

УДК 669.295:621.785.34

**О. Лук'яненко, канд. техн. наук; А. Пічугін, канд. техн. наук;
В. Труш; О. Ткачук, канд. техн. наук**

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

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМОДИФУЗІЙНОГО МОДИФІКУВАННЯ НА ТВЕРДОРОЗЧИННЕ ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНІ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ VT1-0

Резюме. Вивчено кінетику взаємодії титанового сплаву VT1-0 з розрідженим газовим середовищем. Виявлено взаємозв'язок між параметрами хіміко-термічної обробки (T , τ , p), твердорозчинним зміцненням поверхневих шарів металу і його фазово-структурним станом.

Ключові слова: титановий сплав, поверхневий шар, кисневмісне середовище.

A. Lukyanenko, A. Pichuhin, V. Trush, O. Tkachuk

EFFECT OF THE PARAMETERS OF THERMODIFFUSION MODIFICATION ON SOLID SOLUTION HARDENING OF THE SURFACE LAYERS OF TITANIUM ALLOY VT1-0

The summary. Kinetics of VT1-0 titanium alloy interaction with the rarefied atmosphere was studied. The interrelation between the parameters of the chemical-heat treatment (T , τ , p), interstitial hardening of the surface layers of metal and its phase-structural state was developed.

Key words: titanium alloy, near surface layers, oxygen-containing gaseous medium.

Вступ. Завдяки високій питомій міцності титан та сплави на його основі належать до ряду перспективних конструкційних матеріалів для авіації [1–3]. Сучасний розвиток науки і техніки висувають високі вимоги до експлуатаційних властивостей виробів з титанових сплавів, однак деякі природні фізико-механічні властивості титанових сплавів (підвищена реакційна здатність до взаємодії з киснем та азотом, високий коефіцієнт тертя та низький опір зносу, нестабільні втомні властивості тощо) звужують спектр їх використання. Одним із шляхів впливу на вищезгадані властивості є інженерія поверхні титанових сплавів, у тому числі модифікування поверхневого шару металу домішками втілення за термодифузійного насичення з газового середовища, яке широко застосовують для покращення експлуатаційних властивостей виробів різного призначення [4–7]. Відомо, що інтенсивність газонасичення залежить від ряду факторів, зокрема, температурно-часових та газодинамічних параметрів розрідженого газового середовища [8, 9]. Поряд з цим, вплив наведених факторів на кінетику газонасичення титанових сплавів вивчений недостатньо, що ускладнює визначення оптимальних параметрів процесу для досягнення заданого рівня зміцнення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні роки суттєво зростає 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 [1], були переглянуті з появою результатів про можливість підвищення ряду фізико-механічних властивостей (корозійних, антифрикційних, втомних тощо) титанових сплавів

твердорозчинним зміцненням поверхневого шару металу [10, 11]. Але й серед таких робіт погляди на роль кисню, як модифікувального елемента, залишаються неоднозначними [5, 6]. Наприкінці минулого сторіччя проявив себе науково-технічний напрям із використання позитивного впливу газонасичення киснем на механічні властивості титанових сплавів [12, 13], який з часом закріпився і набув свого розвитку [7, 9, 14–18]. 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) [19, 20]. У свою чергу, це передбачає вивчення кінетики взаємодії титанових сплавів із розрідженим газовим середовищем для прогнозування та моделювання кінцевих результатів

Мета роботи – встановити закономірності модифікування поверхні титанового сплаву VT1-0 елементами втілення залежно від параметрів термодифузійного насичення з розрідженого кисневмісного газового середовища.

Матеріали та методики досліджень. Об'єкт досліджень α -сплав VT1-0 - технічно чистий титан, що дозволяє уникнути впливу легувальних елементів на досліджувані процеси. Вивчали термодифузійне насичення (рис. 1) зразків сплаву VT1-0 у розрідженому кисневмісному газовому середовищі у діапазоні температурно-часових ($T = 650, 700, 750$ °C, $\tau = 1, 3, 5$ год) та газодинамічних ($P = 6,6 \times 10^{-3}; 1,33 \times 10^{-2}; 6,6 \times 10^{-2}$ Па, $I = 5 \times 10^{-5}$ Па·с⁻¹) параметрів. Такі діапазони параметрів хіміко-термічної обробки (ХТО) обрані, враховуючи можливість суміщення термодифузійного насичення зі штатною термообробкою однофазних α -титанових сплавів.

