

ВПЛИВ ТЕРМОДИФУЗІЙНОГО НАСИЧЕННЯ У ВУГЛЕЦЕВМІСНОМУ ГАЗОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ НА ВТОМНУ ДОВГОВІЧНІСТЬ ТА ТВЕРДІСТЬ ПРИПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ VT1-0

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

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

вул. Наукова, 5, м. Львів, Україна, 79060. E-mail: trushvasyl@gmail.com.

Показано, що насичення у вуглецевмісному газовому середовищі призводить до формування зміцненого приповерхневого шару на технічно чистому титані VT1-0. Експериментально виявлено чутливість твердості поверхні та розмір зміцненого шару залежно від температурно-часових параметрів насичення. За результатами експериментальних досліджень побудовано гістограми твердості поверхні та розподілу твердості у приповерхневому шару при різних трьох температурах (750°C, 800°C, 850°C), а також за трьох різних тривалості насичення (1 год., 3 год., 5 год.). Показано, що підвищення тривалості насичення прямо пропорційно впливає на розмір зміцненого шару на титановому сплаві VT1-0. У роботі детально показано методичні аспекти роботи, зокрема описано послідовність виготовлення тонколистових зразків для втомних випробувань та наведено експериментальне обладнання на якому проведено дослідження. Враховуючи, що титанові вироби експлуатуються за втомного навантаження, тому у роботі також наведено результати втомної довговічності за симетричного чистого згину тонколистового (~1 мм) зразка з різними параметрами зміцненого шару, тобто після різних режимів хіміко-термічної обробки. Наведено принципову схему установки на втомні випробування. Так як насичення приповерхневого шару вуглецем проведено з газового середовища, то слід відмітити практичну перевагу запропонованого способу насичення титанового сплаву вуглецем по відношенню до інших способів насичення вуглецем. Адже, по-перше, таке насичення забезпечує обробку деталей складної просторової конфігурації, а також деталей з отворами як наскрізними, так і глухими. По-друге, насичення з вуглецевмісного середовища проведено за не високих температур, а саме за температур нижче поліморфного перетворення і тому така обробка не призведе до значних фазово-структурних змін в об'ємі матеріалу (наприклад, збільшення розміру зерна, що суттєво погіршує механічні властивості), однак суттєво змінить стан приповерхневих шарів. Через невисоку температуру оброблення дана обробка може бути рекомендована як фінішна.

Ключові слова: титанові сплави, термодифузійне насичення, вуглецевмісне газове середовище, приповерхневий шар, твердість поверхні, втомна довговічність.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОДИФУЗИОННОГО НАСЫЩЕНИЯ В УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩЕЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЕ НА УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ И ТВЕРДОСТЬ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT1-0

В. С. Труш, И. Н. Погрелюк, В. Н. Федирко, А. Г. Лукьяненко

Физико-механический институт им. Г.В. Карпенко НАН Украины

ул. Наукова, 5, г. Львов, Украина, 79060. E-mail: trushvasyl@gmail.com.

Показано, что насыщение в углеродсодержащей газовой среде приводит к формированию упрочненного приповерхностного слоя на технически чистом титане VT1-0. Экспериментально выявлена чувствительность твердости поверхности и размера упрочненного слоя в зависимости от температурно-временных параметров насыщения. По результатам экспериментальных исследований построены гистограммы твердости поверхности и распределения твердости в приповерхностном слое при различных трех температурах (750°C, 800°C, 850°C), а также за трех разных продолжительности насыщения (1 ч., 3 ч., 5 ч.). Показано, что повышение продолжительности насыщения прямо пропорционально влияет на размер упрочненного слоя на титановом сплаве VT1-0. В работе подробно показано методические аспекты работы, в частности описано последовательность изготовления тонколистовых образцов для усталостных испытаний и приведены экспериментального оборудования, на котором проведено исследование. Учитывая, что титановые изделия эксплуатируются при усталостной нагрузке, то в работе также приведены результаты усталостной долговечности при симметричном чистого изгиба тонколистового (1 мм) образца с разными параметрами упрочненного слоя, то есть после различных режимов химико-термической обработки. Приведено принципиальную схему установки на усталостные испытания. Так как насыщение приповерхностного слоя углеродом проведено с газовой среды, то следует отметить практическое преимущество предлагаемого способа насыщения титанового сплава углеродом по отношению к другим способам науглероживание. Во-первых, такое насыщение обеспечивает обработку деталей сложной пространственной конфигурации, а также деталей с отверстиями как сквозными, так и глухими. Во-вторых, насыщения с углеродсодержащих среды проведено за невысоких температур, а именно при температурах ниже полиморфного превращения и поэтому обработка не приведет к значительным фазово-структурным изменениям в объеме материала (например, увеличение размера зерна, что существенно ухудшает механические свойства),

однако существенно изменит состояние приповерхностных слоев. Ввиду не высокой температуры обработки данная обработка может быть рекомендована как финишная.

