

УДК 669.295:621.785:620.193:621.78

## ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ VT6 ПІСЛЯ ПОВЕРХНЕВОГО ДЕФОРМАЦІЙНО-ДИFUЗІЙНОГО ОБРОБЛЕННЯ

Т. М. КРАВЧИШИН, І. М. ПОГРЕЛЮК, С. М. ЛАВРИСЬ

*Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів*

Досліджено вплив обкочування на якість поверхні, поверхнєве зміцнення та структуру поверхневих шарів титанового сплаву VT6. Виявлено, що зі збільшенням навантаження під час деформаційного оброблення підвищується його поверхнєва міцність. Оцінено ступінь зміцнення та якість поверхні сплаву після оброблення, яке охоплює попередню холодну поверхнєву пластичну деформацію і подальше термодифузійне насичення поверхні азотом. Встановлено, що поверхнєва мікротвердість зростає на 2,5 GPa, а глибина зміцненої зони – на 30%.

**Ключові слова:** *титановий сплав VT6, деформаційно-дифузійне оброблення, холодне поверхнєве пластичне деформування, термодифузійне азотування, поверхнєве зміцнення, шорсткість, мікротвердість.*

**Вступ.** Титан та його сплави поєднують високу питому міцність з корозійною стійкістю та теплотривкістю, тому їх широко застосовують у літакобудуванні та багатьох інших галузях промисловості [1–3]. Проте через низькі триботехнічні характеристики ефективність і надійність експлуатації виробів з них суттєво залежить від технології поверхнєвого зміцнення [4]. Існує низка шляхів поліпшити антифрикційні властивості титану та його сплавів: електролітичні, хімічні та газотермічні методи отримання покриттів, електроіскрове поверхнєве легування, наплавлення, іонна імплантація, дифузійна електрохімічна обробка, термодифузійне насичення елементами втілення тощо [5]. Проте нема універсального методу, який задовольняв би всі вимоги експлуатації, тому в кожному випадку потрібно вибирати свій варіант, враховуючи умови роботи деталі [6, 7]. На сьогодні необхідно розробити нові або вдосконалити вже існуючі методи інженерії поверхні титанових сплавів, які б забезпечували високі характеристики зміцненої поверхні.

Одним з найуніверсальніших серед них залишається хіміко-термічне оброблення, зокрема азотування (А), яке легко відтворюється та дає можливість обробляти деталі складної форми [8, 9]. Здебільшого деталі з титанових сплавів азотують при 850...950°C упродовж 10...30 h. Внаслідок цього на поверхні утворюється тонкий твердий нітридний шар, а глибше – шар твердого розчину азоту в  $\alpha$ - чи  $\beta$ -титані. Глибина азотованого шару  $\sim 0,1... 0,15$  mm. Вищі температури азотування недопустимі через сильний ріст розміру зерна титанової матриці, що спричиняє суттєве падіння механічних характеристик деталей. Тому слід створити технологію інтенсифікації азотування двофазних ( $\alpha+\beta$ )-титанових сплавів, яка б забезпечувала зносотривкість за збереження високої міцності [10].

Відомо, що попереднє здрібнення структури поверхнєвого шару методами холодного поверхнєвого пластичного деформування (ХПД) призводить до збільшення площі міжзеренних меж, яке може сприяти дифузії компонентів покриття,

росту глибини дифузійного шару, підвищенню його міцності, тобто формуванню високофункціонального поверхневого шару [11, 12]. А зміцнюючи поверхневий шар термодифузійним азотуванням, вдається отримати між функціональною плівкою і титановою матрицею перехідний дифузійний шар достатньої глибини, міцності та із градієнтом властивостей, що забезпечують високу адгезію покриття з основою [13].

Мета дослідження – оцінити вплив деформаційно-дифузійного оброблення, яке комбінує ХППД та азотування, на якість поверхні, поверхнєве зміцнення та структуру поверхневих шарів титанового сплаву ВТ6.

