

УДК 669.295; 621.785.5

Олег Ткачук, к.т.н., ст. досл.; Михайло Студент, д.т.н., проф.; Ірина Погрелюк, д.т.н., проф.; Роман Проскурняк, к.т.н.; Христина Задорожна, к.т.н., ст. досл.
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Україна

ВПЛИВ ПАРЦІАЛЬНОГО ТИСКУ АЗОТУ НА ФОРМУВАННЯ НІТРИДНИХ ШАРІВ НА ТИТАНОВОМУ СПЛАВІ VT6

Анотація. Вивчено вплив парціального тиску азоту на структурно-фазовий стан і морфологію поверхні титанового сплаву VT6, азотованого методом дифузійного насичення з контрольованого газового середовища.

Ключові слова: титановий сплав VT6, газове азотування, структурно-фазовий стан, морфологія поверхні.

Oleh Tkachuk, Mykhailo Student, Iryna Pohrelyuk, Roman Proskurnyak, Khrystyna Zadorozhna

INFLUENCE OF NITROGEN PARTIAL PRESSURE ON FORMATION OF NITRIDE LAYERS ON VT6 TITANIUM ALLOY

Abstract. The effect of nitrogen partial pressure on the phase-structural state and surface morphology of the VT6 titanium alloy nitrided by the method of diffusion saturation from a controlled gas environment was studied.

Keywords: VT6 titanium alloy, gas nitriding, phase-structural state, surface morphology.

Вступ. Титанові сплави завдяки високому співвідношенню міцності до ваги, корозійній стійкості та біосумісності мають широкий спектр застосування, включаючи авіа- та машинобудування, хімічну промисловість і біомедицину [1, 2]. Провідна роль титану в багатьох галузях промисловості також зумовлена великою кількістю можливостей для інженерії поверхні. Одним із перспективних методів інженерії поверхні титанових сплавів є формування нітридних шарів. Наразі існує багато методів інженерії поверхні, у тому числі дифузійний, плазмовий, іонно-плазмовий, детонаційний, лазерний, для підвищення твердості, корозійної тривкості та зносостійкості титанових сплавів [1, 2]. Дифузійне насичення з контрольованого газового середовища залишається перспективним методом інженерії поверхні титанових сплавів, оскільки дозволяє регулювати структурно-фазовий стан приповерхневих шарів і обробляти деталі довільної конфігурації (включаючи отвори) [2].

Метою даної роботи є дослідити вплив парціального тиску азоту на формування нітридних шарів на титановому сплаві VT6 методом дифузійного насичення з контрольованого газового середовища.

Матеріали та методика досліджень. Досліджували зразки розміром $10 \times 15 \times 1$ мм з $(\alpha + \beta)$ -титанового сплаву VT6, які попередньо шліфували, полірували (до $R_a = 0,4$ мкм), промивали в ультразвуковій ванні та висушували.

Азотування проводили як в статичних умовах при атмосферному тиску газу (режим I), так і в розрідженій динамічній атмосфері азоту (режим II). Режим I – $T = 850^\circ\text{C}$, $t = 12$ год, $p_{N_2} = 10^5$ Па; режим II – $T = 850^\circ\text{C}$, $t = 12$ год, $p_{N_2} = 1$ Па, $I = 7 \times 10^{-3}$ Па/с. До температури азотування зразки нагрівали у вакуумі 10 мПа. Після ізотермічної витримки їх охолоджували в азоті з піччю до 500°C , після чого систему вакуумували. Використовували газоподібний азот технічної чистоти, що містив кисню не більше 0,4 об.% і парів води не більше $0,07$ г/м³.

Фазовий склад поверхневих шарів після азотування визначали методом рентгенівського фазового аналізу на дифрактометрі ДРОН-3.0 ($\text{CuK}\alpha$ - випромінювання). Мікроструктуру азотованих шарів вивчали з використанням металографічного мікроскопа «Еріquant». Хімічний склад поверхневих шарів визначали за допомогою сканувального електронного мікроскопа EVO-40XVP з системою мікроаналізу INCA Energy 350.

Профілометрування здійснювали на профілометрі типу 170621. Мікротвердість поверхні та її розподіл по глибині визначали за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3М за навантаження 0,49 Н. Травлення шліфів здійснювали реактивом Кролла.

Результати досліджень та їх обговорення. В результаті газового азотування титанового сплаву ВТ6 формується азотований шар, до складу якого, згідно результатів рентгенівського фазового аналізу (рис. 1), входить нітридний та дифузійний шар (на базі твердого розчину азоту в α -титані). Нітридний шар складається з нітридів титану δ -TiN і ϵ -Ti₂N, вміст яких залежить від режиму азотування.