Ключевые слова: титановые сплавы, термодиффузионное насыщения, углеродсодержащая газовая среда, поверхностный слой, твердость поверхности, усталостная долговечность.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. 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 суттєво зросла зацікавленість до модифікування поверхневого шару металу з метою підвищення експлуатаційних властивостей виробів з титанових сплавів, що пов'язано з появою нових технологій обробки титанових сплавів та розширенням сфери їх застосування [1–4]. Окреме місце займає модифікування елементами втілення, оскільки класичні уявлення про негативний вплив газонасиченого шару, зокрема, на втому [5–8], були переглянуті з появою результатів про можливість підвищення ряду фізико-механічних властивостей (корозійних, антифрикційних, втомних тощо) титанових сплавів твердорозчинним зміцненням (твердорозчинне зміцнення - термодифузійне насичення приповерхневого шару металу елементами втілення (кисень, азот, вуглець) з формуванням градієнту твердості без наявності фазової плівки) поверхневого шару металу [9–11]. Але й серед таких робіт погляди на роль елементів втілення, як модифікувальних елементів, лишаються неоднозначними [8, 12, 13].

Наприкінці минулого сторіччя проявив себе науково-технічний напрям з використання позитивного впливу газонасичення киснем на механічні властивості титанових сплавів [4, 13, 14], який з часом закріпився і набув свого розвитку [15, 16]. Для усвідомленого використання цього ефекту виникла проблема цілеспрямованого керування інтенсивністю фізико-хімічних процесів у системі «титан (титановий сплав) – газове середовище» для формування регламентованого фазово-структурного стану поверхневих шарів, який забезпечує покращення відповідних експлуатаційних характеристик матеріалу (втомна міцність, довговічність, тощо) [2, 12, 13].

Однак для твердорозчинного зміцнення поверхні титанових сплавів, окрім кисню, застосовують й інші елементи втілення - азот, вуглець тощо – та їх комбінацію. Звідси виникає питання про можливість отримання ефекту підвищення втомних характеристик стосовно інших домішок втілення, його фізичну природу та можливість застосування для підвищення фізико-механічних характеристик титанових сплавів різних структурних класів за різних умов навантаження. Окрім цього, у більшості випадків, газонасичений шар служить підґрунтям для функціональних дифузійних покриттів, які загалом знижують втому та статичну міцність виробів з титанових сплавів, тому питання зменшення цього негативного впливу за рахунок позитивного ефекту від регламентованого градієнтного зміцненого домішками втілення є актуальним.

Як свідчить діаграма стану системи «титан – вуглець» (рис. 1) [1, 3, 4], вуглець здатний розчинятися в α - і β -модифікаціях титану у невеликих кількостях. Максимальна розчинність вуглецю в α -титані складає $0,48 \pm 0,02$ ат.%, а у β -титані – змінюється від 0,15 ат.% при 920°C до 0,8 ат.% при 1750°C [1, 3]. Однак за наявності в системі кисню і

азоту його розчинність збільшується [1, 3]. Підвищуючи температуру поліморфного перетворення титану (до 920°C), вуглець дещо розширює область існування α -фази, тому є α -стабілізатором.