**Матеріал та методика.** Досліджували зразки двофазного титанового сплаву ВТ6 (Ti–6Al–4V) – одного з найпоширеніших в авіабудуванні.

Відомо, що застосування ХППД, де переважає тертя ковзання (вигладжування, протягування), ускладнено через підвищену схильність титану до схоплювання і налипання на інструмент. Тому особливо актуально вибрати коректний спосіб ХППД. Для цього використовували обкочування кулькою, де тертя ковзання зведено до мінімуму, а отже, найменша ймовірність виникнення дефектів (рис. 1).

Застосовували кульку  $\varnothing 0,005$  м, виготовлену із високоміцної сталі ШХ15 (твердість 180...210 МПа). Для оброблення використовували пристрій пружної дії з постійною силою, розроблений у ФМІ НАН України. Вимірювали силу тензометричним динамометром УДМ-300 з максимальним навантаженням на опори не вище 1000 N. Випробовували за швидкості обертання  $V = 180$  г/мін. та подачі  $S = 0,8$  мм/г. Режими деформаційного зміцнення такі: навантаження  $P = 100$  N, кількість проходів 10 (режим 1); 150 N, кількість проходів 10 (режим 2); 200 N, кількість проходів 6 (режим 3).

Щоб зберегти об'ємне зміцнення після термічного оброблення і забезпечити поверхнєве зміцнення термодифузійним насиченням поверхневого шару азотом, сплав азотували, суміщаючи термічну та хіміко-термічним обробленням в одному технологічному циклі: нагрівання у вакуумі до  $800^{\circ}\text{C}$ , напускання азоту ( $10^5$  Па), витримка 5 h, охолодження зі швидкістю  $5^{\circ}\text{C}/\text{мін}$  до температури  $500^{\circ}\text{C}$ , вакуумування, витримка 0,5 h; охолодження з піччю. Використовували газоподібний азот технічної чистоти (ГОСТ 9293-74), який заздалегідь висушували та вивільняли від кисню, пропускаючи через капсулу зі силікагелем та нагріту на  $\sim 50^{\circ}\text{C}$  вище температури насичення титанову стружку.

Якість поверхні, зокрема шорсткість, до та після кожної технологічної операції вимірювали профілометром моделі 170621 з автоматичним визначенням середнього арифметичного відхилення профілю  $R_a$ ,  $\mu\text{m}$  (ГОСТ 2789-73). ДюрOMETричний аналіз вихідної та зміцненої поверхонь зразків виконували з допомогою мікротвердоміра ПМТ-3М за навантаження на індентор 0,49 N. Мікроструктуру приповерхневих шарів і матриці сплаву вивчали, застосовуючи металографічний мікроскоп "Eriquant", оснащений камерою та комп'ютерною приставкою. Структуру поверхні та хімічний склад поверхневих шарів досліджували на сканувальному електронному мікроскопі EVO 40XVP зі системою мікроаналізу INCA Energy 350.

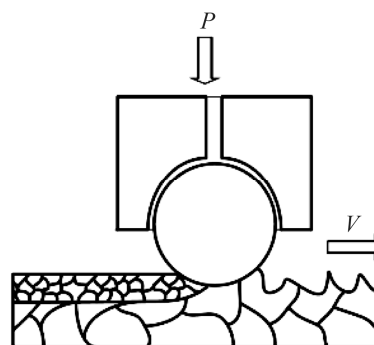


Рис. 1. Схема обкочування зразків кулькою.

Fig. 1. Chart of ball burnishing of the samples.

**Результати та їх обговорення.** Виявили, що з ростом зусилля притиску під час обкочування поверхнева мікротвердість сплаву збільшується з 3,5 у вихідному стані до  $\approx 4,5$  GPa (див. таблицю). Це викликано, очевидно, підвищенням щільності дислокацій у поверхневому шарі, а також подрібненням його структури під час пластичного деформування [13].

