

Виявлено, що за циклічного навантаження приріст втомної довговічності становив 15—20 % у зміцнених зразків сплаву Zr-1Nb ( $\delta H^{пов} = 60 \%$ ,  $l = 30$  мкм) відносно зразків,



**Рис. 5.** Втомна довговічність за чистого згину ( $\pm \epsilon_a = 0,6\%$ ) зразків гафнію, оброблених за умов впливу різного тиску та температури  $850\text{ }^\circ\text{C}$  упродовж 2 год

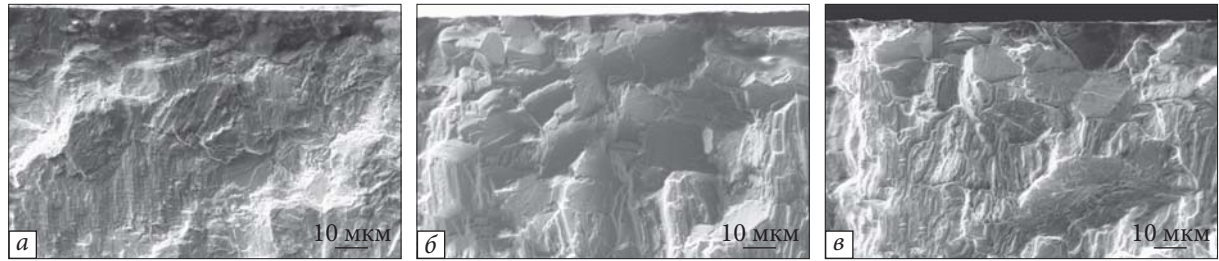
оброблених у вакуумі ( $P = 1,33 \cdot 10^{-3}$  Па,  $T = 580\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 3$  год). За мінімальної участі кисню в модифікуванні поверхні на зламах зразків спостерігали значну кількість осередків зародження тріщин від поверхні, злиття фронтів яких продовжилося традиційним ростом втомної тріщини з характерними фестонами, витягнутими в напрямку поширення руйнування (рис. 4, а). Після оброблення у кисневмісному середовищі ( $580\text{ }^\circ\text{C}$ , 3 год) за розрідження ( $P = 1,33 \cdot 10^{-2}$  Па) на ділянці зміцненого шару на зламах зразків виявлено ознаки руйнування внаслідок зсуву, що властиво втомному руйнуванню на ділянці зародження коротких втомних тріщин (див. рис. 4, б).

Перед випробуваннями тонколистових зразків гафнію на втомну довговічність за умов чистого згину їх піддавали термообробленню  $850\text{ }^\circ\text{C}$  упродовж 2 год. Такі температурно-часові параметри оброблення відповідають штатному фінішному термічному обробленню тонколистового гафнію. Хіміко-термічну обробку проводили за трьох різних ступенів розрідження кисневмісного газового середовища:  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па,  $1,33 \cdot 10^{-2}$  Па,  $1,33 \cdot 10^{-1}$  Па. Встановлено, що ступінь розрідження кисневмісного газового середовища істотно впливає на втомну довговічність (рис. 5): найбільшу кількість циклів до руйнування зафіксовано після оброблення під тиском  $1,33 \cdot 10^{-2}$  Па.

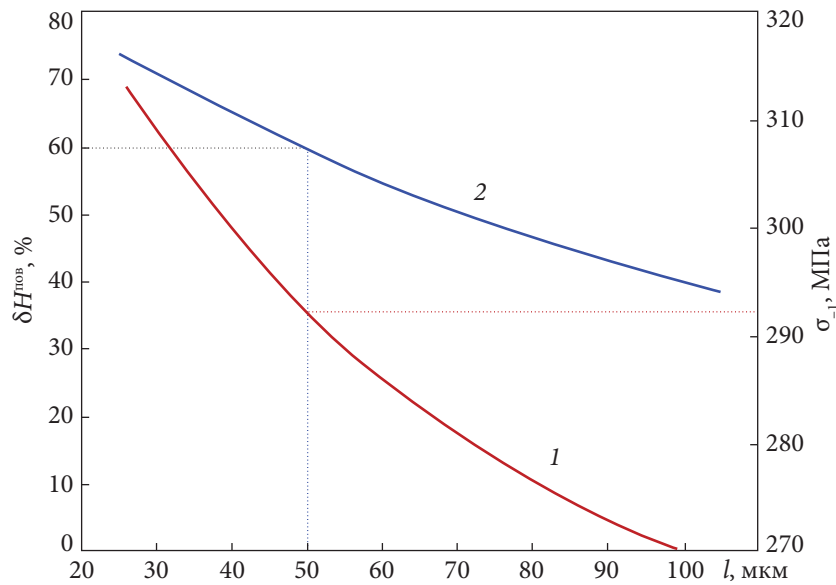
Зразки гафнію руйнувалися переважно за трансзерним механізмом, з ознаками пластичної деформації, характерної для малоциклової втоми у вигляді виразно окреслених гребенів відриву на переходах між суміжними ділянками односпрямованого росту тріщини (рис. 6).

