

# МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI: 10.20535/kpissn.2021.3.236275

УДК 669.295:621.785

В.С. Труш\*, І.М. Погрелюк, О.Г. Лук'яненко  
 ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів, Україна  
 \*corresponding author: trushvasyl@gmail.com

## ВПЛИВ ДИFUZІЙНОГО НАВУГЛЕЦЮВАННЯ ПРИПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ МЕТАЛУ НА ЗБІЛЬШЕННЯ ВТОМНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ ТИТАНУ ТА ЙОГО СПЛАВІВ

Received: 7 Jul. 2021. Accepted: 7 Dec. 2021.

**Проблематика.** На втомні властивості титану та його сплавів впливає наявність приповерхневого шару, збагаченого вуглецем. Залежно від умов насичення, навуглецьований шар може складатися з карбідної фази та/або дифузійного шару (твердого розчину проникнення вуглецю). Формування лише дифузійного шару без карбідної фази може слугувати засобом підвищення довговічності титану за знакозмінного навантаження. Тому виникає необхідність визначити параметри навуглецьованого шару (рівень поверхневого зміцнення –  $K$  і товщина зміцненого шару –  $l$ ), які забезпечать підвищення втомних властивостей.

**Мета дослідження.** Встановити вплив дифузійного насичення вуглецем з газового середовища на довговічність титанових сплавів.

**Методика реалізації.** Проведено навуглецьовання титанових сплавів у вуглецевмісній газовій суміші. На титанових сплавах сформовано лише твердий розчин проникнення вуглецю з різним рівнем поверхневого зміцнення  $K$  і товщиною зміцненого шару  $l$ . Проведено втомні випробовування дослідних зразків за чистого й обертового згину.

**Результати дослідження.** Показано вплив рівня поверхневого зміцнення  $K$  титану VT1-0 на втомну довговічність за малоциклового чистого згину та встановлено його оптимальне значення. Наведено втомну міцність навуглецьованих зразків титанових сплавів VT5 й OT4-1 за обертового згину з різним рівнем поверхневого зміцнення  $K$ . Досліджено дислокаційну структуру сплаву VT1-0 у вихідному стані та за оптимального рівня поверхневого зміцнення.

**Висновки.** Встановлено, що за рівня поверхневого зміцнення  $K = 90\%$  та товщини зміцненого шару  $l = 20$  мкм зростає втомна довговічність за чистого згину зразків навуглецьованого титану VT1-0. З'ясовано, що за рівня поверхневого зміцнення  $K = 90\%$  зразків зі сплавів VT5 й OT4-1 підвищується їх втомна міцність за обертового згину. Виявлено, що за оптимального рівня поверхневого зміцнення  $K = 90\%$  у приповерхневому шарі титану VT1-0 формується впорядкована дислокаційна структура.

**Ключові слова:** титановий сплав; дифузійне насичення вуглецем; втомна довговічність; втомна міцність; чистий згин; обертовий згин.

### Вступ

Завдяки високій питомій міцності титан і його сплави є перспективними конструкційними матеріалами, зокрема для авіації, де заміна сталевих деталей на титанові призводить до значного зменшення маси конструкцій [1], [2]. Унаслідок високої хімічної спорідненості титану до неметалів, зокрема кисню, азоту, вуглецю, можливе формування зміцненого приповерхневого шару, що впливає на експлуатаційні властивості ви-

робу в цілому [3]–[6]. Через пошук позитивного використання цього ефекту постала проблема цілеспрямованого керування інтенсивністю фізико-хімічних процесів у системі “титан – газове середовище” для формування регламентованого фазово-структурного стану приповерхневих шарів, які забезпечують покращення відповідних експлуатаційних характеристик матеріалу (втомна міцність і довговічність тощо). Перспективним засобом покращення фізико-механічних властивостей титану може слугувати

Рекомендуємо цитувати цю статтю так: В.С. Труш, І.М. Погрелюк, О.Г. Лук'яненко, “Вплив дифузійного навуглецьовання приповерхневого шару металу на збільшення втомної довговічності титану та його сплавів”, *Наукові вісті КПІ*, № 3, с. 57–63, 2021. doi: 10.20535/kpissn.2021.3.236275.

Please cite this article as: V.S. Trush, I.M. Pohrelyuk, and A.G. Lukyanenko, “Influence of diffusion carbonizing of the surface metal layer on increasing the fatigue life of titanium and its alloys”, *KPI Science News*, no. 3, pp. 57–63, 2021. doi: 10.20535/kpissn.2021.3.236275.