Профілометричні вимірювання свідчать про позитивний вплив обкочування на якість поверхні сплаву, що зумовлено її інтенсивним пластичним деформуванням. Виявили, що незалежно від вихідного стану обкочування знижує шорсткість  $R_a$ . Зменшуються висотні параметри нерівностей поверхні і поліпшується якість чистоти. Зокрема, за навантаження 100 та 200 N шорсткість зменшується майже удвічі, а при 150 N – більш ніж утричі (див. таблицю).

**Поверхнева мікротвердість та шорсткість поверхні титанового сплаву VT6 у вихідному стані та після зміцнювальної обробки**

Режими	Навантаження під час ХППД, N	HV, GPa		$R_a$ , $\mu\text{m}$		
		вихідна	ХППД	вихідна	ХППД	ХППД + А
1	100	3,64	4,09	2,558	1,408	–
2	150		4,47	1,298	0,471	0,583
3	200		4,41	0,822	0,458	–

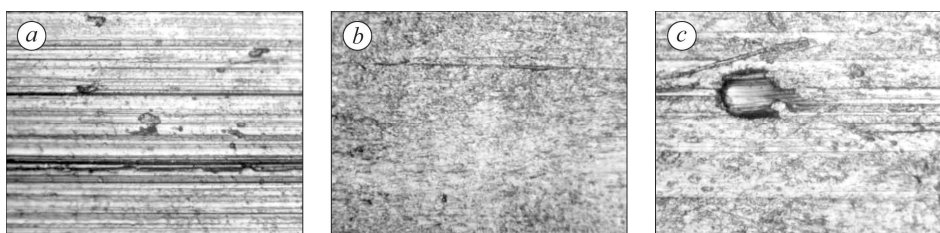


Рис. 2. Поверхня сплаву VT6 після обкочування за навантаження 100 N (a); 150 (b) та 200 (c).  $\times 250$ .

Fig. 2. Surface of Ti-6Al-4V alloy after ball burnishing under the load of 100 N (a); 150 (b) and 200 (c).  $\times 250$ .

Поверхня сплаву у вихідному стані є борозенковою внаслідок точіння під час виготовлення зразків. Після обкочування за навантаження 100 N характерний борозенковий рельєф поверхні зберігається (рис. 2a), що свідчить про недостатнє зусилля притиску для повного її вигладжування. Після обкочування за навантаження 150 N поверхня сплаву якісніша, з незначними слідами течіння матеріалу без борозенок (рис. 2b). Очевидно, що за більшого навантаження зростає пластична деформація мікровиступів поверхні, що призводить до їх вигладжування. Для оцінки ефекту зусиль притиску досліджували за вищих навантажень обкочування (режим 3). Проте це не викликало позитивних змін у формуванні якісної поверхні: внаслідок значної пластичної деформації на ній почали з'являтися вогнища руйнування матеріалу (рис. 2c). Крім цього, за меншої кількості проходів під час оброблення на поверхнях фіксували борозенки внаслідок точіння.

У приповерхневих шарах сплаву після ХППД за режимом 2 виявили деяке подрібнення структури та напрямленість зерен у бік обкочування на глибину  $\sim 25$   $\mu\text{m}$  порівняно з вихідним станом (рис. 3a, b). Таке подрібнення пластин  $\alpha$ -фази, очевидно, слід пов'язувати з їх поділом у місцях сильної локалізації зсувної

деформації. Таким чином, якіснішу поверхню сплаву забезпечує обкочування за режимом 2.

