

УДК 669.295:621.785

ТЕРМІЧНА СТАБІЛЬНІСТЬ ДЕФОРМОВАНОГО ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ VT22 В АЗОТОВМІСНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

I. М. ПОГРЕЛЮК, С. М. ЛАВРИСЬ

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

Досліджено термічну стабільність поверхневого деформованого шару на титановому сплаві VT22 у вакуумі та в середовищі молекулярного азоту. На основі мікροструктурного, дюрметричного та рентгеноструктурного аналізів підтверджено його термічну стабільність в умовах насичення азотом до температури 820°C. Виявлено, що під час нагрівання в азоті процеси рекристалізації деформаційно зміцненого шару пригнічуються через твердорозчинне зміцнення.

Ключові слова: титановий сплав VT22, обкочування, деформований поверхневий шар, азотовмісне середовище, термічна стабільність, структурно-фазовий стан.

Thermal stability of the surface deformed layer on Ti–5Al–5Mo–5V–1.5Cu–Fe titanium alloy in vacuum and in molecular nitrogen was studied. Based on microstructural, durometric and X-ray diffraction analyses, thermal stability under conditions of nitrogen saturation up to a temperature of 820°C was confirmed. It was shown that when heated in a nitrogen medium, the recrystallization of the deformed strengthened layer was retarded due to the solid solution strengthening by nitrogen.

Keywords: BT22 titanium alloy, ball burnishing, deformed surface layer, nitrogen-containing medium, thermal stability, phase-structural state.

Вступ. Двофазні титанові сплави володіють комплексом фізико-механічних і антикорозійних властивостей, тому їх часто використовують в авіабудуванні, особливо в деталях агрегатів повітряних суден транспортної категорії, де економія розмірів і маси – одна із основних вимог під час конструювання. Проте через низькі антифрикційні характеристики їх застосування у трибовузлах неможливе без додаткового поверхневого оброблення. Тому слід розробити нові та удосконалити існуючі методи поверхневого зміцнення [1–6]. Перспективним, ефективним й економічно виправданим тут є метод газового азотування. Найчастіше, щоб досягти потрібної зносотривкості, титанові сплави азотують за температур від 780 до 950°C з витримкою більше 20 h, що призводить до високих енергозатрат [4]. Знизити їх можна попередньою холодною поверхневою пластичною деформацією. Виявлено [1–6], що внаслідок подрібнення структури та нагромадження лінійних та точкових дефектів у поверхневому шарі цих сплавів інтенсифікуються процеси нітридоутворення та газонасичення, що спричиняє регламентоване зростання поверхневої мікротвердості та зносотривкості за значно нижчих температур.

Однак ефективність комбінування деформаційних і дифузійних методів інженерії поверхні залежить від термічної стабільності заздалегідь деформованого шару, оскільки під час подальшого азотування у ньому можуть відбуватися процеси рекристалізації, що гальмуватимуть або нівелюватимуть термодифузійне насичення. Тому тут доцільно оцінити термічну стабільність деформованого поверх-

невого шару під час нагрівання до температури насичення в азотовмісному середовищі та вплив рекристалізації на пришвидшення цього процесу.

Методика випробування. Досліджували титановий сплав VT22 (Ti–5Al–5Mo–5V–1.5Cu–Fe), який після комбінованого деформаційно-дифузійного оброблення має кращі триботехнічні та втомні характеристики, ніж після традиційного газового азотування [5, 6]. Деформований поверхневий шар на сплаві формували методом обкочування алмазною кулькою, виготовленою з полікристалічного композиційного матеріалу системи $C_{\text{алмаз}}\text{–Co–34Ni}$, за таких параметрів: діаметр кульки 5 mm, швидкість подачі та частота обертання 0,07 mm/rev, 200 rpm, навантаження 300 N і 11 кількість проходів.

Термічну стабільність оцінювали за зміною структурно-фазового стану шару після нагрівання у вакуумі 10^{-3} Pa та азотовмісному (парціальний тиск азоту 10^{-1} Pa) середовищі до температури 820°C, яка близька до температури рекристалізації сплаву. Для цього використовували мікроструктурний, дюрOMETричний та рентгеноструктурний аналізи. Мікроструктуру поверхневих шарів досліджували на сканувальному електронному мікроскопі EVO 40XVP. Для дюрOMETричного аналізу застосовували мікротвердомір ПМТ-3М з навантаженням на індентор 0,49 N. Рентгеноструктурний і фазовий аналізи виконували на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3.0 у монохроматичному CuK_{α} -випромінюванні з фокусуванням за схемою Бреґга–Брентано. Ідентифікували фази та оцінювали розміри кристалітів, напруження кристалічної ґратки та густини дислокацій з допомогою пакетів програмного забезпечення Sietronix, Powder Cell 2.4 і FullProf.