інженерія поверхні титанових сплавів, зокрема дифузійне насичення з контрольованого газового середовища [7], для якого характерні відтворюваність процесу, можливість обробляти деталі довільної форми, навіть з отворами, висока адгезія модифікованих шарів до матриці завдяки можливості формування глибокого дифузійного підшару.

Модифікування титану вуглецем у порівнянні з азотом і киснем дає більший ефект поверхневого зміцнення внаслідок різниці в атомних радіусах елементів втілення (0,077 нм для вуглецю, 0,075 нм для азоту і 0,073 нм для кисню) [8]. Максимальна поверхнева мікротвердість, якої можна досягнути науглецюванням, азотуванням й оксидуванням, становить 32, 20 і 10 ГПа відповідно (для необробленого титану – 3...4 ГПа). Проте внаслідок малої розчинності вуглецю в титані у порівнянні з азотом й особливо киснем за науглецювання дифузійний шар неглибокий. Як свідчить діаграма стану системи «титан – вуглець» (рис. 1), вуглець здатний розчинитися в  $\alpha$ - і  $\beta$ -модифікаціях титану в невеликих кількостях. Максимальна розчинність вуглецю в  $\alpha$ -титані становить  $0,48 \pm 0,02$  ат. %, а у  $\beta$ -титані – змінюється від 0,15 ат. % за 920 °С до 0,8 ат. % за 1750 °С. Однак за наявності в системі кисню й азоту його розчинність збільшується.

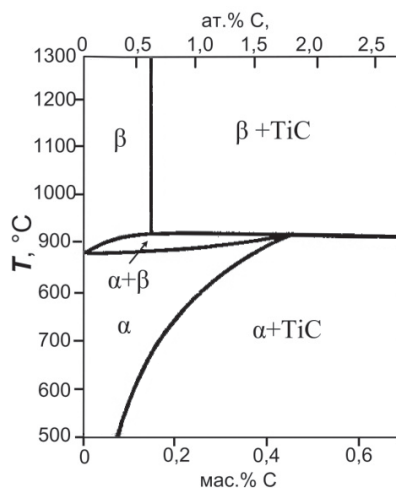


Рис. 1. Частина діаграми стану системи «титан – вуглець» [9].

Вуглець підвищує температуру поліморфного перетворення титану (до 920 °С) і дещо розширює область існування  $\alpha$ -фази, тому є  $\alpha$ -стабілізатором (рис.1).

У науково-технічній літературі зазначено, що науглецювання підвищує твердість титану, знижує в'язкість, збільшує зносостійкість, однак ідеться про об'ємне легування вуглецем. У багатьох

роботах запропоновано легувати вуглецем лише приповерхневий шар, що реалізується дифузійним насиченням у контрольованому вуглецевмісному газовому середовищі. Слід зазначити, що обробка титану за температур вище поліморфного перетворення ( $T = 882$  °С) спричиняє різкий ріст зерна, що негативно впливає на експлуатаційні властивості, зокрема втомні. Тому дифузійне науглецювання виконано за температури  $T = 750$  °С.

Зазначимо, що насичення титану вуглецем використовується в основному для формування карбідних покриттів, які мають підвищену зносо- та корозійну стійкість. Відомості про позитивний вплив науглецюваного приповерхневого шару на втомні властивості у літературі практично відсутні, однак така інформація дала б змогу значно розширити спектр використання титанових сплавів.

### Постановка задачі

Встановити вплив дифузійного насичення вуглецем із газового середовища на довговічність титанових сплавів.

### Матеріали та методика досліджень

Для досліджень було обрано  $\alpha$ -сплави – технічно чистий титан VT1-0, сплав OT4-1 (3,5...5,0 Al; 0,8...2,0 Mn) і VT5 (4,8...6,4 Al).

Приповерхневий шар титанових сплавів збагачували вуглецем шляхом обробки у потоці газової суміші (83,3 об. % Ar + 16,7 об. %  $C_3H_8$ ) із тиском  $P = 0,106$  Па за температур  $T = 750$  °С, 800 °С і 850 °С протягом 1, 3 і 5 год. Процес здійснювали в установці, розробленій у ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України (рис. 2).

На зразках формували поверхневі газонасичені шари завглибшки 20 мкм з різним рівнем зміцнення  $5\% < K < 90\%$ , який визначали за величиною відносного приросту твердості поверхні  $K = ((H_{0,49}^{нов} - H_{0,49}^{серц}) / H_{0,49}^{серц}) \cdot 100$  %, де:  $H_{0,49}^{нов}$  – твердість поверхні титану;  $H_{0,49}^{серц}$  – твердість серцевини титану за навантаження на інтенсор 0,49 Н.