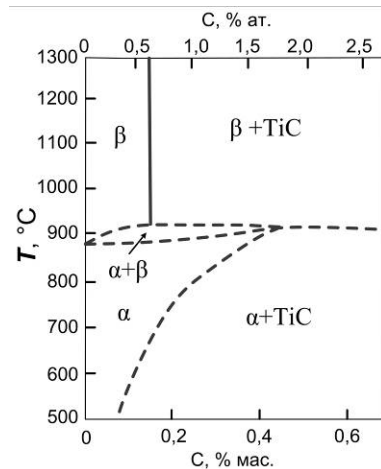


Рисунок 1 – Частина діаграми стану системи «титан – вуглець» [3]

Атоми вуглецю розміщуються в октаедричних порожнинах ГЦУ - ґратки α -титану і утворюють з ним лише одну карбідну фазу – монокарбід TiC , що характеризується широкою областю гомогенності (від 11 до 20 % або 33...50 ат. % при перитектичній температурі). Наявність такої області визначається в більшості випадків дефектами вуглецевої підґратки. При стехіометричному складі карбід титану містить 13...20 мас. % титану (чи 37...50 ат. %) [4] і має високу температуру плавлення (від 2940 до 3250°C) [4, 17 – 20]. Ідеальна стехіометрія у фазі TiC зазвичай не спостерігається. Кристалізуючись у кубічній системі, карбід титану має ГЦК - ґратку (типу NaCl) з періодом $a = 0,4319...0,4328$ нм [4, 20]. Вуглець збільшує періоди ґратки твердого розчину на основі α -фази титану, причому період c більшою мірою, ніж a [17].

Однак, при модифікуванні титану вуглецем можливо не лише формування сполук, але й формування твердого розчину втілення на основі вуглецю [3].

Модифікування титану вуглецем у порівнянні з азотом та киснем викликає більший ефект поверхневого зміцнення внаслідок різниці в атомних радіусах елементів втілення (0,077 нм для вуглецю, 0,075 нм для азоту і 0,73 нм для кисню). Максимальна поверхнева мікротвердість, якої можна досягнути в результаті науглецювання, азотування та оксидування, складає відповідно 32, 20 і 10 ГПа, відповідно, в той час, як для необробленого титану вона складає 3...4 ГПа [3]. Проте внаслідок малої розчинності вуглецю в титані у порівнянні з азотом і, особливо, киснем при науглецюванні дифузійний шар неглибокий. Тому карбідні покриття характеризуються різким градієнтом властивостей при переході через межу поділу з матрицею [1, 3, 4].

Формування поверхневого шару металу із підвищеною твердістю та певного фазово-структурного стану, що спричинено твердорозчинним зміцнен-

ням, приводить до зміни механічних властивостей титану та зумовлює особливості його руйнування [2].

Тому мета даної роботи – встановити вплив термодифузійного насичення вуглецем з газового середовища на твердість приповерхневого шару та вторну довговічність титанового сплаву ВТ1-0.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Для насичення вуглецем приповерхневого технічно чистого титану ВТ1-0 використано установку для відпалу в вакуумі та контрольованих газових середовищах. В якості середовища для насичення вуглецем використано газову суміш аргону з пропаном, об'ємний вміст якого складав 16,7%.

Схема режиму насичення вуглецем титану наведена на рис. 2. Зразки титанового сплаву до температури насичення нагріто у вакуумі $P = 26,6$ мПа, при досягненні робочої температури ($T = 750, 800, 850^\circ\text{C}$) в реакційну камеру напущено газова суміш ($\text{Ar} + 16,7\%\text{C}_3\text{H}_8$), тиск якої за рахунок постійного її напуску (натікання) підтримувався на рівні $P(\text{Ar}+\text{C}_3\text{H}_8) = 0,106$ Па, парціальний тиск пропану складав $P\text{C}_3\text{H}_8 = 18$ мПа. Постійна концентрація насичувальної складової (C_3H_8) забезпечувалася натіканням вуглецевмісної газової суміші. Після закінчення витримки $\tau = 1, 3, 5$ год камеру вакуумовано і зразки охолоджено разом з піччю.

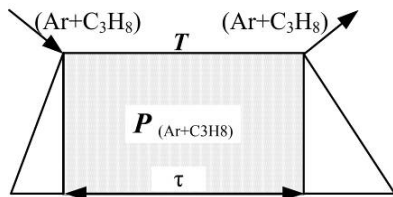


Рисунок 2 – Схема насичення вуглецем титану

Для втомних випробувань симетричним чистим згином використовували плоскі зразки, які штампували з тонколистового матеріалу в «шахматному» порядку (рис. 3).