Проведений комплекс досліджень показав, що дифузійне насичення приповерхневих шарів аналізованих сплавів елементом втілення (киснем) підвищує їхню довговічність за циклічних та статичних навантажень. Це важливо для підвищення ресурсу тонкостінних виробів зі сплавів на основі титану, цирконію та гафнію шляхом модифікування їхньої поверхні, щоб досягти такої величини мікротвердості за показником ВПТП і глибини модифікованого шару, які задовольняли б чинні галузеві вимоги до експлуатації тонкостінних виробів.

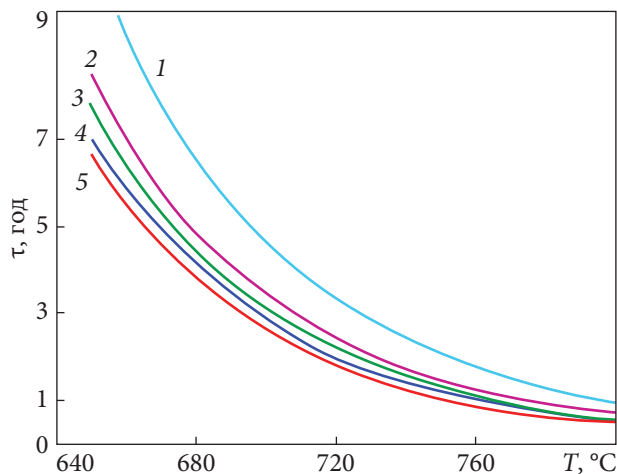
За експериментальними даними дослідженого титану ВТ1-0 з модифікованим киснем приповерхневим шаром побудовано номограми для вибору показників ( $\delta H^{\text{пов}}$ ,  $l$ ), які задовольняли б регламентні вимоги щодо їх твердості і глибини приповерхневого зміцнення. На їх основі обґрунтовано відповідні рівні  $\sigma_{-1}$  для кожного з варіантів хіміко-термічної



**Рис. 6.** Фрактограми зразків гафнію після утомних випробувань чистим згином за амплітуди деформації  $\pm \epsilon_a = 0,6\%$ , оброблених за температури  $850\text{ }^\circ\text{C}$  упродовж 2 год у кисневмісному середовищі та тиску:  $1,33 \cdot 10^{-3}\text{ Па}$  (а);  $1,33 \cdot 10^{-2}\text{ Па}$  (б) та  $1,33 \cdot 10^{-1}\text{ Па}$  (в)



**Рис. 7.** Номограма для вибору співвідношення  $\delta H^{\text{пов}}$  та  $l$  (1), яке забезпечує відповідну границю втоми  $\sigma_{-1}$  (2) під час модифікування приповерхневих шарів титану ВТ1-0 киснем



**Рис. 8.** Номограма для вибору температурно-часових режимів хіміко-термічної обробки, за яких на тонкостінних виробах з титану ВТ1-0 формується зміцнений шар з  $\delta H^{\text{пов}} = 70\%$ , за тиску кисневмісного газового середовища  $0,001\text{ Па}$  (1),  $0,005\text{ Па}$  (2),  $0,01\text{ Па}$  (3),  $0,05\text{ Па}$  (4),  $0,1\text{ Па}$  (5)

обробки, нижче яких вироби зберігатимуть працездатність за умов експлуатації. Запропоновано два можливих алгоритми вибору ефекту модифікування приповерхневих шарів  $\alpha$ -титанових сплавів: перший — за одним із запропонованих показників  $\delta H^{\text{пов}}$  та  $l$ , другий — за границею втомної витривалості металу  $\sigma_{-1}$  (рис. 7).