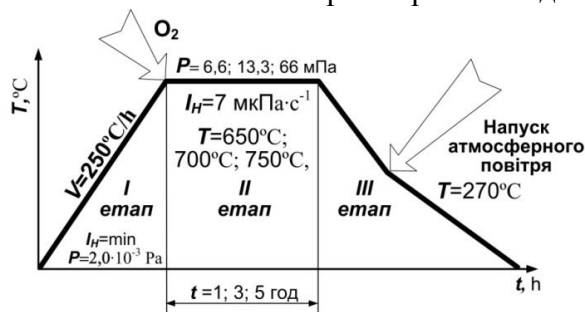


Рисунок 1. Схема режиму термодифузійного насичення титанового сплаву VT1-0 у динамічному розрідженому кисневмісному газовому середовищі

Термодифузійне насичення сплаву VT1-0 киснем здійснювали на лабораторному вакуумному термічному обладнанні, яке оснащено приладами для контролю параметрів газового середовища та системою дозованого напуску газів. Обладнання дозволяє змінювати параметри газового технологічного середовища (температуру, тиск, швидкість газового потоку, склад) у широких межах. У такий спосіб можна керувати інтенсивністю дифузійного насичення, що розширює можливості інженерії поверхні металу. Кінетику насичення титану вивчали методом дискретної термогравіметрії.

Результати та їх обговорення. Кінетика взаємодії титанового сплаву VT1-0 з розрідженим газовим середовищем. У результаті взаємодії титанових сплавів із розрідженим кисневмісним газовим середовищем можливий перебіг таких процесів, як сублімація, газонасичення та фазоутворення [21, 22]. За температур $T = 650 \dots 750$ °C і тисків $P = 6,6 \times 10^{-3} \dots 6,6 \times 10^{-2}$ Па, $I = 5 \times 10^{-5}$ Па·с⁻¹ вакуумної термообробки переважатимуть газонасичення та фазоутворення, про що свідчить аналіз зміни вільної енергії розчинення кисню в титані та утворення монооксиду титану (рис. 2).

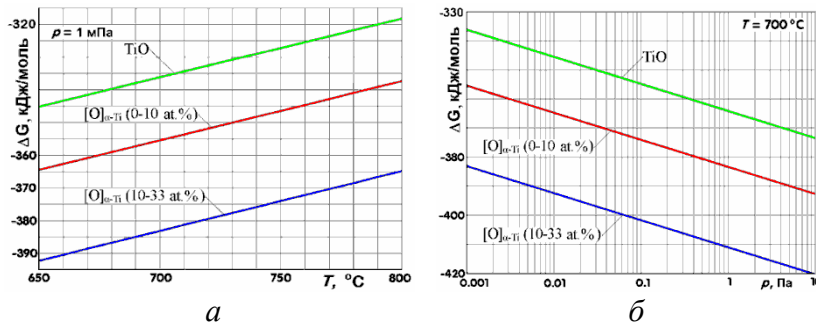


Рисунок 2. Зміна вільної енергії розчинення кисню в альфа-титані та утворення монооксиду титану залежно від температури (а) та залишкового тиску повітря (б)

Газонасичення та фазоутворення збільшують масу зразка досліджуваного титанового сплаву (рис. 3).

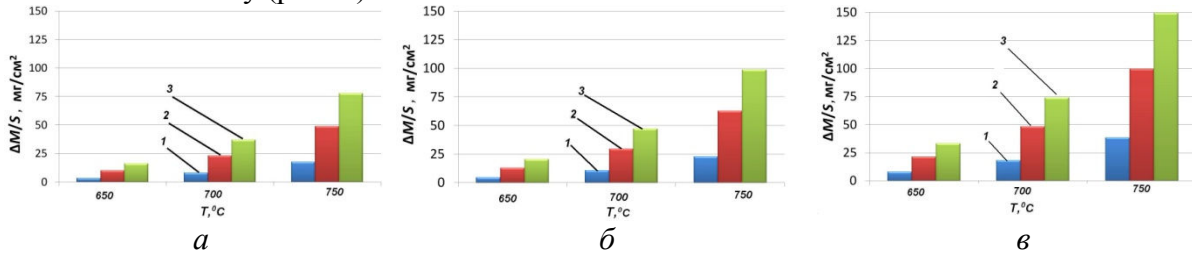


Рисунок 3. Вплив залишкового тиску газового середовища $P = 6,6 \cdot 10^{-3}$ Па (а), $P = 1,33 \cdot 10^{-2}$ Па (б) та $P = 6,6 \cdot 10^{-2}$ Па (в) упродовж 1 (1), 3 (2) та 5 (3) год на питому зміну маси зразків титанового сплаву VT1-0 після обробки у розрідженому кисневмісному газовому середовищі