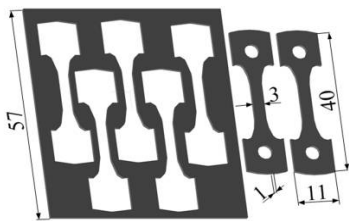
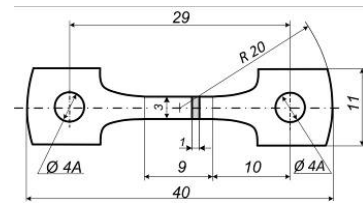


Рисунок 3 – Схема вирізки зразків для втомних випробувань

Отримані зразки доводили до потрібного розміру (рис. 4) в спеціальних шаблонах за допомогою ручного інструменту.

Після виготовлення зразки відпалювали у вакуумі за режимом: $T = 800^\circ\text{C}$, $\tau = 5$ год, $P = 0,05$ мПа, $I_{\text{min}} = 0,1$ мПаЧдм³Чс⁻¹ – для формування вихідного фазово-структурного стану (зняття залишкових напружень, видалення водню, гомогенізації й стабілізації структури). У вихідному стані міцність і пластичність досліджуваного титану становила: $\sigma_B = 450$ МПа, $\delta = 27\%$;



а)



б)

Рисунок 4 – Зразки для досліджень на малоцикловий чистий згин: креслення а), та зовнішній вигляд зразків б)

Випробування зразків з титанових сплавів на втому за умов малоциклового симетричного чистого згину проводили на машині УМДУ-01, що розроблена та виготовлена у ФМІ НАН України, принципова схема якої представлена на рис. 2.7. Машина дозволяє проводити випробування на малоцикловий чистий згин в режимі жорсткого навантаження із заданою амплітудою деформації ϵ за частоти навантаження $\nu = 0,5$ Гц на повітрі.

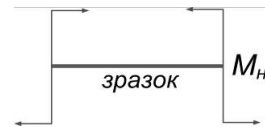


Рисунок 5 – Схема навантаження зразків при випробуванні на втому чистим згином

Машина дозволяє проводити випробування чистим згином у режимі жорсткого навантаження із заданою амплітудою деформації $\pm\epsilon_a$ за частоти навантаження $\nu = 0,5$ Гц на повітрі та в газових середовищах при температурі $T = 20 \dots 800^\circ\text{C}$.

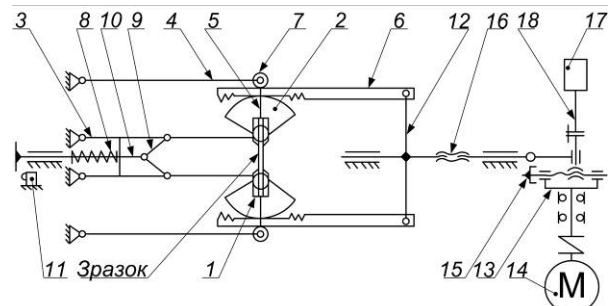


Рисунок 6 – Принципова схема машини (УМДУ-01) для випробувань матеріалів чистим згином:

- 1 – захват; 2 – зубчастий сектор; 3, 4 – вилка;
- 5 – ланка; 6 – рейка зубчата; 7 – ролик; 8 – пружина; 9, 10 – ланки; 11 – кінцевий вимикач;
- 12 – перекладина; 13 – регульовальний кривошип; 14 – двигун; 15 – мікрометричний механізм зміщення кривошипу; 16 – муфта для створення асиметричного циклу навантаження, 17 – лічильник; 18 – гнучкий вал

В результаті взаємодії пропану (C_3H_8) з розігрітою поверхнею титанових зразків відбувається реакція, при якій C_3H_8 розкладається на вуглець та воду. Вуглець, який вивільняється в результаті реакції дифундує в глиб металу, утворюючи дифузійний шар. Тим самим, утворюється градієнтний твердий розчин втілення вуглецю в титані, який проявляє себе через зміну мікротвердості на поверхні та у приповерхневому шарі металу (рис. 7–9).