Забезпечення параметрів (температура, ступінь розрідження газового середовища, тривалість) хіміко-термічної обробки металу безпосередньо залежить від характеристик технологічного обладнання. Розрідження кисневмісного газового середовища визначає кількість підведеного дифузанта до поверхні металу. Вакуумне обладнання може забезпечити широкий діапазон тиску газового середовища. Тому було побудовано номограму (рис. 8), яка дає можливість визначати оптимальні температурно-часові режими хіміко-термічної обробки виробів із  $\alpha$ -сплаву титану VT1-0 для досягнення регламентованого рівня ВПТП залежно від тиску кисневмісного газового середовища.

### **Висновки.**

1. Показано, що в певних межах ( $\delta H^{\text{пов}} = 50 \dots 80\%$ ,  $l = 25 \dots 45$  мкм) твердорозчинне зміцнення приповерхневого шару металу підвищує довговічність тонкостінних виробів ( $h \leq 3$  мм) зі сплавів на основі Ti, Zr, Hf за циклічних та статичних тривалих навантажень.

2. Визначено, що регламентоване зміцнення ( $\delta H^{\text{пов}} = 70\%$ ,  $l = 30$  мкм) приповерхневого шару металу дифузійним насиченням киснем позитивно впливає на втомну довговічність титану VT1-0: у разі циклічного розтягу максимальна кількість циклів до руйнування у 2,5 рази перевищує такі значення у вихідному стані; за чистого згину довговічність зростає на  $\sim 30\%$ ; за тривалого статичного навантаження міцність збільшується на  $\sim 6\%$ .

3. Встановлено підвищення втомної довговічності зразків сплаву Zr-1Nb, зміцнених на  $\delta H^{\text{пов}} = 60\%$  та  $l = 30$  мкм, у разі циклічного розтягу за температури  $20^\circ\text{C}$  і  $\sigma_{\text{max}} = 100$  МПа. Приріст досягає  $15\text{—}20\%$  відносно зразків оброблених у вакуумі ( $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па).

4. За концентраційними профілями розподілу кисню в металах IV групи можна прогнозувати зміцнення приповерхневого шару металу за дифузійного насичення елементами втілення залежно від температурно-часових та газодинамічних параметрів дифузійного насичення.

*Роботу виконано за часткової фінансової підтримки Національного фонду досліджень України в межах проєкту 2025.07/0035 “Розроблення концепції формування функціональних нітридних шарів на титанових сплавах, отриманих адитивними технологіями”.*