Зі збільшенням температури та тиску газового середовища (парціального тиску кисню) інтенсифікується газонасичення сплаву VT1-0.

Кінетичні залежності у 5-годинному інтервалі при залишковому тиску $P = 1,33 \cdot 10^{-2}$ Па задовільно описуються лінійною залежністю (1). Це свідчить, що процеси контролюються поверхневими реакціями на межі розділу “метал–газ” [21]

$$\Delta M/S = (k^P \times \tau \pm A) \cdot 10^{-2}, [\text{г/м}^2] \quad (1)$$

де k^P – коефіцієнт лінійної швидкості при постійному тиску; A – довірчий інтервал з імовірністю 0,98 – наведені у таблиці 1.

Коефіцієнт лінійної швидкості за ізобарних умов термічно активованого процесу залежить від абсолютної температури T за рівнянням Арреніуса

$$k^P(T) = B \cdot \exp(-E_{\text{екс}}/RT) \pm C, [\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}] \quad (2)$$

де B – стала, яка не залежить від температури; $E_{\text{екс}}$ – загальна енергія активації процесу; C – довірчий інтервал з імовірністю 0,98 – наведені у таблиці 1.

Таблиця 1. Кінетичні параметри газонасичення титанового сплаву VT1-0 в ізобарних умовах

T, °C	При $P = 1,33 \cdot 10^{-2}$ Па				
	За формулою (1)		За формулою (2)		
	$k^P, \text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$	$A, \text{г} \cdot \text{м}^{-2}$	$B, \text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$	$E_{\text{екс}}, \text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1}$	$C, \text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$
650	3,23	1,67	$4 \cdot 10^7$	7 447,6	4,66
700	7,46	3,53			
750	15,8	4,21			

За даними термогравіметрії в ізотермічних умовах при різних тисках усі кінетичні закономірності задовільно описуються лінійними залежностями

$$\Delta M/S = (k^T \times \tau \pm F) \times 10^{-2}, [\text{г/м}^2] \quad (3)$$

де k^T – коефіцієнт лінійної швидкості при постійній температурі (700 °C); F – довірчий інтервал з імовірністю 0,98 – наведені у таблиці 2.

Залежність коефіцієнта лінійної швидкості за ізотермічних умов від

залишкового тиску середовища задовільно апроксимується логарифмічною залежністю:

$$k^T(P) = [H + J \cdot \ln(P)] \pm K, \quad [\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}] \quad (4)$$

де H, J – сталі, які не залежать від тиску; K – довірчий інтервал з імовірністю 0,98 – наведені в таблиці 2.

Таблиця 2. Кінетичні параметри газонасичення титанового сплаву ВТ1-0 в ізотермічних умовах

$P \times 10^2$ Па	При $T = 700 \text{ }^\circ\text{C}$				
	За формулою (1)		За формулою (2)		
	$k^T, \text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$	$F, \text{г} \cdot \text{м}^{-2}$	$H, \text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$	$J, \text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$	$K, \text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$
0,66	7,46	1,25	24,357	3,3804	1,05
1,33	9,57	1,53			
6,6	15,2	2,24			

Визначені кінетичні параметри можуть слугувати підґрунтям для подальшого фізико-математичного моделювання процесів газонасичення титанового сплаву ВТ1-0 у розрідженому кисневмісному газовому середовищі.