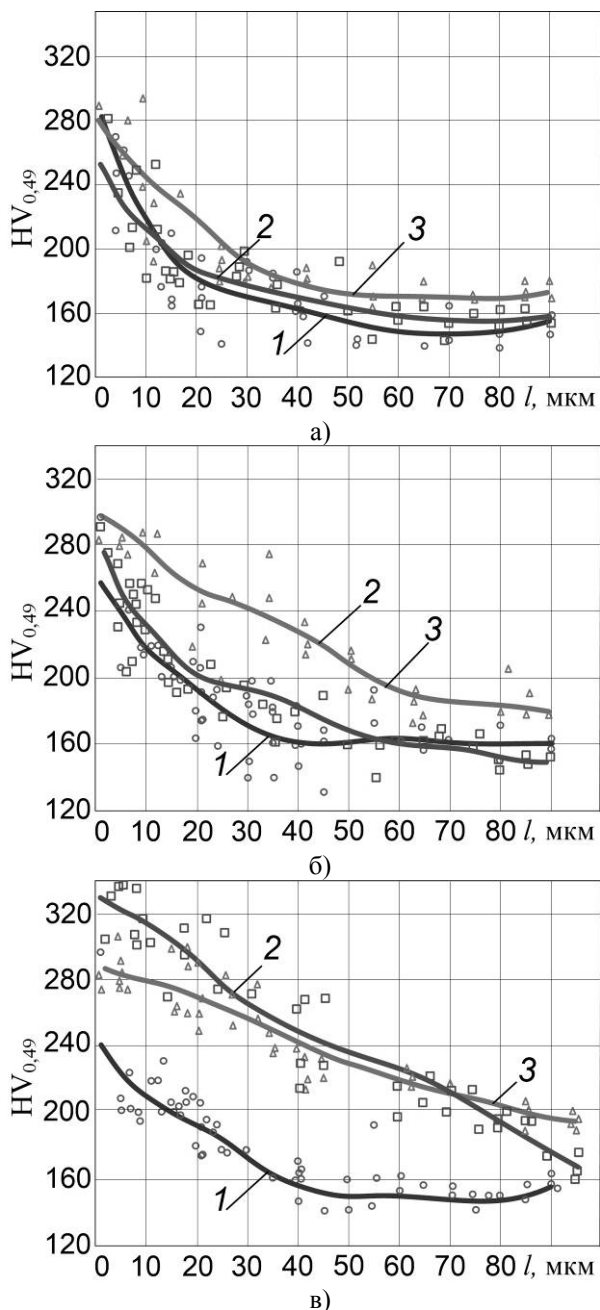


Рисунок 7 – Розподіл мікротвердості у приповерхневому шарі титанового сплаву VT1-0 залежно від температури та тривалості науглечування:
а – 750°C; б – 800°C; в – 850°C;
1 – 1 год; 2 – 3 год; 3 – 5 год.

Науглечування титанового сплаву VT1-0 підвищує поверхню твердість металу, створює зміцнений шар певної глибини, яка залежить від темпе-

ратури та тривалості насичення. А від так, такий градієнтно зміцнений приповерхневий шар впливає на механічні властивості зразків титанового сплаву VT1-0, зокрема на довговічність за чистого згину (10).

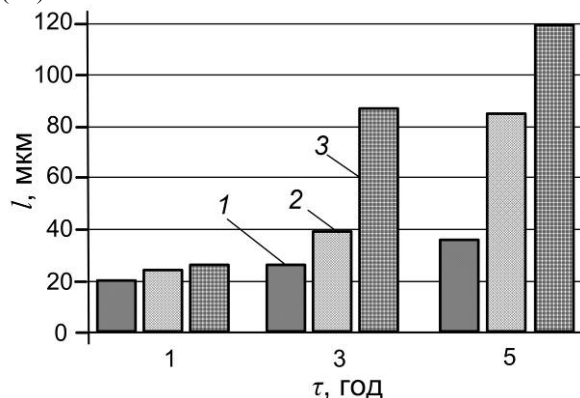


Рисунок 8 – Розмір зміцненого приповерхневого шару на зразках титанового сплаву VT1-0 в залежності від тривалості та температури науглечування: 1 – 750°C; 2 – 800°C; 3 – 850°C

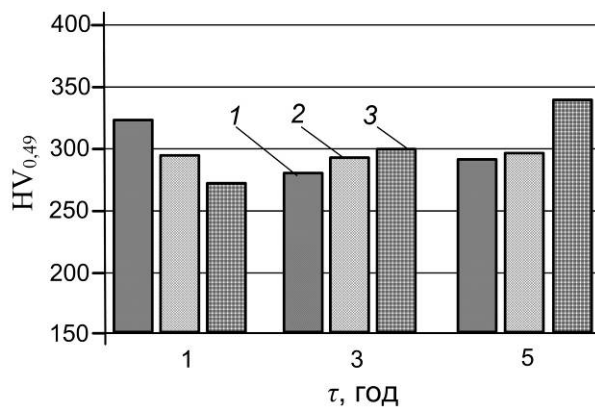


Рисунок 9 – Поверхнева твердість зразків титанового сплаву VT1-0 залежно від тривалості та температури науглечування: 1 – 750°C; 2 – 800°C; 3 – 850°C