Втомні випробування зразків симетричним чистим згином й обертовим згином проводили в нормальних умовах за стандартною методикою [10], [11] на машинах, розроблених і виготовлених у ФМІ [12], [13].

Дослідження дислокаційної структури зміцненого шару проводили за допомогою просвічувального електронного мікроскопа JEM-100CX II за прискорювальної напруги 100 кВ. Зразки для електронікроскопічних досліджень виготовляли за стандартною методикою.

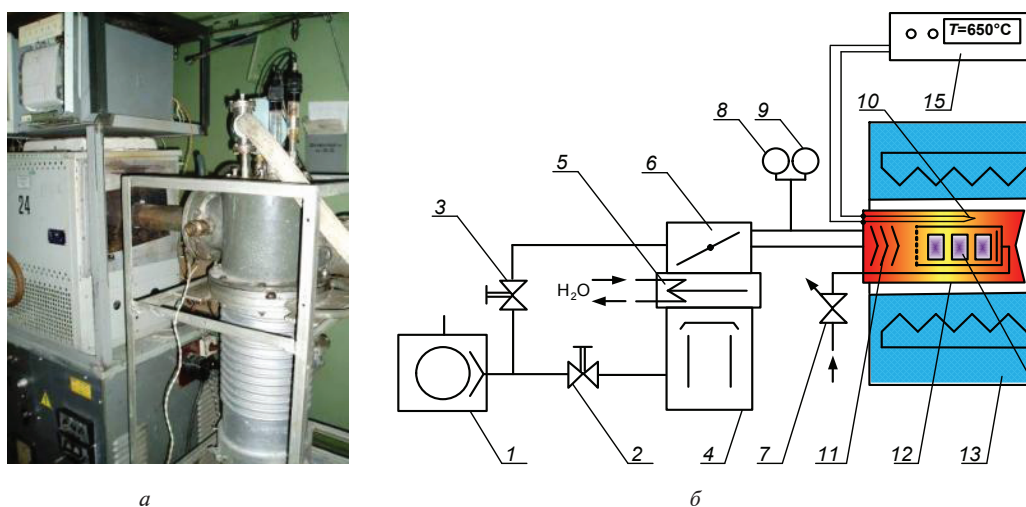


Рис. 2. Загальний вигляд (а) та принципова схема експериментальної установки (б): 1 – форвакуумна механічна помпа, 2 – запірний кран, 3 – запірний кран байпаса, 4 – дифузійна високовакуумна помпа, 5 – пастка дифузійної помпи, 6 – керований затвор, 7 – вентиль-натікач, 8 – термопарний вакуумний давач, 9 – іонізаційний високовакуумний давач, 10 – термопара, 11 – система екранів, 12 – реакційна ампула, 13 – піч, 14 – контейнер зі зразками, 15 – система керування нагрівом печі

Параметри ґратки та фазовий склад поверхневих шарів металу визначали на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3.0 у монохроматичному  $\text{CuK}\alpha$ -випромінюванні з фокусуванням трубки за схемою Брегга–Брентано.

### Результати експериментальних досліджень

За даними рентгенівського фазового аналізу, у вихідному стані титану VT1-0 зафіксовано лише дифракційні лінії  $\alpha$ -Ti (рис. 3, а).

Після обробки титану VT1-0 у газовій суміші (83,3 об. % Ag + 16,7 об. %  $\text{C}_3\text{H}_8$ ) за  $P = 0,106$  Па,  $T = 850$  °С,  $\tau = 5$  год зафіксовані рефлекси ліній  $\alpha$ -Ti, послаблені внаслідок екранування шаром TiC на поверхні (рис. 3, б). Інтенсивність рефлексів TiC менша ніж  $\alpha$ -Ti, що пояснюється малою товщиною шару TiC ( $\leq 1$  мкм). Під шаром TiC існує дифузійний шар твердого розчину вуглецю в титані, що підтверджується розширенням ліній  $\alpha$ -Ti (див. рис. 3, б).