Вплив температури й тривалості насичення на твердість поверхні металу та глибину зміцненої зони. Утворення твердих розчинів втілення в металі під час дифузійного насичення титанових сплавів у розрідженому повітрі (переважно киснем) супроводжується підвищенням твердості металу. Тому характеристики газонасиченого шару визначали за мікротвердістю, яку вимірювали з поверхні та по перерізу газонасиченого зразка. За глибину газонасиченого шару приймали відстань від поверхні до зміцненого шару, твердість якого дорівнювала твердості серцевини зразка плюс похибка вимірювання [23]. Експериментальні результати про вплив параметрів термодифузійного насичення на відносний приріст поверхневої твердості досліджуваного сплаву титану K ($K = ((H\mu^п - H\mu^с)/H\mu^с) \times 100 \%$, де $H\mu^п$ – твердість поверхні металу; $H\mu^с$ – твердість його серцевини (рис. 4) та глибину газонасиченої зони l (рис. 5), визначені дюрOMETричним методом.

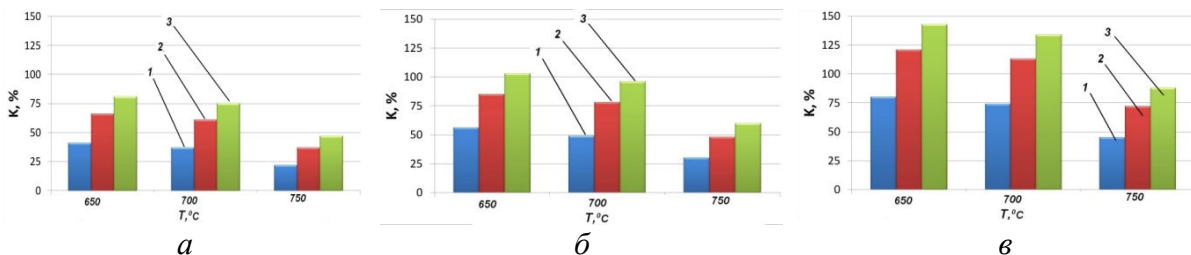


Рисунок 4. Приріст поверхневої твердості титанового сплаву ВТ1-0 у результаті взаємодії з розрідженим кисневмісним газовим середовищем при залишковому тиску $P = 6,6 \cdot 10^{-3}$ Па (а), $P = 1,33 \cdot 10^{-2}$ Па (б) та $P = 6,6 \cdot 10^{-2}$ Па (в) упродовж 1 (1), 3 (2) та 5 (3) год

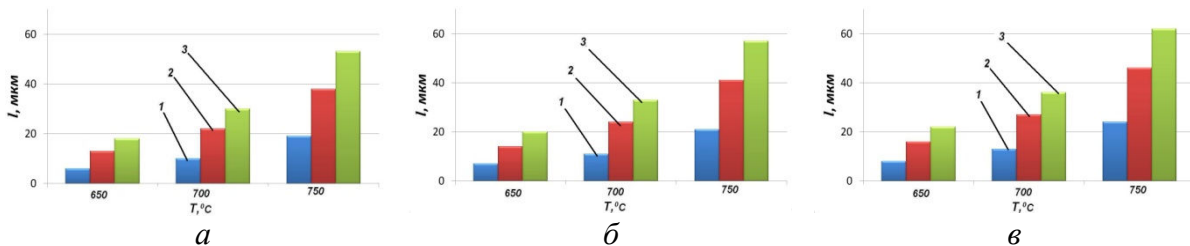


Рисунок 5. Розмір газонасиченого шару на титановому сплаві ВТ1-0 у результаті взаємодії з розрідженим кисневмісним газовим середовищем при залишковому тиску $P = 6,6 \cdot 10^{-3}$ Па (а), $P = 1,33 \cdot 10^{-2}$ Па (б) та $P = 6,6 \cdot 10^{-2}$ Па (в) упродовж 1 (1), 3 (2) та 5 год (3)

Аналіз отриманих результатів дозволяє виявити закономірності термодифузійного насичення титану, а саме:

- зі збільшенням тривалості насичення параметри газонасиченого шару H_{μ}^n , K та I зростають (рис. 4, 5);
- зі збільшенням температури насичення в діапазоні 650...750 °С за однакової тривалості та тиску газового середовища зростає глибина газонасиченої зони I та зменшується величина відносного приросту поверхневої твердості K (рис. 4).

Перша закономірність пов'язана зі збільшенням з часом концентрації домішки втілення у поверхневому шарі металу та її проникнення на більшу глибину. Другу закономірність можна пояснити пришвидшенням відводу від поверхні домішок втілення з підвищенням температури за рахунок збільшення їх коефіцієнта дифузії в титані [8, 21]. Тобто у розрідженому газовому середовищі потік кисню до поверхні металу стає меншим за потік відводу від поверхні в глиб металу за рахунок дифузії.