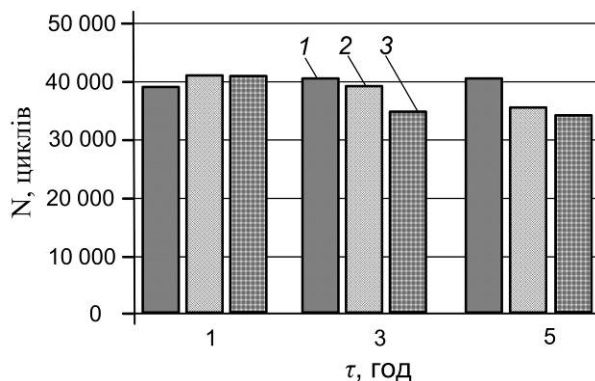


Рисунок 10 – Довговічність зразків титанового сплаву VT1-0 за чистого згину ($\pm \epsilon_a = 0,9\%$) залежно від тривалості та температури науглечування: а – 750°C; б – 800°C; в – 850°C

Аналіз отриманих результатів показує, що зі збільшенням температури та тривалості науглечування розмір зміцненого шару зростає (рис. 8). В той же час поверхнева твердість металу не підкоряється цій

залежності (рис. 9) оскільки під час насичення можуть утворюватися поверхневі плівки карбиду титану TiC, які перешкоджають насиченню. Зокрема такі припущення мають місце за температур насичення 750 та 800°C.

ВИСНОВКИ. Наведено експериментальні результати твердості поверхні та розподілу твердості по перерізу титанового сплаву VT1-0 після насичення у вуглецевмісному газовому середовищі. Показано, що розмір зміцненого шару прямо пропорційно залежить від тривалості насичення. Твердість поверхні не має лінійної залежності від параметрів обробки. Втомна довговічність зразків прямо пропорційна тривалості насичення за $T = 750^\circ\text{C}$.

ЛІТЕРАТУРА

1. Moiseyev V. N. Titanium Alloys. Russian aircraft and aerospace applications. London-New York-Singapore.: Taylor & Francis Group, 2006, 207 p.
2. Trush V., Fedirko V., Luk'yanenko A. Surface Treatment of Titanium Alloys in Oxygen-Containing Gaseous Medium. Titanium Alloys - Novel Aspects of Their Processing, 2019, 27-41.
3. Sha W., Malinov S. Titanium Alloys: Modelling of Microstructure, Properties and Applications Woodhead Publishing, Abington Hall, Abington, Cambridge, 2009, 569 p.
4. Lutjering G. and Williams J. C., (2007), Titanium. 2nd ed., Berlin, Springer, 438 p.
5. Dong H., Li X.Y., Dong H. Oxygen boost diffusion for the deep-case hardening of titanium alloys *Mater. Sci. Eng.*: A. 2000, Pp. 303–310.
6. Ebrahimi A. R., Zarei F., Khosroshahi R. A. Effect of thermal oxidation process on fatigue behavior of Ti-4Al-2V alloy. *Surface and coatings technology*. 2008, Vol. 203. Pp. 199–204.
7. Fukai H., Iizumi H., Minarawa K. and Ouchi C. The Effects of the oxygen-enriched surface layer on mechanical properties of $\alpha+\beta$ type titanium alloys *ISIJ International*. 2005, Vol. 45, No 1. Pp. 133–141.
8. Fedirko V. M., Luk'yanenko A. G., Pohrel'yuk I. M. Trush V. S. Increasing the Serviceability of Products From Single-Phase Titanium Alloys by Thermochemical Treatment. *Materials Performance and Characterization*. 2007, Vol. 6. No. 4. Pp. 642–655.
9. Guleryuz H., Cimenoglu H. Surface modification of a Ti–6Al–4V alloy by thermal oxidation. *Surface & coatings technology*. 2005, № 192. Pp. 164–170.
10. Yoshiki O. Bioscience and bioengineering of titanium materials. 2007, 437 p.
11. Ebrahimi A. R., Zarei F., Khosroshahi R. A. Effect of thermal oxidation process on fatigue behavior of Ti-4Al-2V alloy. *Surface and coatings technology*. 2008, Vol. 203. Pp. 199–204.
12. Fedirko V. M., Hehugin A. T., Luk'yanenko O. H., Siryk Z. O. Fedirko V. M. Evaluation of the serviceability of products made of titanium alloys with gas-saturated layers. *Materials Science*. 2006, 32(6), Pp. 688–693.
13. Kolomenskii A. B., Kolachev B. A., Degtyarev A. V., Roshchupkin A. N. Effect of the depth of removal of the gas-saturated layer on repeated static endurance and activity of OT4 and VT6c titanium alloys, *Materials Science*. 1992, Vol. 27 (3), pp. 233–236.
14. Liu Z., Welsch G. Effects of Oxygen and heat treatment on the mechanical properties of alpha and beta titanium alloys, *Metallurgical and Materials Transactions*, 1988, Vol. 19A (3), pp. 527–542.
15. Guleryuz H., Cimenoglu H. Surface modification of a Ti–6Al–4V alloy by thermal oxidation *Surface & coatings technology*. 2005, № 192. Pp. 164–170.
16. Trush V. S. Fedirko V. M., Luk'yanenko O. H. *Metodyka vyboru parametriv termodyfuziynoho nasychnenya tytanovykh splaviv dlya dosyahnennya zadano-ho rivnya poverkhnevoho zmitsnennya* [Method of selecting the parameters of thermal diffusion saturation of titanium alloy to achieve the preassigned level of surface strengthening] *Visnyk KrNU imeni Mykhayla Ostrohrads'koho*. 2009, №1 (114). Pp. 157–62.
17. Kal'ner V. D., Yurasov S. A., Sedunov V. K., Yevseyev YU. K. *Struktura i svoystva okislennykh karbonitridnykh pokrytyy* [Structure and properties of oxidized carbonitride coatings]. MiTOM. 1990, № 3. Pp. 54–58.