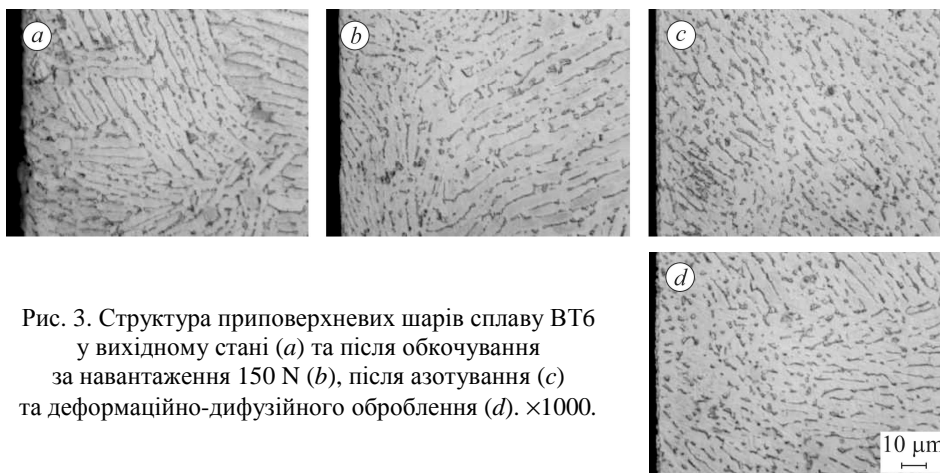


Рис. 3. Структура приповерхневих шарів сплаву ВТ6 у вихідному стані (a) та після обкочування за навантаження 150 N (b), після азотування (c) та деформаційно-дифузійного оброблення (d).  $\times 1000$ .

Fig. 3. Structure of the subsurface layers of Ti-6Al-4V alloy in the initial state (a) and after ball burnishing under the load of 150 N (b), after nitriding (c) and deformation diffusion treatment (d).  $\times 1000$ .

Поверхнева нітридна плівка, яка формується на поверхні обкоченого сплаву після азотування, має характерний рельєф (рис. 4). Профілометричні дослідження засвідчили, що після обкочування та його комбінування з азотуванням шорсткість поверхні зменшується відразу на декілька класів проти вихідної (див. таблицю).

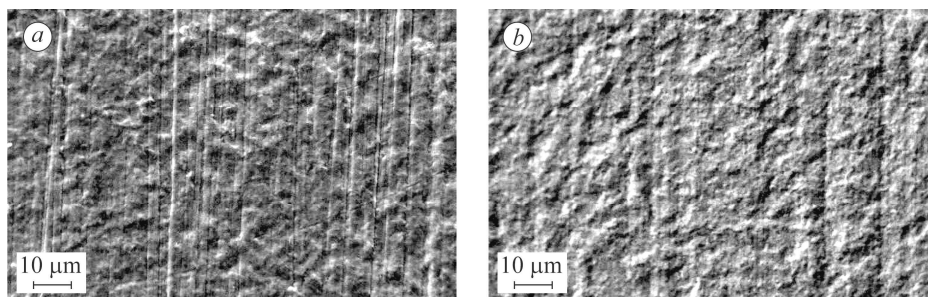


Рис. 4. Поверхня титанового сплаву ВТ6 після азотування (a) та після його комбінування з попереднім обкочуванням (b).  $\times 1000$ .

Fig. 4. Surface of Ti-6Al-4V titanium alloy after nitriding (a) and after its combination with previous ball burnishing (b).  $\times 1000$ .

Для оцінки поверхневого зміцнення виконали дюрOMETричні дослідження зразків сплаву у вихідному стані, після обкочування, азотування та комбінованого деформаційно-дифузійного оброблення. Результати випроб свідчать про поверхнєве зміцнення сплаву після всіх обробок. Поверхнева мікротвердість збільшується до 8 GPa після азотування і до 10,5 GPa після деформаційно-дифузійного оброблення. Найслабше поверхнєве зміцнення забезпечує обкочування (рис. 5).

Криві розподілу мікротвердості по перерізу дифузійних зміцнених шарів разом з поверхневою твердістю описують рівень приповерхневого зміцнення. Розподіл твердості по перерізу азотованих зразків сплаву свідчить, що попереднє ХППД призводить до суттєвішого зміцнення, оскільки криві за такого оброблення розташовані в області вищої твердості, ніж за азотування (рис. 6).

