

ВПЛИВ ЗМІЦНЕНИХ ЕЛЕМЕНТАМИ ПРОНИКНЕННЯ ПРИПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВІВ ТИТАНУ*

В.М. Федірко, В.С. Труш, О.Г. Лук'яненко, І.М. Погрелюк

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України.
79060, м. Львів, вул. Наукова, 5. E-mail: rminasu@ipm.lviv.ua

У даній роботі на зразках промислових титанових сплавів ВТ1-0, ВТ5, ПТ-7М, ОТ4-1 дифузійним насиченням у контрольованому газовому середовищі формували приповерхневі газонасичені шари завглибшки 10...70 мкм із різним рівнем зміцнення поверхні. Показано можливість підвищення ресурсних характеристик α - і псевдо- α -сплавів титану за різних видів навантаження (утома, довготривала міцність) за умов регламентованого твердорозчинного зміцнення приповерхневих шарів металу елементами проникнення (О, N, С). Визначено оптимальні параметри модифікування приповерхневого шару металу (градієнт твердості та глибина зміцнення), які забезпечують максимальну реалізацію цього ефекту для кожного з елементів проникнення. Бібліогр. 5, табл. 1, рис. 9.

Ключові слова: титанові сплави; приповерхневий шар; елемент проникнення; кисень; азот; вуглець; статичне навантаження; втомна довговічність

Одним з важливих напрямків сучасного матеріалознавства титану та сплавів на його основі є забезпечення максимального рівня експлуатаційних характеристик виробів завдяки створенню нових методів обробки, а також оптимізації існуючих. В останні роки зростає зацікавленість до модифікування поверхневого шару металу елементами проникнення (киснем, азотом, вуглецем) з метою підвищення експлуатаційних властивостей виробів з титанових сплавів [1–3]. Однак у науково-технічній літературі мало інформації про вплив зміцнення елементами проникнення (киснем, азотом, вуглецем) приповерхневого шару металу на ресурсні характеристики (втомну довговічність, міцність тощо) виробів з титану за різних умов навантаження, а також про оптимальні параметри

модифікованого приповерхневого шару (градієнт твердості і глибина) для кожного з елементів проникнення.

Тому мета даної роботи — встановити вплив зміцнення приповерхневого шару металу елементами проникнення (киснем, азотом, вуглецем) на ресурсні характеристики (втомну довговічність, міцність тощо) тонкостінних (≤ 4 мм) виробів з титану за різних умов навантаження.

Методичні аспекти. На зразках (рис. 1) з промислових титанових сплавів ВТ1-0, ВТ5, ПТ-7М, ОТ4-1 насиченням з контрольованого кисень-, азот- та вуглецевмісного газового середовища формували приповерхневі газонасичені шари завглибшки 10...70 мкм із різним рівнем зміцнення поверхневого шару $0\% < K < 100\%$.

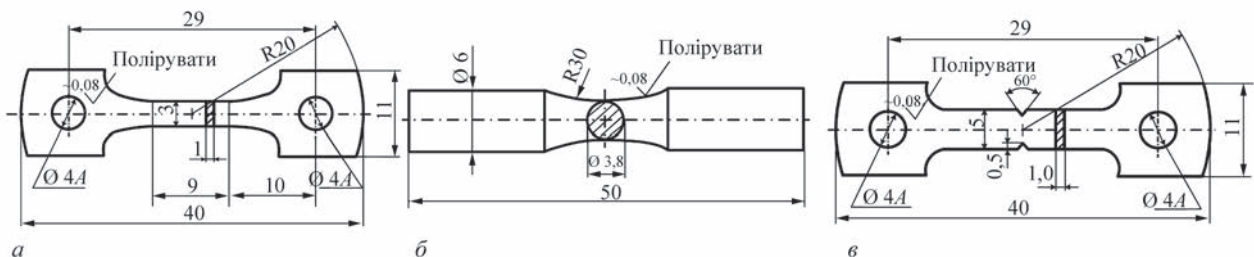


Рис. 1. Зразки для випробувань чистим згином (а), обертвовим згином (б), сповільненим руйнуванням за тривалого статичного навантаження (в)

*За матеріалами доповіді, представленої на Міжнародній конференції «Титан-2018. Виробництво та застосування в Україні», 11–13 червня 2018 р., м. Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.