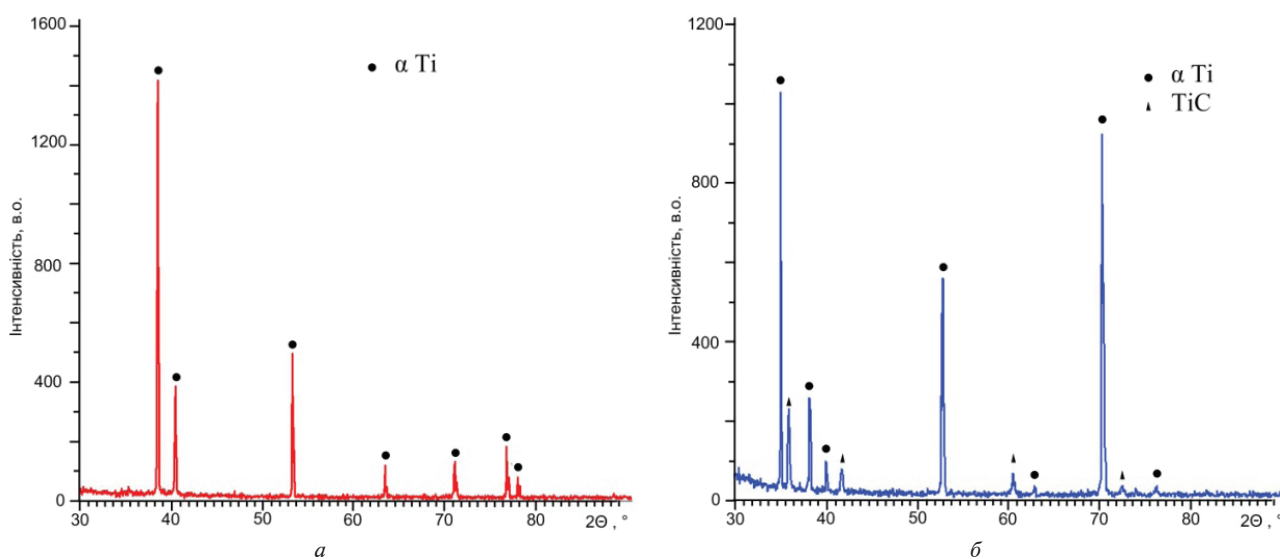


Рис. 3. Дифрактограми, зняті з поверхні титану VT1-0: а – у вихідному стані (перед хіміко-термічною обробкою), б – після обробки в газовій суміші (Ag + 16,7%  $\text{C}_3\text{H}_8$ ) за  $P = 0,106$  Па,  $T = 750$  °С,  $\tau = 5$  год за температур 800 °С

На зразках із титанових сплавів обробкою у вуглецевмісному газовому середовищі сформовано зміння різних рівнів  $K = 55 \%$ ,  $K = 75 \%$ ,  $K = 90 \%$  та випробувано ці зразки чистим згином. Установлено залежність втомної довговічності титанового сплаву ВТ10 за симетричного чистого згину від рівня зміцнення поверхні  $K$ . За результатами досліджень, найбільший приріст втомної довговічності зафіксовано за  $K = 90 \%$ , тому цей рівень поверхневого зміцнення прийнято за оптимальний, за якого приріст довговічності становить  $\delta N = 30 \%$  за амплітуди деформації циклу  $\pm \varepsilon_a = 0,6 \%$  (рис. 4).

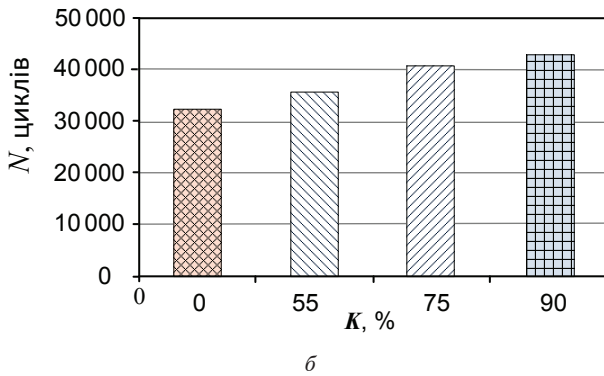
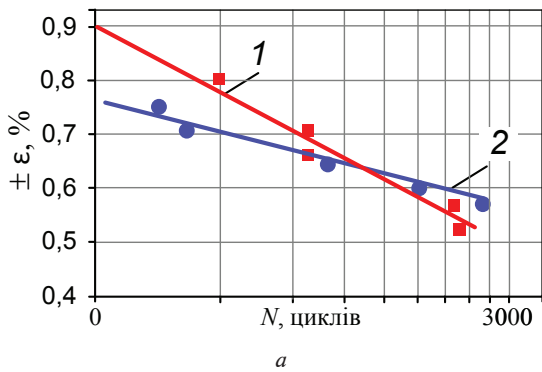


Рис. 4. Втомна довговічність титанового сплаву ВТ10-0: а – криві втомної довговічності зразків у вихідному стані (1) та за зміцнення вуглецем (2); б – за чистого згину ( $\pm \varepsilon_a = 0,6 \%$ ) залежно від рівня зміцнення  $K$ .