Комбінували обкочування та термодифузійного азотування вдається забезпечити більшу глибину зміцненого дифузійного шару, ніж азотуванням (80 проти 55  $\mu\text{m}$ ). Це можна пояснити накопиченням у поверхневих шарах структурних чинників за попереднього ХППД, що полегшують дифузійне проникнення елементів, зокрема, азоту. Отже, обкочування інтенсифікує процеси проникнення азоту в матрицю, підвищуючи поверхневу твердість та глибину зміцненої зони сплаву.

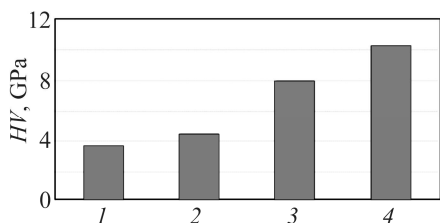


Рис. 5. Fig. 5.

Рис. 5. Поверхнева мікротвердість сплаву ВТ6 у вихідному стані та після поверхневого зміцнювального оброблення: 1 – вихідний; 2–4 – після обкочування, азотування та їх комбінування, відповідно.

Fig. 5. Surface microhardness of Ti-6Al-4V alloy at its initial state and after surface hardening treatments. 1 – initial state; 2–4 – after ball burnishing, nitriding and combining them, respectively.

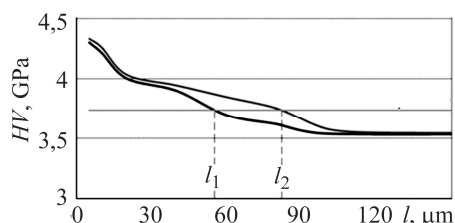


Рис. 6. Fig. 6.

Рис. 6. Розподіл мікротвердості по перерізу приповерхневих зміцнених шарів сплаву ВТ6 після азотування ( $l_1$ ) та його комбінування з обкочуванням ( $l_2$ ).

Fig. 6. Distribution of microhardness along the cross-section of the surface hardened layers of Ti-6Al-4V alloy after nitriding ( $l_1$ ) and combination of the ball burnishing and nitriding ( $l_2$ ).

Мікроструктурний аналіз виявив, що структура сплаву після хіміко-термічної обробки укрупнюється та представлена пластинами  $\alpha$ -фази на фоні  $\beta$ -матриці титану (див. рис. 3с, d). Вплив комбінованого оброблення проявляється у зменшенні розміру частинок  $\alpha$ -фази та відстані між ними; формуванні  $\alpha$ -стабілізованого зміцненого шару з глобулярнішою структурою та з меншими кількістю меж зерен і вмістом  $\beta$ -фази; утворенні на поверхні товстішої нітридної плівки (рис. 3d).

Таким чином, поєднуючи обкочування та азотування, можна поліпшити фізико-механічні характеристики зміцненої поверхні. Азотування сприяє формуванню перехідного дифузійного градієнтного шару між функціональною плівкою і титановою матрицею, обумовлюючи високу адгезію покриття з основою. Попереднє обкочування інтенсифікує цей процес, а отже, відкриває нові можливості для створення функціональних покриттів.

### ВИСНОВКИ

Встановлено, що здрібнена структура приповерхневих шарів сплаву ВТ6, сформована методом ХППД, впливає на інтенсивність дифузії азоту, підвищуючи на 2,5 GPa поверхневу мікротвердість та збільшуючи глибину азотованого шару на 30%. Зі збільшенням навантаження під час ХППД підвищується рівень приповерхневого зміцнення та поліпшується якість чистоти поверхні сплаву, а за подальшого термодифузійного насичення азотом збільшується поверхнева мікротвердість та зберігається якість поверхні в межах одного (восьмого) класу шорсткості.