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Elwell W.T., Wood D.F. Analysis of the new metals: titanium, zirconium, hafnium, niobium, tantalum, tungsten and their alloys. Oxford: Pergamon Press, 1966. 288 p.
2. Peters M., Kumpfert J., Ward C.H., Leyens C. Titanium alloys for aerospace applications. *Adv. Eng. Mater.* 2003. 5, № 6. P. 419—427. <https://doi.org/10.1002/adem.200310095>
3. Baltatu M.S., Vizureanu P., Sandu A.V., Achitei D.C., Perju M.C., Burduhos-Nergis D.D., Benchea M. Perspective chapter: Titanium — a versatile metal in modern applications, titanium-based alloys — characteristics and applications. IntechOpen, 2024. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1005742>
4. Tewari R., Krishna K.V.M., Neogy S., Lemaignan C. Zirconium and its alloys: properties and characteristics. *Comprehensive Nuclear Materials*. Vol. 7. 2nd ed. Elsevier, 2020. P. 284—302. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11735-7>
5. Malinov S., Sha W. Modeling thermodynamics, kinetics, and phase transformation morphology while heat treating titanium alloys. *JOM*. 2005. 57, № 9. P. 42—45. <https://doi.org/10.1007/s11837-005-0114-1>
6. Reif M., Scherm F., Galetz M.C., Glatzel U. An enhanced three-step oxidation process to improve oxide adhesion on zirconium alloys. *Oxid. Met.* 2014. 82, № 1-2. P. 99—112. <https://doi.org/10.1007/s11085-014-9479-2>
7. Pazos L., Corengia P., Svoboda H. Effect of surface treatments on the fatigue life of titanium for biomedical applications. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 2010. 3, № 6. P. 416—424. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2010.03.006>
8. Vykhodets V.B., Kurennykh T.E., Lakhtin A.S., Fishman A.Ya. Diffusion of light elements in BCC, FCC and HCP metals. *Solid State Phenom.* 2008. 138. P. 119—132. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.138.119>
9. Ruban A.V., Baykov V.I., Johansson B., Dmitriev V.V., Blanter M.S. Oxygen and nitrogen interstitial ordering in hcp Ti, Zr, and Hf: An *ab initio* study. *Phys. Rev. B*. 2010. 82, № 13. 134110. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.82.134110>
10. Szkliniarzi A., Szkliniarzi W. Effect of carbon content of carbon content on the microstructure and properties of Ti-6Al-4V alloy. *Arch. Metall. Mater.* 2020. 65, № 3. P. 1197—1204. <https://doi.org/10.24425/amm.2020.133239>
11. Trush V.S., Voyevodin V.N., Stoev P.I., Fedirko V.N., Lukyanenko A.G., Tikhonovsky M.A., Panov V.A. Properties of tubes from Zr-1% Nb alloy after thermochemical treatment and hydrogenation. *Probl. Atom. Sci. Tech.* 2021. № 5(135). P. 84—87. <https://doi.org/10.46813/2021-135-084>
12. Trush V.S., Pohrelyuk I.M., Luk'yanenko O.H., Lavrys S.M., Kravchyshyn T.M. Oxygen diffusion saturation of titanium hafnium with the different surface layer. *Nucl. Phys. At. Energy*. 2023. 2, № 2. P. 122—130. <https://doi.org/10.15407/jnpae2023.02.122>

Надійшла до редакції 29.05.2026

REFERENCES

1. Elwell, W. T. & Wood, D. F. (1966). Analysis of the new metals: titanium, zirconium, hafnium, niobium, tantalum, tungsten and their alloys. Oxford: Pergamon Press.
2. Peters, M., Kumpfert, J., Ward, C. H. & Leyens, C. (2003). Titanium alloys for aerospace applications. *Adv. Eng. Mater.*, 5, No. 6, pp. 419-427. <https://doi.org/10.1002/adem.200310095>
3. Baltatu, M. S., Vizureanu, P., Sandu, A. V., Achitei, D. C., Perju, M. C., Burduhos-Nergis, D. D. & Benchea, M. (2024). Perspective chapter: Titanium — a versatile metal in modern applications. In: Titanium-based alloys — characteristics and applications. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1005742>
4. Tewari, R., Krishna K. V. M., Neogy, S. & Lemaignan, C. (2020). Zirconium and its alloys: properties and characteristics. *Comprehensive Nuclear Materials*, Vol. 7 (pp. 284-302). 2nd ed. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11735-7>
5. Malinov, S. & Sha, W. (2005). Modeling thermodynamics, kinetics, and phase transformation morphology while heat treating titanium alloys. *JOM*, 57, No. 9, pp. 42-45. <https://doi.org/10.1007/s11837-005-0114-1>
6. Reif, M., Scherm, F., Galetz, M. C. & Glatzel, U. (2014). An enhanced three-step oxidation process to improve oxide adhesion on zirconium alloys. *Oxid. Met.*, 82, No. 1-2, pp. 99-112. <https://doi.org/10.1007/s11085-014-9479-2>
7. Pazos, L. & Corengia, P., Svoboda, H. (2010). Effect of surface treatments on the fatigue life of titanium for biomedical applications. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, 3, No. 6, pp. 416-424. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2010.03.006>