Втомна довговічність титанових сплавів ВТ5 й ОТ4-1 за обертового згину при рівні зміцнення  $K = 90 \%$  також підвищується (рис. 5). Отже, позитивний вплив зміцнення вуглецем приповерхневого шару металу на втомну довговічність зразків за симетричного чистого згину в порівнянні з ненасиченими зразками зафіксовано за низької амплітуди деформації циклу  $\pm \varepsilon_a = 0,6 \%$ . Це можна пояснити тим, що за втомного навантаження згином стан поверхневого шару є ключовим фактором визначення опірності до руйнування.

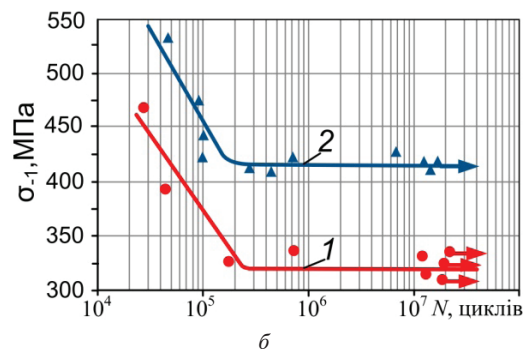
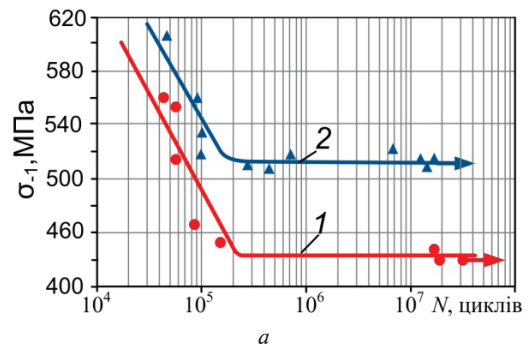


Рис. 5. Втомна довговічність титанових сплавів ВТ5 (а) та ОТ4-1 (б) за обертового згину з різним рівнем зміцнення: 1 –  $K = 0 \%$ , 2 –  $K = 90 \%$

Руйнування дослідних зразків відбулось у робочій частині, що підтверджує симетричність їх закріплення та навантаження (рис. 6).

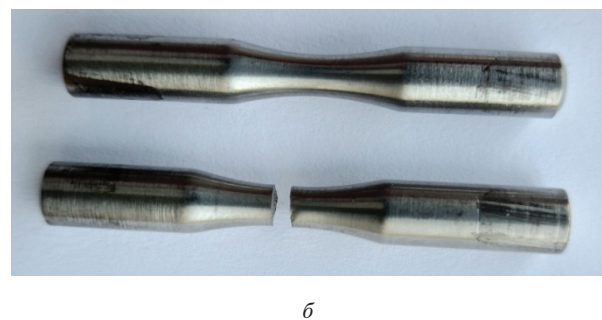
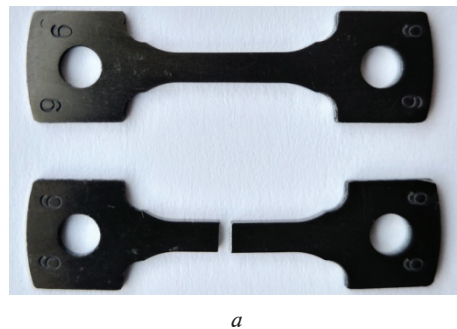
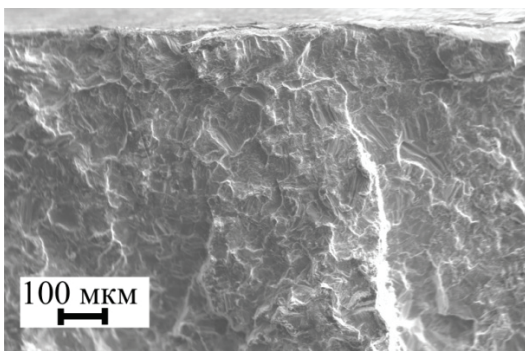
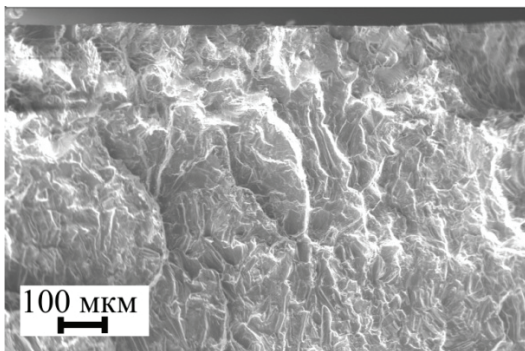


Рис. 6. Зовнішній вигляд зразків до та після навантаження за умови чистого згину (а) та обертового згину (б)

Результати фрактографічних досліджень зламів сплаву VT1-0 підтверджують вищу енергоємність руйнування за оптимального рівня зміцнення ( $K = 90\%$ ) у порівнянні з вихідним ( $K = 0\%$ ) станом (рис. 7). Спостерігається подібнення мікрорельєфу руйнування (рис. 7, б) з очевидним зростанням частки мікрор'язкого складника в зламі у вигляді деформаційних гребенів. Фіксується зменшення розміру скольних фасеток. Отже, є кореляція між результатами механічних і фрактографічних досліджень.