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

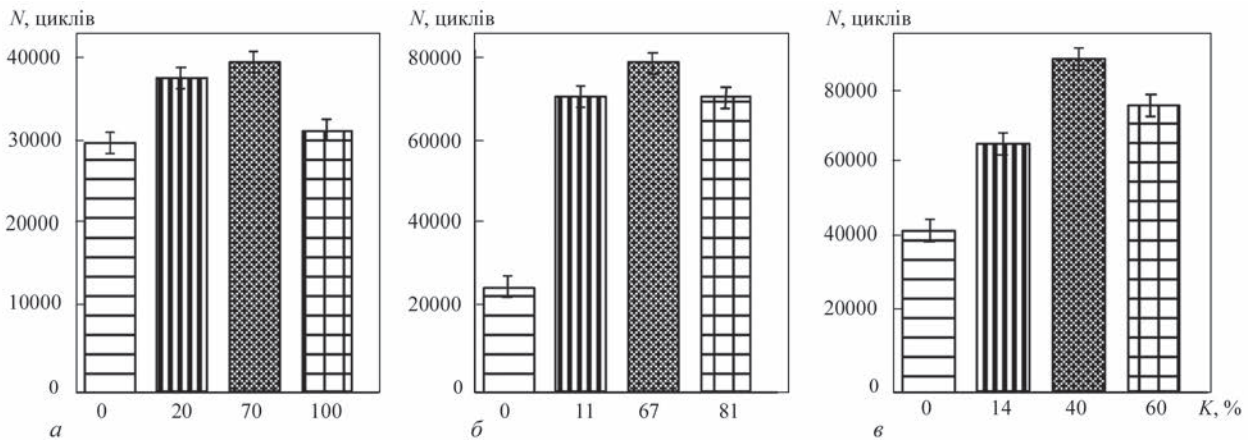


Рис. 2. Втомна довговічність за чистого згину та амплітуди деформації $\varepsilon_a = \pm 0,8\%$ зразків титанових сплавів ВТ1-0 (а), ПТ-7М (б), ОТ4-1 (в) за різного рівня зміцнення (K)

Рівень зміцнення (K) визначали за величиною відносного приросту твердості поверхні $K = ((H_{0,49}^{\text{пов}} - H_{0,49}^{\text{серц}}) / H_{0,49}^{\text{серц}}) \cdot 100\%$, де: $H_{0,49}^{\text{пов}}$ — твердість поверхні титану; $H_{0,49}^{\text{серц}}$ — твердість серцевини титану. Перед обробкою в контрольованих газових середовищах зразки відпалювали у вакуумі за режимом: $T = 800\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 2\text{ год}$, $P = 0,05\text{ мПа}$, $I_{\text{min}} = 0,1\text{ мПа} \cdot \text{дм}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ для формування вихідного фазово-структурного стану (зняття залишкових напружень, видалення водню, гомогенізації й стабілізації структури).

Зміцнений приповерхневий шар на зразках титанових сплавів досліджували методами дюрометрії (мікротвердомір ПМТ-3М, навантаження 50 г). Вплив вищезгаданого шару на об'ємні властивості металу визначали випробуваннями: одноісним розтягом (розривна машина Р-0,5); обертовим згином з частотою навантаження $\nu = 50\text{ Гц}$; чистим згином ($\nu = 0,5\text{ Гц}$) із заданою амплітудою деформації $\varepsilon_a = \pm 0,8\%$; циклічним розтягом (установка з інерційним силосбудженням від обертальних невривноважених мас з частотою навантаження $\nu = 6 \dots 8\text{ Гц}$ і коефіцієнтом асиметрії циклу навантаження $R = 0,2$); сповільненим руйнуванням за тривалого статичного навантаження на базі 1000 год на повітрі (зразки з V-подібним концентратором).

Результати досліджень та обговорення. Згідно з отриманими результатами рівень зміцнення в досліджуваному діапазоні $0\% \leq K \leq 100\%$ прак-

Вплив рівня зміцнення поверхні зразків сплаву ВТ1-0 на механічні властивості

$K, \%$	$\sigma_b, \text{МПа}$	$\delta, \%$
0 (вихідний стан)	327	40,0
20	330	40,5
70	337	39,1
100	331	38,2

тично не впливає на короточасну міцність (σ_b) та відносне видовження (δ) сплаву ВТ1-0 (таблиця).

