

УДК 669.295:621.785

ЗНОСОТРИВКІСТЬ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ VT22 ПІСЛЯ АЗОТУВАННЯ, СУМІЩЕНОГО З ТЕРМІЧНОЮ ОБРОБКОЮ

I. М. ПОГРЕЛЮК¹, М. В. КІНДРАЧУК², С. М. ЛАВРИСЬ¹

¹ *Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;*

² *Національний авіаційний університет, Київ*

Вивчено вплив режимів азотування, які сумішені зі штатною термічною обробкою, на зносотривкість титанового сплаву VT22. Встановлено, що насичення азотом за температури 750°C впродовж 3 h на другому ступені штатної термічної обробки сплаву призводить до зменшення твердості та підвищення якості поверхневого зміцненого шару, що забезпечує вищі триботехнічні характеристики в парі з бронзою БрАЖН 10-4-4 порівняно з насиченням за 820°C, 1 h + 750°C, 3 h на першому та другому ступенях штатної термічної обробки.

Ключові слова: *титановий сплав VT22, термічна обробка, азотування, поверхневе зміцнення, тертя, інтенсивність зношування, чистота поверхні.*

Характерною особливістю титану та його сплавів є висока схильність до контактного схоплювання під час тертя [1]. Ця властивість створює певні труднощі під час обробки титану різанням та робить небезпечним його застосування без поверхневого зміцнення у вузлах тертя механізмів. Термічна обробка не забезпечує належного поверхневого зміцнення. Тому, щоб підвищити зносотривкість титанових сплавів, застосовують різні види поверхневої зміцнювальної обробки. На сьогодні найуніверсальнішим методом інженерії поверхні залишається хіміко-термічна обробка (ХТО) – процес, що легко відтворюється та дає змогу обробляти деталі складної форми, в тому числі з отворами. Найперспективнішим, найефективнішим і економічно виправданим вважають азотування [2].

Серед титанових сплавів, які широко використовують у літакобудуванні, особливої уваги заслуговує високоміцний ($\alpha+\beta$)-титановий сплав VT22 системи Ti–Al–Mo–V–Cu–Fe, об'ємне зміцнення якого забезпечують термічною обробкою [3]. Застосовуючи ізотермічне азотування (після штатної термічної обробки), формують необхідне поверхневе зміцнення, що нівелює результат термічної обробки сплаву (рівень об'ємного зміцнення). Отримати зносотривкий поверхневий шар за збереження регламентованих показників міцнісних характеристик сплаву VT22 можна шляхом суміщення в одному технологічному циклі формування азотованого шару заданих параметрів і регламентованої структури титанової матриці [4].

Мета роботи – оцінити зносотривкість титанового сплаву VT22 після азотування, суміщеного з термічною обробкою сплаву.

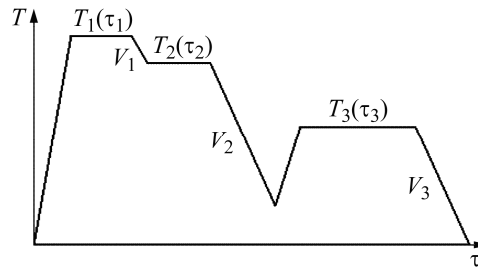
Методика досліджень. Досліджували зразки двофазного титанового сплаву VT22 (Ti–5Al–5Mo–5V–1,5Cu–Fe), який може гартуватись за охолодження з незначною швидкістю, що дає можливість здійснювати процес без переносу у гартувальне середовище [5, 6] (рис. 1).

Така штатна ступінчата термічна обробка сплаву VT22 забезпечує хороше поєднання міцнісних і пластичних характеристик [7–9]. Структура відпаленого сплаву VT22 подана приблизно однаковою кількістю α - і β -фаз. Перший ступінь

термічної обробки виконують поблизу температури поліморфного ($\alpha+\beta$) \leftrightarrow β -перетворення для стабілізації структури. Потім сплав повільно охолоджують до 740...760°C і витримують за цієї температури для одержання заданого фазового складу. За температур 740...760°C β -фаза в сплаві ВТ22 має високу стабільність і фіксується навіть за охолодження на повітрі. Щоб одержати підвищену міцність сплаву, його нагрівають за температур 500...650°C. Температуру останнього ступеня вибирають залежно від потрібного рівня міцності сплаву [9]. За цієї температури відбувається перерозподіл легувальних елементів між α - і β -фазами, що призводить до стабілізації останньої [10].