Газонасичення та сублимація під час термодифузійного насичення впливають не тільки на твердість, а ще й змінюють поверхню та фазово-структурний стан приповерхневого шару металу. Внаслідок сублимації та поверхневої дифузії виявляються границі зерен, на деяких зернах з'являється ступінчастий мікрорельєф (рис. 6).

Насичення киснем стабілізує α -фазу титану у поверхневому шарі металу та збільшує його твердість. У дифузійному шарі виділяють альфований та перехідний шари. Альфований шар відрізняється за структурою від основного металу підвищеним умістом α -фази, що легко виявляється металографічно (рис. 7).

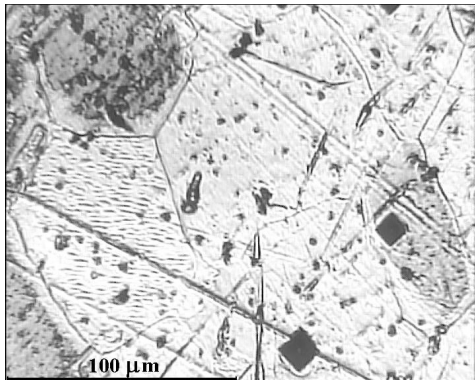


Рисунок 6. Структура поверхні сплаву VT1-0 після ХТО ($T = 700$ °С, $P = 6,6 \times 10^{-3}$ Па, $\tau = 5$ год).
Більший відбиток алмазної пірамідки (навантаження 0,49 N) отриманий до термообробки, менший – після термообробки

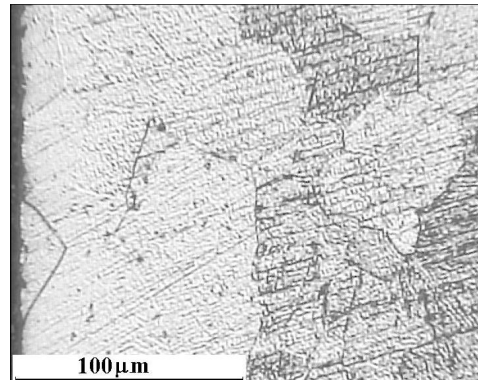


Рисунок 7. Структура поверхневого шару сплаву VT1-0 ($T = 750$ °С, $P = 6,6 \times 10^{-3}$ Па, $\tau = 5$ год)

Часто цей шар представлений однією лише α -фазою. Перехідний шар за мікроструктурою помітно не відрізняється від основного металу, але йому притаманна більша мікротвердість.

Вплив парціального тиску кисню на твердість поверхні металу та глибину зміцненої зони. Окрім температурно-часових параметрів на рівень поверхневого зміцнення впливають газодинамічні параметри газового середовища (парціальний тиск хімічно-активних складових та динамічність – I – швидкість натікання). Вплив цих чинників треба враховувати під час прогнозування наслідків термодифузійного насичення титанового сплаву VT1-0 у розрідженому газовому середовищі.

Розглянемо детальніше вплив зміни тиску газового середовища ($P = 6,6 \times 10^{-3}$, $1,33 \times 10^{-2}$, $6,6 \times 10^{-2}$ Па, $I = 5 \times 10^{-5} \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$). Згідно з отриманими результатами (рис. 4, 5) зі

збільшенням тиску, при постійній температурі, поверхнева твердість та глибина зміцненої зони α -сплаву ВТ1-0 зростають.

Термодифузійне насичення здійснювали за умов динамічності розрідженого газового середовища. Тобто залишковий тиск середовища визначається динамічною рівновагою потоків газу, що відкачується та натікає у реакційну камеру ззовні. Швидкість натікання слід обмежувати, тому що збільшення швидкості кисневмісного газового потоку (повітря), що натікає, впливає на кінетику взаємодії аналогічно збільшенню його тиску [24]. Збільшення натікання у вакуумну систему суттєво інтенсифікує газонасичення титанового сплаву ВТ1-0 (рис. 8).