Втомна довговічність за чистого згину. Згідно з результатами випробувань чистим згином зміцнення приповерхневого шару позитивно впливає на втомну довговічність α - та псевдо- α -сплавів титану. Залежність втомної довговічності титанових сплавів від рівня зміцнення (K) за деформації $\varepsilon_a = \pm 0,8\%$ має екстремальне значення і є максимумом за певного (оптимального) рівня зміцнення приповерхневого шару металу (рис. 2).

Подібну залежність втомної довговічності за чистого згину від рівня зміцнення поверхні (K) зразки титанового сплаву ВТ1-0 мають після насичення в азотовмісному середовищі (рис. 3). Згідно з результатами найбільший приріст втомної довговічності зафіксовано за $K = 80\%$ і тому даний рівень зміцнення прийнято за оптимальний.

Як свідчать результати випробувань за чистим згином, ефект позитивного впливу насиченого

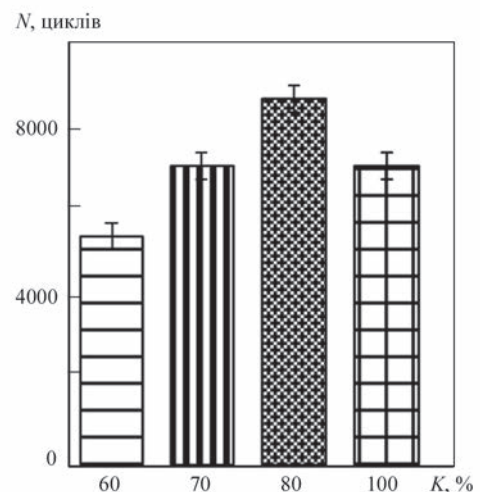


Рис. 3. Вплив рівня зміцнення поверхні (K) при насиченні з азотовмісного середовища на втомну довговічність зразків титанового сплаву ВТ1-0 за чистого згину ($\varepsilon_a = \pm 0,8\%$)

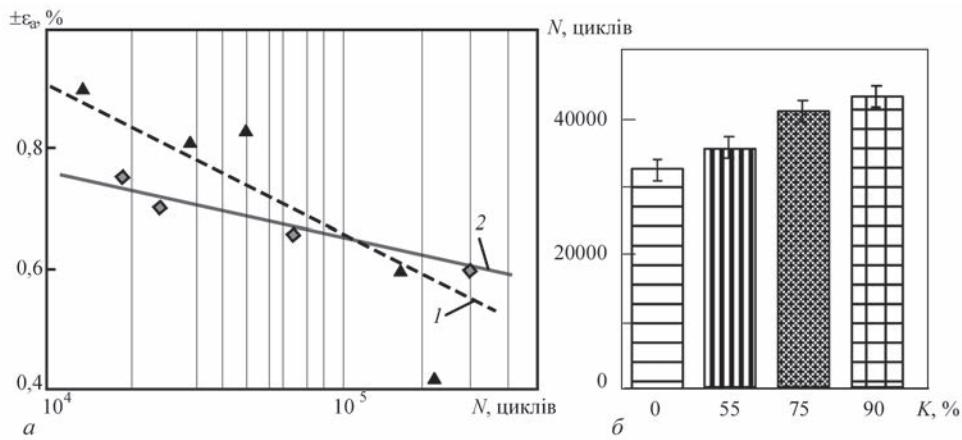


Рис. 4. Криві втоми (а) та втомна довговічність (б) за чистого згину зразків сплаву ВТ1-0 з різним рівнем зміцнення після насичення у вуглецевмісному газовому середовищі: 1 — $K = 0\%$; 2 — $K = 90\%$