**SUMMARY.** The influence of ball burnishing on the surface quality, the level of surface hardening and the surface layers structure of the Ti-6Al-4V (BT6) titanium alloy was investigated. It was shown that the increase of load during deformation treatment increased the level of

subsurface hardening of the alloy. The level of its hardening and surface quality of titanium alloy were evaluated after previous cold surface plastic deformation and subsequent thermodiffusion saturation of the surface by nitrogen. It was established that the surface microhardness increased by 2.5 GPa and the depth of the hardened zone by 25  $\mu\text{m}$ .

**Keywords:** *BT6 titanium alloy, deformation-diffusion treatment, cold surface plastic deformation, thermodiffusion saturation of the surface by nitrogen, surface hardening, roughness, microhardness.*

1. *Климов В. Т., Садков В. В.* Титановые сплавы в конструкциях пассажирских самолетов // Титан. – 1998. – № 1 (10). – С. 10–15.
2. *Титановые* сплавы для авиационной промышленности Украины / С. Л. Антонюк, А. Г. Моляр, А. Н. Калинюк, В. Н. Замков // Совр. электрометаллургия. – 2003. – № 1. – С. 10–14.
3. *Титановые* сплавы в самолетах АНТК им. О. К. Антонова / В. А. Трофимов, С. Л. Антонюк, О. М. Ивасишин, А. Г. Моляр // Тi–2005 в СНГ. Сб. тр. – Киев, 2005. – С. 298–305.
4. *Аксенов А. Ф., Полищук И. Е., Кульгавый Э. А.* Состояние и перспективы использования антифрикционных покрытий на титановых сплавах // Трение и износ. – 1982. – № 3. – С. 422–427.
5. *Трофимов В. А.* Методы улучшения подвижных узлов шасси, выполненных из титановых сплавов // Авиаци.-косм. техника и технология. – 2001. – **24**. – С. 143–150.
6. *Духота О. І., Кіндрачук М. В., Лабунець В. Ф.* Проблеми питання використання титанових сплавів у вузлах тертя авіаційної техніки // Проблеми тертя та зношування. – 2008. – **49**. – С. 14–26.
7. *Ванжула Т. В., Замков В. Н., Прилуцкий В. П.* Повышение износостойкости деталей титановых сплавов. Обзор // Автомат. сварка. – 2003. – № 8. – С. 31–35.
8. *Панайоти Т. А., Соловьев Г. В.* Структура, фазовый состав и твердость азотированного титана // Металловедение и терм. обработка металлов. – 1992. – № 9. – С. 34–38.
9. *Федірко В. М., Погрелюк І. М., Яськів О. І.* Азотування як метод підвищення зносостійкості титану та сплавів на його основі // Проблеми трибології. – 1996. – № 2. – С. 52–56.
10. *Погрелюк І. М.* Шляхи інтенсифікації термодифузійного насичення титанових сплавів у молекулярному азоті // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1999. – **35**, № 1. – С. 61–70.  
(*Pohrelyuk I. M.* Ways of intensification of thermodiffusive saturation of titanium alloys in molecular nitrogen // Materials Science. – 1999. – **35**, № 1. – P. 66–75.)
11. *Вейцман М. Г., Вайнштейн В. Г.* Упрочнение титановых сплавов поверхностным пластическим деформированием // Вестник машиностроения. – 1975. – № 2. – С. 73–75.
12. *Посвятенко Е. К., Алексеев В. В.* Холодне пластичне деформування як метод прискорення азотування // Управління проектами, системний аналіз і логістика. Технічна серія. – 2012. – № 9. – С. 157–161.
13. *Погрелюк І. М., Лавриць С. М.* Вплив навантаження під час обкочування на структуру та зносотривкість титанового стопу BT22 // Металлофізика и новейшие технологии. – 2016. – **38**, № 6. – С. 783–793.
14. *Ovali I. and Akkurt A.* Comparison of burnishing process with other methods of hole surface finishing processes applied on brass materials // Mat. and Manufact. Proc. – 2011. – № 26. – P. 1064–1072.

Одержано 20.03.2020