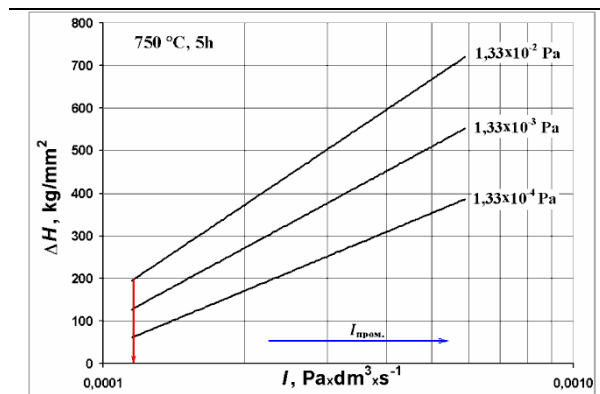


Рисунок 8. Вплив швидкості натікання на приріст поверхневої твердості титанового сплаву ВТ1-0

Висновки. Згідно з отриманими результатами встановлено, що:

– газонасичення титанового сплаву ВТ1-0 у кисневмісному газовому середовищі $P = 6,6 \times 10^{-3} \dots 6,6 \times 10^{-2}$ Па у температурному інтервалі $T = 650 \dots 750$ °C упродовж 5 год відбувається за лінійним законом і процеси контролюються поверхневими реакціями на межі розділу “метал – газ”, визначені кінетичні параметри газонасичення сплаву ВТ1-0 киснем в ізобарних та ізотермічних умовах;

– зі збільшенням тривалості насичення ($\tau = 1 \dots 5$ год), за однакових умов (тиск газового середовища $P = 6,6 \times 10^{-3} \dots 6,6 \times 10^{-2}$ Па й температура $T = 650 \dots 750$ °C), параметри газонасиченого шару: твердість поверхні H_{μ}^n , відносний приріст поверхневої твердості K та глибина газонасиченої зони l зростають;

– зі збільшенням температури в діапазоні $650 \dots 750$ °C за сталого тиску й тривалості насичення зростає глибина газонасиченої зони l та зменшується відносний приріст поверхневої твердості K ;

– зі збільшенням тиску ($P = 6,6 \times 10^{-3} \dots 6,6 \times 10^{-2}$ Па та $I = 5 \times 10^{-5} \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$) при постійній температурі й тривалості поверхнева твердість та глибина зміцненої зони α -сплаву ВТ1-0 зростають, аналогічним чином впливає збільшення швидкості натікання кисневмісного газового середовища у реакційну камеру.

Список використаної літератури

1. Ильин, А.А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник [Текст] / А.А. Ильин, Б.А. Колачев, И.С. Полькин. – М.: ВИС–МАТИ, 2009. – 520 с.
2. Lutjering G. Titanium / Gerd Lutjering, James C. Williams. – [2-nd edition]. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. – 438 p.
3. Moiseyev, Valentin N. Titanium alloys: Russian aircraft and aerospace application / Valentin N. Moiseyev // Advances in metallic alloys; V. 5. [A series edited by J.N. Fridlyander and D.G. Eskin]. – USA: Taylor & Francis Group, 2006. – 216 p.
4. Патон, Б.Є. Основні напрямки наукових досліджень з титанової проблематики в Україні [Текст] / Б.Є. Патон, А.П. Шпак, О.М. Івасишин // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – №3. – С. 5–17.