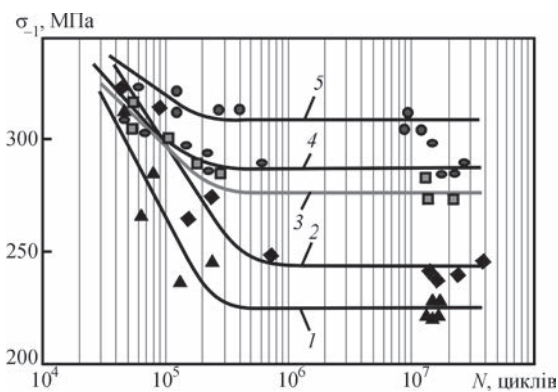


Рис. 5. Криві втоми зразків титанового сплаву ВТ1-0 зі зміцненим приповерхневим шаром: 1 — $K = 0\%$; 2 — $K = 25\%$, $l = 30\text{ мкм}$; 3 — $K = 90\%$, $l = 90\text{ мкм}$; 4 — $K = 50\%$, $l = 30\text{ мкм}$; 5 — $K = 70\%$, $l = 30\text{ мкм}$

вуглецем приповерхневого шару сплаву ВТ1-0 відносно вихідного стану (не зміцненого, $K = 0\%$) зафіксовано за малих амплітуд деформації циклу, а саме менших за $\epsilon_a = \pm 0,6\%$ (рис. 4). Отож, беручи це до уваги, можна рекомендувати наступне: виробити з титанового сплаву ВТ1-0 зі зміцненим вуглецем на оптимальний рівень ($K = 90\%$) приповерхневим шаром металу доцільно використовувати за малих амплітуд деформації.

Втомна довговічність за обертового згину. Зміцнений приповерхневий шар впливає і на опір утомі за обертового згину (рис. 5–7).

Зі збільшенням рівня поверхневого зміцнення (K) від 5 до 80...90% за постійної глибини зміцненої зони ($l = 30\text{ мкм}$) границя втоми (σ_{-1}) титанових сплавів ВТ1-0 і ВТ5 спочатку зростає, а потім знижується, тобто має максимум (рис. 5, 6). Ці результати дозволяють проаналізувати вплив рівня поверхневого зміцнення (K) і глибини зміцненої зони (l) на опір втоми металу. Аналогічна тенденція спостерігається і для сплаву ОТ4-1.

Найбільший відносний приріст границі втоми ($\delta\sigma_{-1}$) для сплаву ВТ1-0 сягає 38% при $K = 70\%$; для сплаву ВТ5 — 24% при $K = 60\%$, $l = 30\text{ мкм}$; для сплаву ОТ4-1 — 38% при $K = 40\%$, $l = 45\text{ мкм}$. Такий характер зміни границі втоми можна пояснити тим, що розчинення кисню в металі з утворенням твердого розчину проникнення супроводжується виникненням стискальних напружень, які збільшують час до зародження втомних тріщин і поліпшують втомні властивості [4]. З іншого боку, у результаті зміцнення через розчинення кисню метал окрихчується, за певних умов може переважати той або інший фактор.