а



б

Рис. 7. Вплив рівня зміцнення  $K$  поверхневого шару на характер руйнування зразків титанового сплаву VT1-0: а – вихідний стан ( $K = 0\%$ ), б –  $K = 90\%$

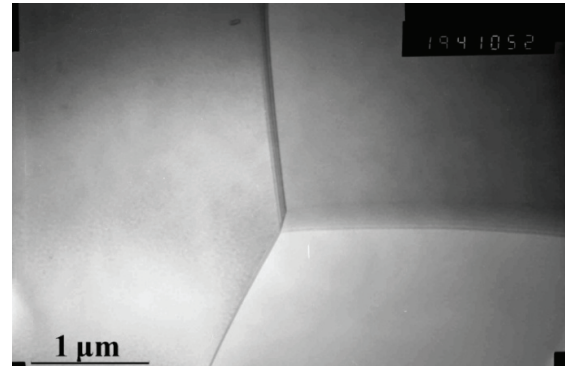
Враховуючи природу зміцнених шарів, зауважимо, що робочими температурами таких виробів буде діапазон від  $0,1 \cdot T_{nd}$  до  $0,2 \cdot T_{nd}$ . За таких низьких гомологічних температур (нижче  $0,4 \cdot T_{nd}$ ) основним механізмом у дії деформації металів є ковзання дислокацій [14]. Отже зміцнений шар проявляє блокувальний ефект для руху дислокацій, тобто утруднює їх рух, внаслідок чого підвищуються міцність і втомна довговічність як поверхневого шару зокрема, так і виробу загалом. Отже, одним із ключових аспектів прогнозування фізико-механічних характеристик виробів є відомості про дислокаційну структуру металу.

Важливою характеристикою мікроструктури є не лише кількість (густина) дислокацій, а і їхнє просторове взаємне орієнтування.

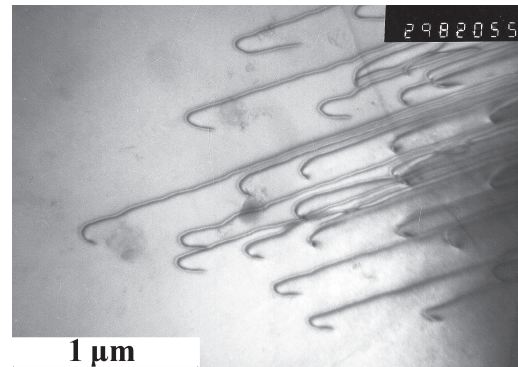
За даними трансмісійної електронної мікроскопії вивчено мікроструктуру зміцненого шару титанового сплаву VT1-0 залежно від рівня поверхневого зміцнення.

У мікроструктурі відпаленого не зміцненого титану (вихідний стан) немає дефектів як по тілу зерна, так і на його межах, а також не зафіксовано передвиділення фаз і поля напружень навколо них (рис. 8, а).

За оптимального рівня поверхневого зміцнення  $K = 90\%$  дислокації утворюють впорядковану структуру дислокаційних петель (рис. 8, б). Відомо, що рушійною силою перебудови дислокаційних субструктур є прагнення їхнього ансамблю до мінімізації внутрішньої енергії: за однакової густини реалізується просторовий розподіл дислокацій, який відповідає мінімальній енергії. Тому зі збільшенням зміцнення відбуваються зміни: хаотично розташовані дислокації та локальні скупчення трансформуються у впорядковану структуру.



а



б

Рис. 8. Мікроструктура технічно чистого титану VT1-0 у вихідному стані  $K = 0\%$  (а) та за оптимального рівня поверхневого зміцнення  $K = 90\%$  (б)

## Висновки

На основі експериментальних досліджень встановлено позитивний вплив науглецювання приповерхневого шару на втомну довговічність титану за симетричного чистого та обертового згину. Виявлено, що рівень поверхневого зміцнення  $K = 90\%$  забезпечує підвищення втомної довговічності технічно чистого титану VT1-0 за симетричного чистого згину на 30% за амплітуди деформації циклу  $\pm \varepsilon_a \leq 0,6\%$ . Встановлено, що рівень поверхневого зміцнення  $K = 90\%$  сприяє підвищенню втомної міцності зразків зі сплавів титану BT5 й OT4-1 за обертового згину з 430 до 520 МПа та 320 до 407 МПа відповідно. Виявлено, що за дифузійного зміцнення вуглецем у приповерхневому шарі металу змінюється дислокаційна структура, зокрема

за оптимального рівня зміцнення формується впорядкована дислокаційна структура.