INFLUENCE OF THERMAL DIFFUSION SATURATION FROM A CARBON-CONTAINING GAS MEDIUM ON THE FATIGUE DURABILITY AND HARDNESS OF THE SURFACE LAYER OF THE TITANIUM ALLOY VT1-0

V. Trush, I. Pohrel'yuk, V. Fedirko, A. Lukyanenko

Karpenko Physical and Mechanical Institute of NAS of Ukraine

vul. Naukova, 5, Lviv, Ukraine, 79060. E-mail: trushvasyl@gmail.com

Purpose. Develop an algorithm for selecting the parameters of chemical heat treatment (temperature, processing time, gas medium rarefaction) of titanium alloys to form hardened surface layers with specified parameters (hardening level, hardened layer thickness) that will ensure the maximum increase in fatigue strength under cyclic loading. **Methodology.** Saturation of technically pure titanium alloy VT1-0 with carbon in a controlled gas medium. As a saturating medium, a gas mixture of argon with propane was used, the volume content of which was 16.7% (the partial pressure of propane was $P_{\text{C}_3\text{H}_8} = 18 \text{ MPa}$). A constant concentration of propane is ensured by leak of the carbon-containing gas mixture. For fatigue tests with symmetrical pure bending, flat samples 1 mm thick were used. After fabrication, the samples were annealed in high vacuum at $T = 800^\circ\text{C}$ for $\tau = 5$ hours. Carbon saturation at three different temperatures ($T = 750^\circ\text{C}$, $T = 800^\circ\text{C}$, $T = 850^\circ\text{C}$) and duration $\tau = 1$ hour, $\tau = 3$ hours, $\tau = 5$ hours. **Results.** The experimental results of surface hardness and hardness distribution over the cross section of a VT1-0 titanium alloy after various treatment conditions in a carbon-containing gas medium are presented. It is shown that the size of the hardened layer is directly proportional to the duration of saturation. The surface hardness is not linearly dependent on the processing parameters. The fatigue life of the samples is directly proportional to the duration of saturation at $T = 750^\circ\text{C}$. **Originality.** For the

first time, the results of surface hardness and the size of the hardened layer, as well as the fatigue life of the VT1-0 titanium alloy after carbon saturation from a gaseous medium, are presented. **Practical value.** The proposed method of saturation with carbon from a gas medium provides the formation of a hardened surface layer on parts with complex spatial configurations and parts with holes. Carbon saturation of the surface layer was carried out at temperatures below the polymorphic transformation, therefore, the proposed treatment does not lead to deterioration of the surface quality and can be used as a finish. References 17, figures 10.