Рис. 1. Схема режимів термічної обробки сплаву ВТ22 без перенесення в гартувальне середовище [6]: T – температура; τ – час; V – швидкість охолодження.

Fig. 1. Heat treatment modes of VT22 alloy without transfer in hardening medium [6]: T – temperature; τ – time; V – cooling rate (schematically).



Обробка за оптимальним режимом: $T_1 = 820^\circ\text{C}$, $\tau_1 = 1$ h; $T_2 = 750^\circ\text{C}$, $\tau_2 = 3$ h, охолодження зі швидкістю 5...8°C/min; $T_3 = 600^\circ\text{C}$, $\tau_3 = 4$ h (рис. 1), забезпечує найвищі показники механічних характеристик сплаву ВТ22 [5]. Це пояснюється характером мікроструктури сплаву після такої термічної обробки – структура сплаву після звичайного відпалу є сумішню α - і β -твердих розчинів, а після ступеневого відпалу в структурі спостерігають продукти дисперсійного розпаду β -фази.

Для збереження об'ємного (після термічної обробки) і формування поверхневого зміцнення термодифузійним насиченням поверхневих шарів азотом, сплав ВТ22 обробляють за режимами I і II (рис. 2), суміщаючи термічну і хіміко-термічну обробку в одному технологічному циклі. Режим I передбачав насичення азотом на першому і другому ступені термічної обробки (рис. 2a), режим II – лише на другому ступені (рис. 2b). Азотували на установці, яка дозволяє відтворювати технологічний регламент термічної обробки сплаву та забезпечувати температурно-часовий та газодинамічний режими азотування в одному технологічному циклі. Використовували газоподібний азот технічної чистоти (ГОСТ 9293-74), який перед подачею в реакційний простір печі висушували та звільняли від кисню, пропускаючи через капсулу з силікагелем та нагріту на $\sim 50^\circ\text{C}$ вище температури насичення титанову стружку.

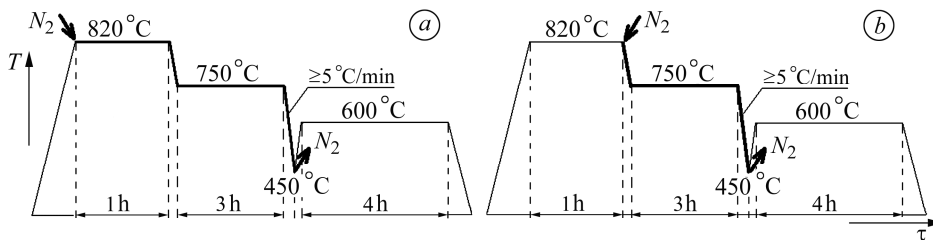


Рис. 2. Схема азотування титанового сплаву ВТ22: a – режим I; b – режим II.

Fig. 2. Nitriding of VT22 titanium alloy: a – mode I; b – mode II (schematically).

Зносотривкість азотованого сплаву оцінювали за зміною маси під час тертя, відповідно до ГОСТ 23.224-86. Випробовували на машині для зношування металів СМЦ-2 за схемою спряження “диск–колодка” на базі 1000 m за питомого навантаження 0,6 МПа і швидкості ковзання 0,6 m/s. Досліджували диски зі сплаву

BT22, поверхню яких зміцнювали термодифузійним насиченням азотом, котре суміщали з термічною обробкою сплаву, відповідно до режимів I і II (рис. 2). Як контртіло використовували колодки з деформівної бронзи БрАЖН 10-4-4. Змащували, занурюючи тіла пари тертя в контейнер з гідрорідиною АМГ-10.