5. The Effects of the Oxygen-enriched Surface Layer on Mechanical Properties of $\alpha+\beta$ Type Titanium Alloys / Hideaki Fukai, Hiroshi Iizumi, Kuni-nori Minarawa and Chiaki Ouchi // ISIJ International. – 2005. – Vol. 45, N 1. – P. 133–141.
6. Ebrahimi A.R. Effect of thermal oxidation process on fatigue behavior of Ti-4Al-2V alloy / A.R. Ebrahimi, F. Zarei, R.A. Khosroshahi // Surface & Coatings Technology. – 2008. – 203. – P. 199–203.
7. Пічугін, А. Підвищення опірності титанових сплавів втомі дифузійним насиченням поверхні [Текст] / А. Пічугін, О. Лук'яненко, В. Труш // Дев'ятий міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові: праці. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2009. – С. 237–239.
8. Цвиккер, У. Титан и его сплавы [Текст] / У. Цвиккер. – М.: Металлургия, 1979. – 512 с.
9. Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посібник. [Текст]; під заг. ред. В.В. Панасюка. Т. 9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / О.П. Остащ, В.М. Федірко та ін.; під ред. О.П. Остаща, В.М. Федірка. – Львів: Сполом, 2007. – 1068 с.
10. Surface modification of titanium alloys for combined improvements in corrosion and wear resistance / A. Bloyce, P.-Y. Qi, H. Dong, T. Bell // Surface and Coatings Technology. – 1998. – N 107. – P. 125–132.
11. Enhancing the microstructure and properties of titanium alloys through nitriding and other surface engineering methods / Ani Zhecheva, Wei Sha, Savko Malinov, Adrian Long // Surface & Coatings Technology. – 2005. – 200. – P. 2192–2207.
12. О влиянии глубины съема газонасыщенного слоя на повторно-статическую долговечность и пластичность титановых сплавов ОТ4 и ВТ6ч [Текст] / А.Б. Коломенский, Б.А. Колачев, А.В. Дегтярев, А.Н. Рошупкин // Физ.-хим. механика материалов. – 1991. – № 3. – С. 25–28.
13. Оцінка експлуатаційної придатності виробів з титанових сплавів різних структурних класів з газонасиченими шарами [Текст] / В.М. Федірко, А.Т. Пічугін, О.Г. Лук'яненко, З.О. Сірик // Физ.-хим. механика материалов. – 1996. – № 6. – С. 49–54.
14. Pat. WO 99/04055 PCT C23C 8/10, 8/80. Method of case hardening / Applicants: Dong H., Morton P., Bloyce A., Bell T. – № 9715175.7; Priority date 19.07.97; Publication date 28.01.99.
15. Пат. 2205890 Российская федерация, МПК7 C22 F1/18. Способ поверхностной обработки изделий из титана и титановых сплавов [Текст] / Коломенский А.Б.; заявитель и патентообладатель Коломенский А.Б. – заявл.: 2001125102/02; Опубл.: 10.06.2003.
16. Витривалість титанового сплаву ВТ1-0 після твердорозчинного поверхневого зміцнення [Текст] / А.Т. Пічугін, В.М. Федірко, О.Г. Лук'яненко, В.С. Онуферко // Физ.-хим. механика материалов, 2005. – Т. 41, № 3. – С. 119–122.
17. Пат. 2318077 Российская федерация, МПК6 C23C 8/06. Способ поверхностного упрочнения изделий из титана и титановых сплавов [Текст] / А.В. Пешков, Д.Н. Балбеков, В.Р. Перненко; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Воронеж. государств. технич. унив-т». – 2006124054/02; заявл. 04.07.2006; опубл. 27.02.2008% Бюл. № 8.
18. К вопросу о циклической выносливости технического титана с неполностью стравленными газонасыщенными слоями при изготовлении листовых полуфабрикатов [Текст] / А.Б. Коломенский, В.Ю. Зубарев, А.В. Клычев, А.В. Дегтярев, А.А. Аксенов // Технология машиностроения. – 2007. – № 4. – С. 9–10.
19. Zabler S. Interstitial Oxygen diffusion hardening – A practical route for the surface protection of titanium / Simon Zabler // Materials Characterization. – 2011. – N 62. – P. 1205–1213.
20. Особенности окисления субмикроструктурного титана при нагревании в воздухе [Текст] / А.В. Коршунов, А.П. Ильин, А.И. Лотков и др. // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319, № 3. – С. 10–16.
21. Фромм, Е. Газы и углерод в металлах [Текст] / Е. Фромм, Е. Гебхард. – М.: Металлургия, 1980. – 711 с.
22. Термическая обработка титановых и алюминиевых сплавов в вакууме и инертных средах [Текст] / Г.Г. Максимович, В.Н. Федирко, Я.И. Спектор, А.Т. Пичугин. – К.: Наук. думка, 1987. – 184 с.
23. Сокирянский, Л.Ф. Об оценке глубины газонасыщенных слоев в титановых сплавах методом микротвердости [Текст] / Л.Ф. Сокирянский // Зав. лаборатория. – 1969. – 35, № 12. – С. 1501–1503.
24. Максимович, Г.Г. Влияние давления остаточных газов вакуумной атмосферы на окисление и газонасыщение титановых сплавов [Текст] / Г.Г. Максимович, В.Н. Федирко, М.Н. Зима // Физ. – хим. механика материалов. – 1988. – Т. 24, №1. – С. 101–104.

Отримано 10.02.2012