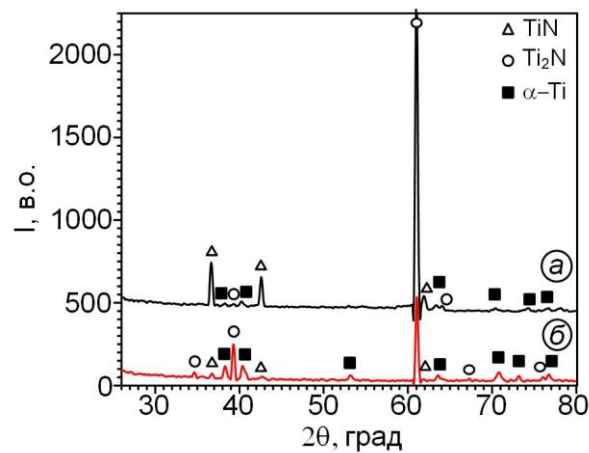


Рисунок 1. Дифракційні спектри титанового сплаву ВТ6 після режимів азотування I (а) і II (б).

Дослідження показали, що після азотування в азоті атмосферного тиску (режим I) вміст мононітриду TiN у нітридному шарі становить 67 %, тоді як в розрідженому азоті (режим II) – 4 %. Таким чином, в нітридному шарі I переважає фаза TiN. Натомість нітридний шар II, в основному, складається з фази Ti₂N, про що, окрім рентгенофазового, свідчить і мікрорентгеноспектральний аналіз (26,77 ат.% N, 73,23 ат.% Ti).

Присутність на дифрактограмах ліній α -титану зі збільшеними міжплощинними відстанями свідчить про формування дифузійного шару, що відокремлює нітридний шар від матриці сплаву. Після азотування за нижчого парціального тиску азоту період ґратки титану менший (табл. 1). Формування нітридного шару супроводжується мікроструктурними змінами, зокрема ростом кристалітів утворених фаз і релаксацією напружень. Розмір кристалітів кубічного нітриду титану δ -TiN і рівень напруженого стану зменшуються зі зниженням парціального тиску азоту (табл. 1).

Товщину дифузійного шару оцінювали за розподілом мікротвердості по перерізу приповерхневих шарів, а сам шар ідентифікували як зону, твердість якої на 0,2 ГПа перевищує твердість матриці сплаву (рис. 2), а також металографічно як поверхневу зону з нижчим ступенем травлення відносно матриці (рис. 3). Зниження парціального тиску азоту (перехід від режиму I до II) призводить до зменшення товщини нітридного шару від 7 до 3 мкм та збільшення товщини дифузійного шару від 70 до 90 мкм.

Таблиця 1. Параметри кристалічної ґратки фаз TiN, Ti₂N і α-Ti, розмір кристалітів і внутрішні напруження в нітриді TiN

Режим азотування	Параметр ґратки TiN, нм	Параметр ґратки Ti ₂ N, нм		Параметр ґратки α-Ti, нм		Розмір кристалітів, нм	Внутрішні напруження
		a	a	c	a	c	
I	0,42475	0,49575	0,30379	0,47110	0,29411	69,17	0,001539
II	0,42390	0,49523	0,30359	0,46995	0,29303	54,82	0,000408

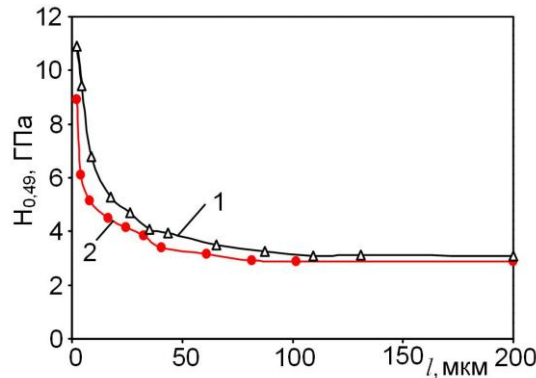


Рисунок 2. Розподіл мікротвердості по перерізу приповерхневих шарів титанового сплаву ВТ6 після режимів азотування I (1) і II (2).