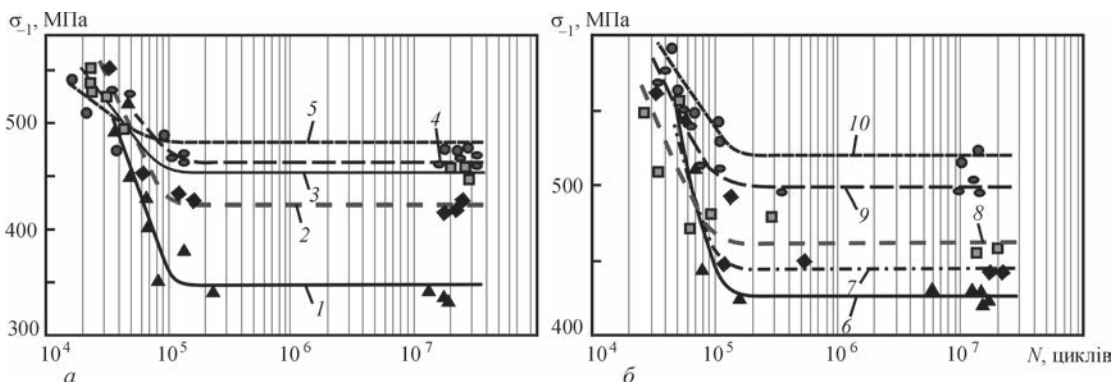


Рис. 6. Криві втоми за обертового згину зразків сплавів ОТ4-1 (а) та ВТ5 (б) після зміцнення приповерхневого шару в кисневмісному середовищі: 1 — $K = 0\%$; 2 — $K = 35\%$, $l = 70\text{ мкм}$; 3 — $K = 70\%$, $l = 90\text{ мкм}$; 4 — $K = 35\%$, $l = 45\text{ мкм}$; 5 — $K = 60\%$, $l = 70\text{ мкм}$; 6 — $K = 0\%$; 7 — $K = 60\%$, $l = 65\text{ мкм}$; 8 — $K = 35\%$, $l = 65\text{ мкм}$; 9 — $K = 80\%$, $l = 35\text{ мкм}$; 10 — $K = 60\%$, $l = 30\text{ мкм}$

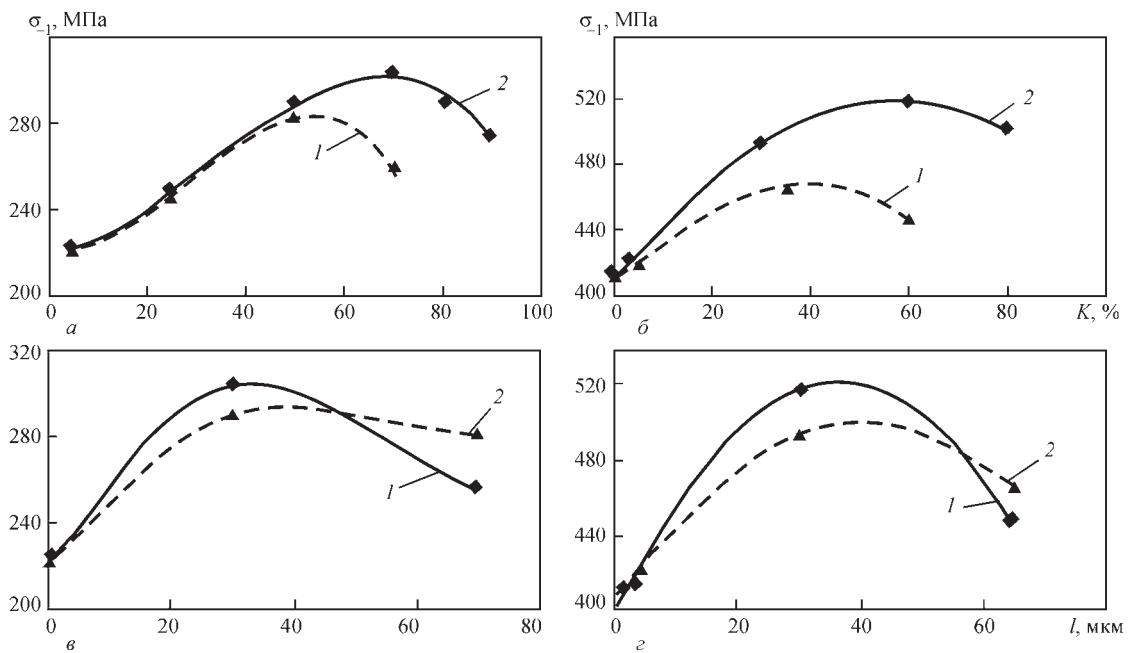


Рис. 7. Залежність границі втоми сплавів ВТ1-0 (а, в) і ВТ5 (б, г) від рівня поверхневого зміцнення за постійної глибини зміцненої зони, мкм: 1 — 70; 2 — 30 (а); 1 — 65; 2 — 30 (б) та від глибини зміцненої зони за постійного рівня поверхневого зміцнення, %: 1 — 70; 2 — 50 (в); 1 — 30; 2 — 60 (г)