Результати та їх обговорення. Після ХТО, яка поєднує штатну термічну обробку і азотування (рис. 2, режими I і II), поверхня зразків сплаву BT22 гладка, блискуча, світло-золотиста. Насичення азотом на першому та другому ступені термічної обробки (режим I) чи лише на другому ступені (режим II) не впливає на фазовий склад поверхневих шарів сплаву. Незалежно від режиму азотування на поверхні BT22 формується плівка нижчого нітриду титану Ti_2N , про що свідчать результати рентгенівського фазового аналізу, фіксуючи присутність рефлексів цієї фази у дифракційному спектрі. Зменшення інтенсивності ліній нітридної фази у поверхневому дифракційному спектрі свідчить про гальмування нітридоутворення на поверхні під час переходу від режиму I до режиму II.

Якість поверхні зразків після азотування погіршується на 2 класи порівняно з вихідною і після режимів I і II встановлюється на рівні 8-го та 9-го квалітету чистоти за ГОСТ 2789-73, відповідно (рис. 3а).

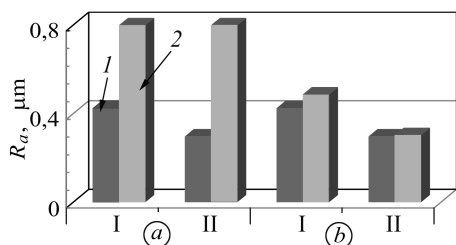


Рис. 3. Зміна шорсткості R_a трибосприяжень до (а) та після (б) тертя: I і II – режими ХТО; 1 – диск; 2 – колодка.

Fig. 3. Change of roughness of parameter R_a of tribounits before (a) and after (b) friction: I and II – modes of chemical heat treatment (CHT); 1 – disc; 2 – block.

Про поверхневе зміцнення сплаву після азотування свідчить підвищення поверхневої твердості зразків та формування азотованого шару, глибину якого визначали методом мікротвердості як зону, що перевищує твердість осердя зразка на $\delta H = 0,2$ GPa. Встановлено, що під час переходу від режиму I до режиму II (перехід за термодифузійного насичення азотом від вищої температури (середня на першому і другому ступені $785^\circ C$) та тривалішої витримки (4 h) до нижчої температури ($750^\circ C$) та коротшої витримки (3 h)) поверхнева твердість сплаву зменшується від 5,6 до 4,9 GPa. Глибина зміцненого шару після насичення за режимами I і II сягає ~ 200 μm та 150 μm , відповідно (рис. 4).

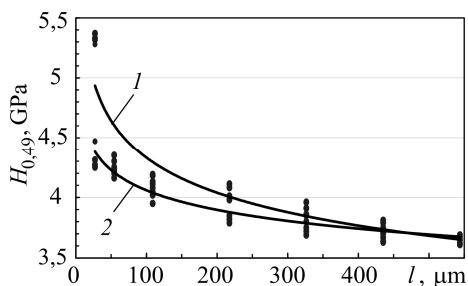


Рис. 4. Розподіл мікротвердості по перетину приповерхневих шарів сплаву BT22 після ХТО (1 – режим I; 2 – режим II).

Fig. 4. Distribution of microhardness over cross section of BT22 alloy surface layers after CHT (1 – mode I; 2 – mode II).

Таким чином, азотування, суміщене з термічною обробкою сплаву, за режимом I забезпечує вищий рівень приповерхневого зміцнення (поверхнева мікротвердість, глибина азотованого шару), ніж азотування за режимом II. Активніше нітридоутворення на поверхні за режиму I негативно впливає на якість поверхні порівняно з режимом II.

Триботехнічні випробування показали, що титановий сплав BT22 після азотування за вказаними режимами на досліджуваній базі практично не зношується.