Keywords: titanium alloys, thermal diffusion saturation, carbon-containing gas medium, surface layer, surface hardness, fatigue life.

REFERENCES

1. Moiseyev, V. N. (2006), Titanium Alloys. Russian aircraft and aerospace applications, London-New York-Singapore.: Taylor & Francis Group, 207 p.
2. Trush, V., Fedirko, V., Luk'yanenko, A. (2019), Surface Treatment of Titanium Alloys in Oxygen-Containing Gaseous Medium, Titanium Alloys, *Novel Aspects of Their Processing*, pp. 27-41.
3. Sha, W., Malinov, S. (2009), Titanium Alloys: Modelling of Microstructure, Properties and Applications, Woodhead Publishing, Abington Hall, Abington, Cambridge, 569 p.
4. Lutjering, G., Williams, J. C., (2007), Titanium, 2nd ed., Berlin, Springer, 438 p.
5. Dong, H., Li, X. Y., Dong, H. (2000), Oxygen boost diffusion for the deep-case hardening of titanium alloys, *Mater. Sci. Eng.*, pp. 303-310.
6. Ebrahimi, A. R., Zarei, F., Khosroshahi, R. A. (2008), Effect of thermal oxidation process on fatigue behavior of Ti-4Al-2V alloy, *Surface and coatings technology*, Vol. 203, pp. 199-204.
7. Fukai, H., Iizumi, H., Minarawa, K., Ouchi, C. (2005), The Effects of the oxygen-enriched surface layer on mechanical properties of $\alpha+\beta$ type titanium alloys, *ISIJ International*, Vol. 45, No 1, pp. 133-141.
8. 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*, Vol. 6, No. 4, pp. 642 - 655.
9. Guleryuz, H., Cimenoglu, H. (2005), Surface modification of a Ti-6Al-4V alloy by thermal oxidation, *Surface & coatings technology*, № 192, pp. 164-170.
10. Yoshiki, O. (2007), Bioscience and bioengineering of titanium materials, 437 p.
11. Ebrahimi, A. R., Zarei, F., Khosroshahi, R. A. (2008), Effect of thermal oxidation process on fatigue behavior of Ti-4Al-2V alloy, *Surface and coatings technology*, Vol. 203, pp. 199-204.
12. Fedirko, V. M., Hehugin, A. T., Luk'yanenko, O. H., Siryk, Z. O., Fedirko, V. M. (1996), Evaluation of the serviceability of products made of titanium alloys with gas-saturated layers, *Materials Science*, № 32(6), pp. 688-693.
13. Kolomenskii, A. B., Kolachev, B. A., Degtyarev, A. V., Roshchupkin, A. N. (1992), Effect of the depth of removal of the gas-saturated layer on repeated static endurance and activity of OT4 and VT6c titanium alloys, *Materials Science*, Vol. 27 (3), pp. 233-236.
14. Liu, Z., Welsch, G. (1988), Effects of Oxygen and heat treatment on the mechanical properties of alpha and beta titanium alloys, *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 19A (3), pp. 527-542.
15. Guleryuz, H., Cimenoglu, H. (2005), Surface modification of a Ti-6Al-4V alloy by thermal oxidation, *Surface & coatings technology*, № 192, pp. 164-170.
16. Trush, V. S., Fedirko, V. M., Luk'yanenko, O. H. (2019), "Metodyka vyboru parametriv termodyfuziynoho nasychennya tytanovykh splaviv dlya dosyahnennya zadanoho rivnya poverkhnevoho zmitsnennya" [Method of selecting the parameters of thermal diffusion saturation of titanium alloy to achieve the preassigned level of surface strengthening], *Visnyk Kremenchuts'koho natsional'noho universytetu imeni Mykhayla Ostrohradskiy* [Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University], №1, (114), pp. 157-62.
17. Kal'ner, V. D., Yurasov, S. A., Sedunov, V. K., Yevseyev, Yu. K. (1990), "Struktura i svoystva okislenykh karbonitridnykh pokrytyy" [Structure and properties of oxidized carbonitride coatings], *MiTOM*, № 3, pp. 54-58.

Стаття надійшла 01.06.2020.