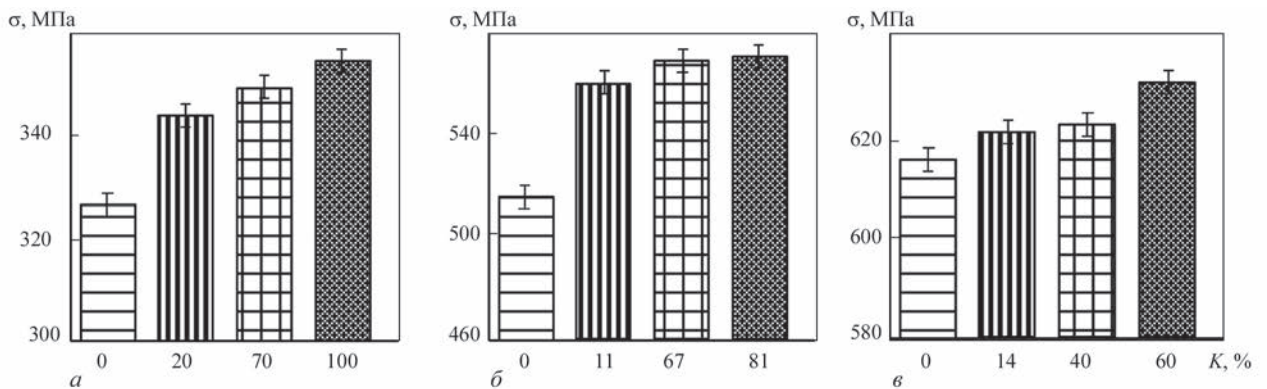


Рис. 8. Руйнівні напруження залежно від рівня поверхневого зміцнення (K) за статичного навантаження на базі 1000 год зразків титанових сплавів: а — ВТ1-0; б — ПТ-7М; в — ОТ4-1

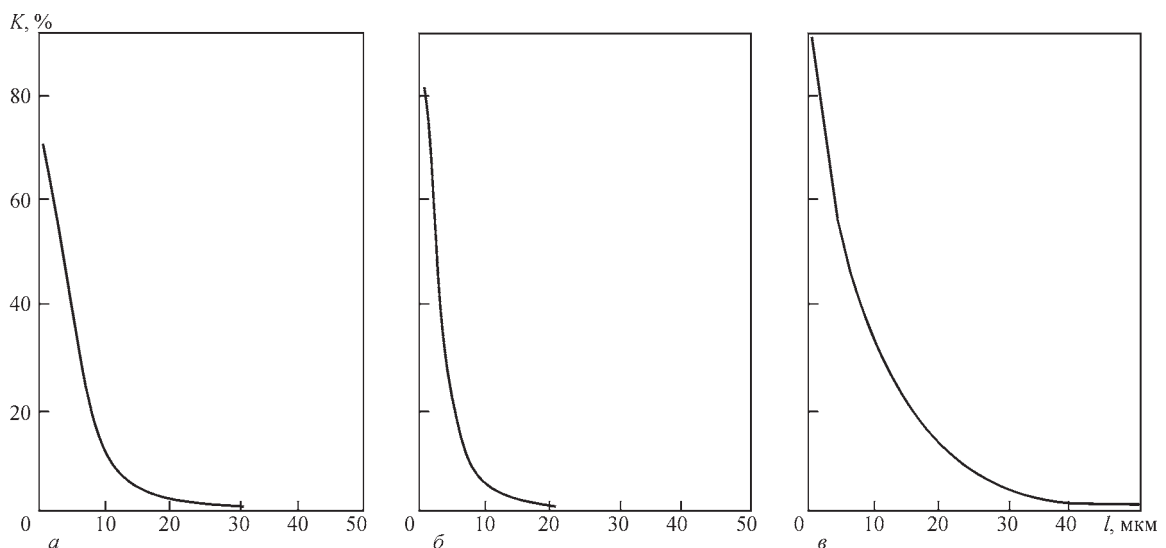


Рис. 9. Оптимальні параметри твердорозчинного зміцнення приповерхневого шару α- та псевдо-α-титанових сплавів елементами проникнення: а — киснем; б — азотом; в — вуглецем

Максимальний приріст границі втоми дорівнює 38 % у зразків сплаву ВТ1-0, отриманий за поверхневого зміцнення $K = 70$ % при $l = 30$ мкм (рис. 7, а). За подальшого збільшення рівня поверхневого зміцнення до 90 % за постійної глибини зміцнення границя втоми зразків сплаву ВТ1-0 знижується (рис. 7, а), аналогічна залежність спостерігається й для сплаву ВТ5 (рис. 7, б). Збільшення глибини зміцненої зони за постійного рівня поверхневого зміцнення зменшує відносний приріст границі втоми. Характерно, що кожному рівню K відповідає оптимальна глибина зміцненої зони, перевищення якої знижує величину границі втоми (рис. 7, в, з).