При цьому знос контртіла відчутний і більше ніж на два порядки перевищує знос азотованих дисків (0,019...0,026 g і 0,0003...0,0004 g, відповідно). До того ж інтенсивність зношування бронзи в парі з диском, азотованим за режимом I, в 1,4 рази більша, ніж тієї, що працювала з диском, азотованим за режимом II. Це обумовлено тим, що під час азотування на поверхні титанових сплавів формується характерний поверхневий рельєф, і тим виразніший, що вищою є температура насичення [6]. Утворення такого рельєфу сприяє збільшенню як висотних, так і крокових параметрів шорсткості поверхні. Плями фактичного контактування під час тертя таких нітридних поверхонь виступають найвищі та найтвердіші точки. Під час тертя ці мікроступи подібно до абразиву проорюють м'якшу поверхню контртіла, залишаючи борозни, що підтверджує мікроструктура поверхонь тертя бронзових колодок (рис. 5). В обох досліджуваних трибопарах під час тертя переважає абразивний механізм зношування з формуванням характерного для нього борознистого рельєфу поверхонь тертя. При цьому поверхня контртіла в парі з диском, азотованим за режимом II, має меншу кількість борозен, ніж та, котра працювала з диском, азотованим за режимом I, де і самі борозни глибші, і на клас нижчий квалітет чистоти поверхні тертя (рис. 3b). Якість поверхні азотованих дисків після тертя краща, ніж відповідних бронзових колодок, проте R_a не виходить за межі квалітету чистоти цих контртіл.

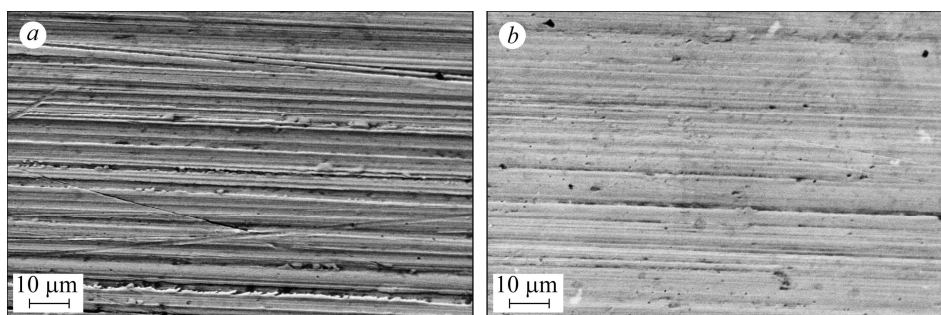
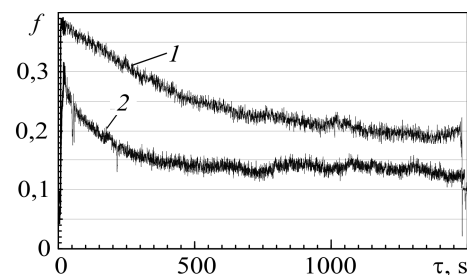


Рис. 5. Мікроструктура поверхонь тертя контртіл у парі зі сплавом ВТ22 після азотування за режимами I (a) та II (b).

Fig. 5. Microstructure of friction surfaces of counterbodies, in a friction pair with BT22 alloy after nitriding by modes I (a) and II (b).

Рис. 6. Кінетика зміни коефіцієнта тертя трибопари азотований сплав ВТ22–бронза БрАЖН 10-4-4 (1 – азотування за режимом I; 2 – за режимом II).

Fig. 6. Kinetics of change of the friction coefficient of a friction pair nitrided BT22 alloy–BrAJN 10-4-4 bronze (1 – nitriding by mode I; 2 – by mode II).



Внаслідок різної шорсткості поверхонь тертя (рис. 3) азотування за режимом II забезпечує практично вдвічі менший період припрацювання трибопари порівняно з режимом I (рис. 6). Коефіцієнт тертя у трибоспряженні “диск азотований за режимом I–колодка” (1) у період припрацювання високий і становить 0,32, а згодом знижується до 0,2 і стабілізується (рис. 6). Коефіцієнт тертя у трибоспряженні “диск азотований за режимом II–колодка” (2) приблизно на 0,06 менший у всьому діапазоні випробувань.

Коефіцієнти тертя корелюють з температурою в зоні тертя. За нижчого коефіцієнта тертя у трибоспряженні (2) фіксуємо нижчу температуру в зоні тертя, а

саме: 29,4°C. Температура в зоні тертя для трибопари (1) встановлюється на рівні 34,8°C.