У подальших дослідженнях доцільно встановити вплив рівня поверхневого зміцнення  $K$  зразків із науглецьованим приповерхневим шаром на їх опірність до руйнування за статичного й ударного навантаження. Також корисною з практичної точки зору буде інформація щодо температурного інтервалу випробувань, у якому зберігається ефект підвищення довговічності за зміцненого вуглецем приповерхневого шару металу.

Результати роботи можуть бути використані під час розроблення технологій хіміко-термічної обробки титанових сплавів для підвищення експлуатаційних характеристик виробів авіаційної техніки.

## References

- [1] G. Lütjering and J.C. Williams, *Titanium*, 2nd ed. Berlin, Germany: Springer-Verlag Heidelberg, 2007, 442 p. doi: 10.1007/978-3-540-73036-1.
- [2] V. N. Moiseyev, *Titanium Alloys. Russian Aircraft and Aerospace Applications*. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2006.
- [3] H. Güleriyüz, E. Atar, F. Seahjani, and H. Çimenoglu, "An overview on surface hardening of titanium alloys by diffusion of interstitial atoms," *Diffus. Found.*, vol. 4, pp. 103–116, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/df.4.103.
- [4] A. B. Kolomenskii, B. A. Kolachev, A. V. Degtyarev, and A. N. Roshchupkin, "Effect of the depth of removal of the gas-saturated layer on repeated static endurance and activity of OT4 and VT6ch titanium alloys," *Soviet Mater. Sci.*, vol. 27, no. 3, pp. 233–236, 1992. doi: 10.1007/bf00729045.
- [5] B. A. Kolachev, A. V. Mal'kov, and V. I. Sedov, "Effect of carbon on structure and plasticity of beta titanium alloys," *Metal Sci. Heat Treatment*, vol. 17, no. 3, pp. 226–228, Mar. 1975, doi: 10.1007/bf00663687.
- [6] M. V. Diamanti, S. Codeluppi, A. Cordioli, and M. P. Pedferri, "Effect of thermal oxidation process on fatigue behavior of Ti-4Al-2V alloy," *Surface Coatings Technol.*, vol. 203, no. 3–4, pp. 199–203, 2008, doi: 10.1080/17458080902769937.
- [7] V. M. Fedirko, A. G. Luk'yanenko, I. M. Pohrelyuk, and V. S. Trush, "Increasing the serviceability of products from single-phase titanium alloys by thermochemical treatment," *Mater. Performance Characterization*, vol. 6, no. 4, p. 20160071, Sep. 2017, doi: 10.1520/MPC20160071.
- [8] T. B. Massalski, H. Okamoto, P. R. Subramanian, and L. Kacprzak, Eds., *Binary Alloy Phase Diagrams*, 2nd ed., vol. 3. ASM International, 1990.
- [9] E. B. Trostyanskaya et al., *New materials in technology: textbook for technical colleges*, E. B. Trostyanskaya, B. A. Kolachev, and S. I. Silvestrovich, Eds., Moscow, USSR: Chemistry, 1964.
- [10] *Methods for mechanical testing of metals. Fatigue Test Methods*, GOST 25.502-79, 1986.
- [11] *Testing of metals; rotating bar bending fatigue test*, DIN 50113, 1982.
- [12] H. H. Maksymovych, *Micromechanical studies of the properties of metals and alloys*. Kyiv, Ukraine: Naukova Dumka, 1974.
- [13] H. H. Maksymovych, B. M. Savchin, S. M. Kudlak, and E. M. Lyutiy, *Micromachines for testing materials for low-cycle fatigue by the pure bending method*. Lviv, Ukraine: IPM, 1977.
- [14] H. J. Frost, *Deformation-Mechanism Maps: The Plasticity and Creep of Metals and Ceramics*. Pergamon Press, 1982.

В.С. Труш, И.М. Погрелюк, О.Г. Лукьяненко

#### ВЛИЯНИЕ ДИФфуЗИОННОГО НАУГЛЕРОЖИВАНИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МЕТАЛЛА НА ПОВЫШЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТИТАНА И ЕГО СПЛАВОВ

**Проблематика.** На усталостные свойства титана и его сплавов влияет наличие приповерхностного слоя, обогащенного углеродом. В зависимости от условий насыщения, науглероженный слой может состоять из карбидной фазы и/или диффузионного слоя (твердого раствора внедрения углерода). Формирование только диффузионного слоя без карбидной фазы может служить средством повышения долговечности титана при знакопеременной нагрузке. Поэтому возникает необходимость определить параметры науглероженного слоя (уровень поверхностного упрочнения  $K$  и размер упрочненного слоя  $l$ ), обеспечивающие повышение усталостных свойств.