Таким чином, можна зробити висновок, що для кожного рівня зміцнення α - та псевдо- α -титанових сплавів ВТ1-0, ВТ5 і ОТ4-1 за дифузійного насичення з контрольованого газового середовища існує оптимальна глибина зміцнення приповерхневого шару металу, яка забезпечує найвищий рівень втомних характеристик, і навпаки. Слід зазначити, що «оптимальний» рівень зміцнення приповерхневого шару титанових сплавів залежить від їхнього вихідного рівня міцності (твердості серцевини металу) і фазового складу. Так, зі збільшенням міцності в ряді ВТ1-0 \rightarrow ВТ5 оптимальний рівень поверхневого зміцнення ($K_{\text{опт}}$) при постійній глибині зміцненої зони (30 мкм) знижується з 70 до 60 % відповідно. При цьому відносний приріст границі втоми також знижується з 37,5 (ВТ1-0) до 24 % (ВТ5). Ще суттєвіше впливає на величину $K_{\text{опт}}$ фазовий склад сплаву. Наприклад, для псевдо- α -сплаву ОТ4-1 глибина зміцненої зони становить 45 мкм, а $K_{\text{опт}} = 35 \dots 40$ %. Це підтверджує тезу, що зі збільшенням кількості β -фази в титанових сплавах чутливість їх механічних властивостей, особливо втомних, до присутності газонасичених шарів зростає [5].

Опірність сповільненому руйнуванню за статичного навантаження. Одночасно з підвищенням опору втомі зміцнення приповерхневих шарів металу позитивно впливає на властивості титанових сплавів ВТ1-0, ПТ-7М та ОТ4-1 за умов сповільненого руйнування під тривалим статичним навантаженням, тобто такі зразки менш схильні до сповільненого руйнування за статичного навантаження (рис. 8).

На підставі низки досліджень визначено оптимальні параметри твердорозчинного зміцнення елементами проникнення приповерхневого шару металу, які забезпечують підвищення втомних характеристик тонкостінних (≤ 4 мм) виробів з α - та псевдо- α -титанових сплавів (рис. 9).

Висновки

1. Встановлено та експериментально підтверджено, що за регламентованого твердорозчинного зміцнення приповерхневих шарів елементами проникнення (киснем, азотом, вуглецем) спостерігається ефект підвищення ресурсних характеристик α - і псевдо- α -титанових сплавів за різного навантаження (втомна за обертового та чистого згину, довготривала міцність), зокрема для зразків сплаву ВТ1-0 максимальний приріст границі втоми становить 38 %.

2. Для α - і псевдо- α -титанових сплавів за модифікування елементами проникнення визначено оптимальні параметри приповерхневого шару (відносний приріст твердості та розмір зміцненого шару), які забезпечують максимальний прояв ефекту підвищення ресурсу. Так, для псевдо- α -сплаву ОТ4-1 при насиченні киснем відносний приріст твердості поверхні становить 35...40 % за глибини зміцненої зони 45 мкм.

Список літератури

1. Fujii Hideki, Takahashi Kazuhiro, Yamashita Yoshito (2003) Application of titanium and its alloys for automobile parts. *Nippon Steel Technical Report*, **88**, 70–75.
2. Патон Б.С., Шпак А.П., Івасишин О.М. (2006) Основні напрямки наукових досліджень з титанової проблематики в Україні. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, **3**, 5–17.
3. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. (2009) *Титановые сплавы*. Состав, структура, свойства: справочник. Москва, ВИЛС–МАТИ.
4. Fedirko V.M., Luk'yanenko A.G., Pohrelyuk I.M., Trush V.S. (2017) Increasing the serviceability of products from single-phase titanium alloys by thermochemical treatment. *Materials Performance and Characterization*, **6(4)**, 642–655.
5. Федірко В.М., Пічугін А.Т., Лук'яненко О.Г., Сірик З.О. (1996) Оцінка експлуатаційної придатності виробів з титанових сплавів різних структурних класів з газонасиченими шарами. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, **6**, 49–54.