Таким чином, азотування, суміщене з штатною термічною обробкою, підвищує твердість та глибину зміцнення поверхневого шару матеріалу. Збільшення часу термодифузійного насичення призводить до погіршення якості азотованої поверхні титанового сплаву VT22. За питомого навантаження 0,6 МПа, швидкості ковзання 0,6 м/с та мащення в АМГ-10 у парі з БрАЖН 10-4-4 насичення азотом на другому ступені штатної термічної обробки сплаву VT 22 (750°C, 3 h) в 1,4 рази зменшує інтенсивність зношування порівняно з насиченням азотом на першому ступені (820°C, 1 h + 740°C, 3 h), забезпечуючи на етапі стабільного зношування нижчі коефіцієнти тертя (0,14) та температуру в зоні тертя (29,4°C).

РЕЗЮМЕ. Изучено влияние режимов азотирования, совмещенных со штатной термической обработкой, на износостойкость титанового сплава VT22. Установлено, что насыщение азотом при температуре 750°C в течение 3 h на второй ступени штатной термической обработки сплава приводит к уменьшению твердости и повышению качества поверхностного упроченного слоя, обеспечивая более высокие триботехнические характеристики в паре с бронзой БрАЖН 10-4-4, в сравнении с насыщением при 820°C, 1 h + 750°C, 3 h на первом и втором ступенях штатной термической обработки.

SUMMARY. The influence of nitriding modes combined with the standard heat treatment on wear resistance of VT22 titanium alloy was studied. It was determined that nitrogen saturation at a temperature of 750°C for 3 h in the second stage of standard heat treatment of the alloy leads to a decrease of hardness and surface quality of the hardened layer, providing the higher tribotechnical characteristics in the friction pair with БрАЖН 10-4-4 bronze than the saturation at 820°C, 1 h + 750°C, 3 h in the first and second stages of the standard heat treatment.

1. *Механіка руйнування і міцності матеріалів: Довідн. пос. / Під заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / О. П. Остащ, В. М. Федірко, В. М. Учанін, С. А. Бичков, О. Г. Моляр, О. І. Семенець, В. С. Кравець, В. Я. Дереча. – Львів: Сполом, 2007. – 1068 с.*
2. *Pohrelyuk I. and Fedirko V. Chemico-thermal treatment of titanium alloys – Nitriding // Titanium Alloys – Towards Achieving Enhanced Properties for Diversified Applications (Chapter 7) / Ed.: Akm Nurul Amin. – InTech, 2012. – P. 141–174.*
3. *Титановые сплавы для авиационной промышленности Украины / С. Л. Антонюк, А. Г. Моляр, А. Н. Калинюк, В. Н. Замков // Современная электрометаллургия. – 2003. – № 1. – С. 10–14.*
4. *Патент 9692 України. Спосіб обробки титанового сплаву / В. М. Федірко, І. М. Погрелюк, В. А. Трофімов, О. Г. Моляр, Т. М. Кравчишин. – № u200502148; Заявл. 09.03.2005; Опубл. 17.10.2005, Бюл. № 10.*
5. *Термическая обработка титанового сплава VT22 / В. Н. Моисеев, Ю. И. Захаров, Ю. Г. Кириллов, Ю. М. Должанский, Т. Г. Данилина // Металловед. и терм. обработка металлов. – 1990. – № 3. – С. 46–49.*
6. *Хорев А. И., Хорев М. А. Титановые сплавы: применение и перспективы развития // Титан. – 2005. – № 1. – С. 40–53.*
7. *Глазунов С. Г., Моисеев В. Н. Конструкционные титановые сплавы. – М.: Металлургия, 1974. – 368 с.*
8. *Технология производства титановых самолетных конструкций / А. Г. Братухин, Б. А. Колачев, В. В. Садков, В. Д. Талалаев, А. А. Веселов. – М.: Машиностроение, 1995. – 448 с.*
9. *Металлография титановых сплавов / Н. Ф. Аношкин, Г. А. Бочвар, В. А. Ливанов, И. С. Полькин, В. Н. Моисеев. – М.: Металлургия, 1980. – 464 с.*
10. *Останчук В. В., Семішов Н. И. Влияние режимов упрочняющей термической обработки на структуру и свойства титанового сплава VT22 // Питання проектування та виробництва конструкцій літальних апаратів. Зб. наук. праць. – 2010. – № 2. – С. 38–43.*

Одержано 07.08.2015