Мононітрид титану TiN є фазою втілення, твердість якої визначається домінуючими орієнтаціями та властивостями атомних площин. Результати рентгеноструктурного аналізу свідчать про те, що у сформованому нітридному шарі нітридні фази мають превалюючі орієнтації. У дифракційному спектрі нітриду TiN домінують рефлекси (111) і (200). Фаза впорядковується в напрямку [111], що характерно для матеріалів з кубічною структурою. Збільшення парціального тиску азоту сприяє посиленню превалюючої орієнтації TiN в напрямку [111]. Так як міцність вздовж площини (200) більша, ніж вздовж (111), то ріст текстурованості в напрямку [200] дозволяє пояснити збільшення поверхневої твердості азотованого сплаву від 8,5 до 11,1 ГПа зі збільшенням парціального тиску азоту.

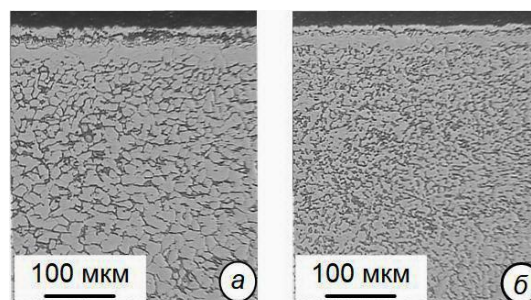


Рисунок 3. Поперечний переріз титанового сплаву ВТ6 після режимів азотування I (а) і II (б).

Аналіз інтенсивностей ліній Ti₂N свідчить про превалюючу орієнтацію ε-нітриду по площині [002]. Збільшення парціального тиску азоту суттєво підвищує текстурованість фази Ti₂N.

Азотування супроводжується формуванням характерного поверхневого рельєфу (рис. 4), що погіршує якість поверхні. Характерна топографія азотованої поверхні – це

хвилясті нерівності, що утворюють сітку на поверхні, яка, очевидно, повторює сітку границь зерен матриці азотованого матеріалу. Збільшення парціального тиску азоту сприяє укрупненню елементів рельєфу.

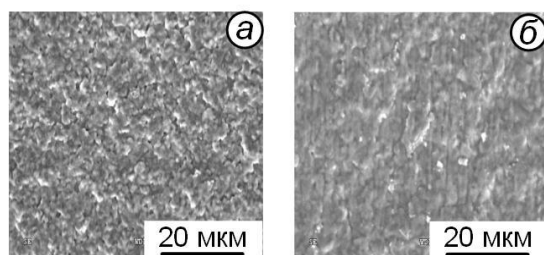


Рисунок 4. Морфологія поверхні титанового сплаву ВТ6 після режимів азотування I (а) і II (б).

Виникнення та ріст фрагментів рельєфу при азотуванні відображається на параметрах профілю поверхні, зміна яких проілюстрована в табл. 2. Зниження парціального тиску азоту сприяє зменшенню як висотних, так і крокових параметрів профілю поверхні. Таким чином, азотування у розрідженому азоті покращує якість поверхні сплаву на один квалітет.

Таблиця 2. Параметри профілю поверхні необробленого та азотованого титанового сплаву ВТ6

Параметри профілю поверхні	Стан поверхні		
	Необроблений	Нітридний шар I	Нітридний шар II
Ra, мкм	0,1251	0,4219	0,1842
Rz, мкм	0,5152	1,6615	0,7335
Rmax, мкм	0,8689	2,4665	0,9329
S, мкм	25,8684	28,7140	27,9133
Sm, мкм	36,5854	54,4962	32,8697

Висновки. Таким чином, розміри та якість азотованих шарів, сформованих на поверхні титанового сплаву ВТ6 визначаються парціальним тиском азоту при дифузійному насиченні з контрольованого газового середовища,. Зокрема, на потовщення саме нітридного шару, в тому числі частки в ньому кубічного нітриду δ -TiN, впливає збільшення парціального тиску азоту від 1 до 10^5 Па.

Робота виконана за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках проєкту 2025.06/0028 за конкурсом «Наука для зміцнення обороноздатності і національної безпеки України».

Перелік посилань

1. M. Correa Rossi, P. Akira Bazaglia Kuroda, L. Solano de Almeida, L. Sgarbi Rossino, C. Ramos Moreira Afonso, A detailed analysis of the structural, morphological characteristics and micro-abrasive wear behavior of nitrided layer produced in α (CP-Ti), $\alpha+\beta$ (Ti-6Al-4V), and β (TNZ33) type Ti alloys, Journal of Materials Research and Technology. 27 (2023) 2399–2412.
2. I.M. Pohrelyuk, S.E. Sheykin, S.M. Dub, A.G. Mamalis, I.Yu. Rostotskii, O.V. Tkachuk, S.M. Lavrys, Increasing of functionality of c.p. titanium/UHMWPE tribo-pairs by thermodiffusion nitriding of titanium component, Biotribology. 7 (2016) 38–45.