References

1. Fujii Hideki, Takahashi Kazuhiro, Yamashita Yoshito (2003) Application of titanium and its alloys for automobile parts. *Nippon Steel Technical Report*, **88**, 70–75.
2. Paton, B.E., Shpak, A.P., Ivasyshyn, O.M. (2006) Main directions of research of titanium problems in Ukraine. *Fiz.-Khim. Mekhanika Materialiv*, **3**, 5–17 [in Ukrainian].
3. Pliin, A.A., Kolachev, B.A., Polkin, I.S. (2009) *Titanium alloys. Composition, structure, properties*: Refer. Book. Moscow, VILS-MATI [in Russian].
4. Fedirko, V.M., Lukyanenko, A.G., Pohrelyuk, I.M., Trush, V.S. (2017) Increasing the serviceability of products from single-phase titanium alloys by thermochemical treatment. *Materials Performance and Characterization*, **6(4)**, 642–655.
5. Fedirko, V.M., Pichugin, A.T., Lukyanenko, O.G., Siryk, Z.O. (1996) Evaluation of serviceability of products of titanium alloys of different structural classes with gas-saturated layers. *Fiz.-Khim. Mekhanika Materialiv*, **6**, 49–54 [in Ukrainian].

ВЛИЯНИЕ УПРОЧНЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАМИ ВНЕДРЕНИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ ТИТАНА

В.Н. Федирко, В.С. Труш, А.Г. Лукьяненко, И.Н. Погрелюк
Физико-механический институт им. Г.В. Карпенко НАН Украины.
79060, г. Львов, ул. Наукова, 5. E-mail: pminasu@ipm.lviv.ua

В данной работе на образцах промышленных титановых сплавов VT1-0, VT5, PT-7M, OT4-1 диффузионным насыщением из контролируемой газовой среды формировали приповерхностные газонасыщенные слои глубиной 10...70 мкм с разным уровнем упрочнения поверхности. Показана возможность повышения ресурсных характеристик α - и псевдо- α -сплавов титана при различных видах нагружения (усталость, длительная прочность) при регламентированном твердорастворном упрочнении приповерхностных слоев металла элементами внедрения (O, N, C). Определены оптимальные параметры модифицирования приповерхностного слоя металла (градиент твердости и глубина упрочнения), которые обеспечивают максимальную реализацию этого эффекта для каждого из элементов внедрения. Библиогр. 5, табл. 1, рис. 9.

Ключевые слова: титановые сплавы; приповерхностный слой; элементы внедрения; кислород, азот; углерод; статическое нагружение; усталостная долговечность

IMPACT OF SUBSURFACE LAYERS HARDENED BY INTERSTITIAL ELEMENTS ON TITANIUM ALLOY MECHANICAL PROPERTIES

V.M. Fedirko, V.S. Trush, O.G. Lukianenko, I.M. Pogrelyuk
G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine.
5 Naukova Str., 79060, Lviv, Ukraine. E-mail: pminasu@ipm.lviv.ua

In this work, subsurface gas-saturated layers 10 to 70 μm deep with different level of surface hardening were formed by diffusion saturation in a controlled gas medium on samples of commercial titanium alloys VT1-0, VT5, PT-7M, OT4-1. The possibility of improving the life characteristics of α - and pseudo- α titanium alloys under different kinds of loading (fatigue, long-term strength) under the conditions of regulated solid solution hardening of subsurface layers of metal by interstitial elements (O, N, C) is shown. Optimal parameters of modification of subsurface metal layer (hardness gradient and hardening depth) were determined, which provide maximum realization of this effect for each of the interstitial elements. Ref. 5, Tabl. 1, Fig. 9.

Key words: titanium alloys; subsurface layer; interstitial element; oxygen; nitrogen; carbon; static loading; fatigue life

Надійшла до редакції 26.07.2018

ВЕДУЩАЯ ВЫСТАВКА В МИРЕ
СВАРКА • РЕЗКА • ОБРАБОТКА

LET'S JOIN
THE WORLD!

13. – 17. сентября 2021

РЕГИСТРИРУЙТЕСЬ
СЕЙЧАС!

SCHWEISSEN & SCHNEIDEN
No. 1
IN THE WORLD

MESSE ESSEN

DVS GERMAN WELDING SOCIETY

www.schweissen-schneiden.com