8. Vykhodets, V. B., Kurennykh, T. E., Lakhtin, A. S. & Fishman, A. Ya. (2008). Diffusion of light elements in BCC, FCC and HCP metals. *Solid State Phenom.*, 138, pp. 119-132. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.138.119>
9. Ruban, A. V., Baykov, V. I., Johansson, B., Dmitriev, V. V. & Blanter, M. S. (2010). Oxygen and nitrogen interstitial ordering in hcp Ti, Zr, and Hf: An *ab initio* study. *Phys. Rev. B.*, 82, No. 13, 134110. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.82.134110>
10. Szkliniarzi, A. & Szkliniarzi, W. (2020). Effect of carbon content of carbon content on the microstructure and properties of Ti-6Al-4V alloy. *Arch. Metall. Mater.*, 65, No. 3, pp. 1197-1204. <https://doi.org/10.24425/amm.2020.133239>
11. Trush, V. S., Voyevodin, V. N., Stoev, P. I., Fedirko, V. N., Lukyanenko, A. G., Tikhonovsky, M. A. & Panov, V. A. (2021). Properties of tubes from Zr-1% Nb alloy after thermochemical treatment and hydrogenation. *Probl. Atom. Sci. Tech.*, No. 5(135), pp. 84-87. <https://doi.org/10.46813/2021-135-084>
12. Trush, V. S., Pohrelyuk, I. M., Luk'yanenko, O. H., Lavrys, S. M. & Kravchyshyn, T. M. (2023). Oxygen diffusion saturation of titanium hafnium with the different surface layer. *Nucl. Phys. At. Energy*, 2, No. 2, pp. 122-130. <https://doi.org/10.15407/jnpae2023.02.122>

Received 29.05.2026

V.S. Trush, <https://orcid.org/0000-0002-2264-3918>

A.G. Luk'yanenko, <https://orcid.org/0000-0001-6642-2300>

I.M. Pohrelyuk, <https://orcid.org/0000-0002-3009-2829>

V.M. Fedirko, <https://orcid.org/0000-0002-4337-1691>

Karpenko physico-mechanical institute of the NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine

E-mail: trushvasyl@gmail.com

#### IMPROVING THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF GROUP IV METALS (Ti, Zr, Hf) AND THEIR ALLOYS BY METHODS OF CHEMICAL-THERMAL TREATMENT

The influence of oxygen diffusion saturation parameters on the characteristics of Group IV metals (Ti, Zr, Hf) and their alloys, including surface microhardness and the thickness of the hardened layer size, was studied. An increase in the performance of hardened thin-walled products made from these metals under cyclic and static loads was experimentally demonstrated. The effective diffusion coefficients of interstitial elements in Group IV metals (Ti, Zr, Hf) were calculated as a function of saturation temperature. Oxygen concentration profiles in Group IV metals and their alloys were analytically calculated depending on the oxygen saturation regime (temperature, duration, vacuum). The hardness values of surface microhardness and size of the hardened layer that enhance the durability of thin-walled products made of Ti, Zr, Hf, and their alloys under cyclic tension and pure bending were determined. Fractographic fracture characteristics of the hardened samples are presented. The effect of vacuum in an oxygen-containing environment (in the range of  $133 \cdot 10^{-3}$  to  $133 \cdot 10^{-1}$  Pa) during surface modification of thin-sheet hafnium specimens of the GFE-1 grade at a temperature of 850 °C for 2 hours on fatigue strength under pure bending was determined.

It was found that diffuse saturation of the surface layers of the studied alloys with oxygen increases their durability under cyclic and static loads, which is important for increasing the service life of thin-walled products made of titanium, zirconium, and hafnium-based alloys through oxygen modification. Based on the experimental data, nomograms were constructed to select parameters (surface microhardness —  $\delta HV^{surf}$ , hardened layer size —  $l$ ) for the studied  $\alpha$ -titanium VT1-0, with oxygen-modified surface layers that would meet regulatory requirements for their rigidity and surface hardening depth. Based on these data, the authors substantiated the corresponding  $\sigma_{-1}$  levels for each processing option, below which the products will retain their functionality under operating conditions.

Two possible algorithms for monitoring the effectiveness of surface layer modification in  $\alpha$ - and pseudo- $\alpha$ -titanium alloys are proposed: the first is based on one of the proposed indicators  $\delta HV^{surf}$  or  $l$ , and the second is based on the metal's fatigue endurance limit  $\sigma_{-1}$ .

**Keywords:** titanium, zirconium, hafnium, chemical-thermal treatment, surface layer, microhardness, fatigue life.