**Цель исследования.** Установить влияние диффузионного насыщения углеродом из газовой среды на долговечность титановых сплавов.

**Методика реализации.** Проведено науглероживание титановых сплавов в углеродсодержащей газовой смеси. На титановых сплавах сформирован только твердый раствор внедрения на основе углерода с разным уровнем поверхностного упрочнения  $K$  и толщиной упрочненного слоя  $l$ . Проведены усталостные испытания образцов в условиях чистого изгиба и изгиба с вращением.

**Результаты исследований.** Показано влияние уровня поверхностного упрочнения  $K$  образцов из титана VT1-0 на усталостную долговечность при малоцикловом чистом изгибе и выявлено оптимальное его значение. Приведена усталостная прочность образцов науглероженных титановых сплавов VT5 и OT4-1 при изгибе с вращением с разным уровнем поверхностного упрочнения  $K$ . Исследована дислокационная структура сплава VT1-0 в исходном состоянии и при оптимальном уровне поверхностного упрочнения.

**Выводы.** Установлено, что при уровне поверхностного упрочнения  $K = 90\%$  и толщине упрочненного слоя  $l = 20$  мкм повышается усталостная долговечность при чистом изгибе образцов науглероженного титана VT1-0. Показано, что при уровне поверхностного упрочнения  $K = 90\%$  образцов из сплавов VT5 и OT4-1 повышается их усталостная прочность при изгибе с вращением. Выявлено, что при оптимальном уровне поверхностного упрочнения  $K = 90\%$  в приповерхностном слое титана VT1-0 формируется упорядоченная дислокационная структура.

**Ключевые слова:** титановый сплав; диффузионное насыщение углеродом; усталостная долговечность; усталостная прочность; чистый изгиб; изгиб с кручением.

V.S. Trush, I.M. Pohrelyuk, A.G. Lukyanenko

#### INFLUENCE OF DIFFUSION CARBONIZING OF THE SURFACE METAL LAYER ON INCREASING THE FATIGUE LIFE OF TITANIUM AND ITS ALLOYS

**Background.** The presence of a carbon-enriched near-surface layer affects the fatigue properties of titanium. Depending on the saturation conditions, the carburized layer can consist of a carbide phase and/or a diffusion layer (interstitial solid solution based on carbon). The formation of only a diffusion layer without a carbide phase, can serve as a means for increasing the durability of titanium under alternating loading. Therefore, it becomes necessary to establish the parameters of the carburized layer (the level of surface hardening  $K$  and the hardened layer thickness  $l$ ), which will provide an increase in fatigue properties.

**Objective.** The purpose of the paper is to establish the effect of thermal diffusion saturation with carbon from a gas medium on the durability of titanium alloys.

**Methods.** Carburizing of titanium alloys in a carbon-containing gas mixture has been carried out. On titanium alloys, only an interstitial solid solution based on carbon is formed with different levels of surface hardening –  $K$  and the hardened layer thickness –  $l$ . Fatigue tests of specimens were carried out under conditions of pure bending and bending with rotation.

**Results.** The influence of the surface hardening level  $K$  of the VT1-0 titanium on the fatigue life in low-cycle pure bending is shown and its optimal value is revealed. The fatigue strength of the carburized VT5 and OT4-1 titanium alloys in bending with rotation with different levels of surface hardening  $K$  is presented. The dislocation structure of the VT1-0 alloy in the initial state and at the optimal level of surface hardening is investigated.

**Conclusions.** It was found that the fatigue life of the carburized VT1-0 titanium specimens in pure bending increases at the level of surface hardening  $K = 90\%$  and the hardened layer thickness  $l = 20$   $\mu\text{m}$ . It was found that the fatigue strength of specimens from the VT5 and OT4-1 alloys in bending with rotation increases at the level of surface hardening  $K = 90\%$ . It was revealed that an ordered dislocation structure is formed on the VT1-0 titanium at the optimal level of surface hardening  $K = 90\%$ .

**Keywords:** titanium alloy; diffusion carbon saturation; fatigue life; fatigue strength; pure bending; bending with rotation.

Рекомендована Радою  
Інституту матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
7 липня 2021 року

Прийнята до публікації  
7 грудня 2021 року