Результати та їх обговорення. Виявили, що (рис. 1a) на поверхні вихідного зразка після поверхневого деформування формується зміцнений шар із подрібненою структурою (рис. 1b) завтовшки ~ 10 μm . Після нагрівання у вакуумі та в азоті подрібнені зерна у ньому укрупнюються внаслідок рекристалізаційних процесів (рис. 1c, d). Найменший ріст зерна зафіксували після нагрівання в азоті.

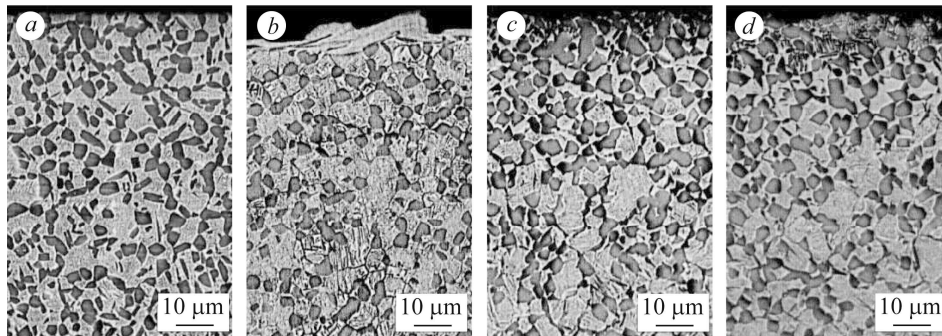


Рис. 1. Мікроструктура поверхневого шару сплаву VT22 у вихідному стані (a), після поверхневого деформування (b) та нагрівання у вакуумі (c) і азоті (d).

Fig. 1. Microstructure of the Ti5Al5Mo5V1.5CuFe alloy surface layer in the initial state (a), after surface deformation (b) and heating in vacuum (c) and nitrogen (d).

Відомо, що рекристалізація деформованого поверхневого шару внаслідок збільшення розмірів зерна повинна сприяти зменшенню поверхневої мікротвердості сплаву [7]. Однак, згідно з дюрOMETричним аналізом, вона після нагрівання як у вакуумі, так і в азоті зростає на 13 та 32%, відповідно (рис. 2a). Це свідчить про те, що процеси термодифузійного насичення (в даному випадку киснем чи азотом) під час нагрівання домінують над процесами рекристалізації. Атоми азоту чи кисню взаємодіють з поверхнею титану [8, 9], формуючи на ній тонкі плівки нітриду Ti_2N чи оксиду TiO_2 титану, а також дифузійну зону (твердий розчин

кисню чи азоту в α -фазі титані), на що вказують піки низької інтенсивності нітриду Ti_2N чи оксиду TiO_2 (у модифікації рутил) титану і зсув піків матричної α -фази в бік ближніх кутів відбиття у дифракційному спектрі (рис. 2b).

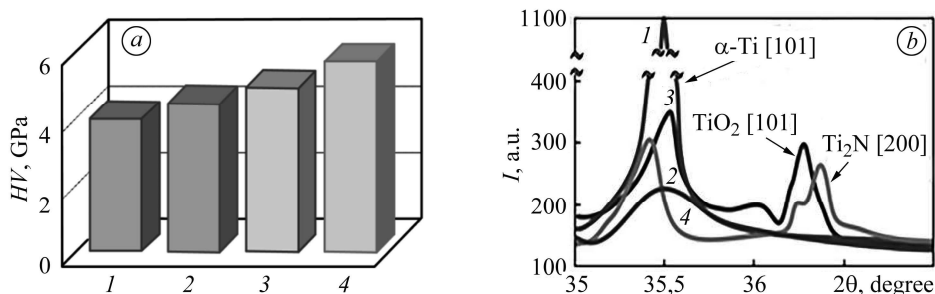


Рис. 2. Поверхнева мікротвердість (a) та дифрактограми (b) сплаву VT22 у вихідному стані (1), після поверхневого деформування (2) та нагрівання у вакуумі (3) і азоті (4).

Fig. 2. Surface microhardness (a) and diffraction patterns (b) of Ti5Al5Mo5V1.5CuFe alloy in the initial state (1), after surface deformation (2) and heating in vacuum (3) and nitrogen (4).

Рентгеноструктурним методом виявили, що через подрібнення структури поверхневого шару після деформування розміри кристалітів зменшуються, а деформація (спотворення) кристалітної ґратки у ньому збільшується, що призводить до підвищення напружень та густини дислокації (рис. 3). Подальше нагрівання як у вакуумі, так і в азоті сприяє збільшенню внаслідок рекристалізації розмірів кристалітів, а отже, зменшенню напружень кристалічної ґратки та густини дислокацій. Однак після нагрівання розміри кристалітів менші, ніж у вихідному стані. Отже, процеси рекристалізації не такі інтенсивні, щоб нівелювати деформований шар, тобто процеси твердорозчинного зміцнення елементами проникнення пригнічують процеси рекристалізації. Найістотніше цей ефект проявляється під час нагрівання в азоті.

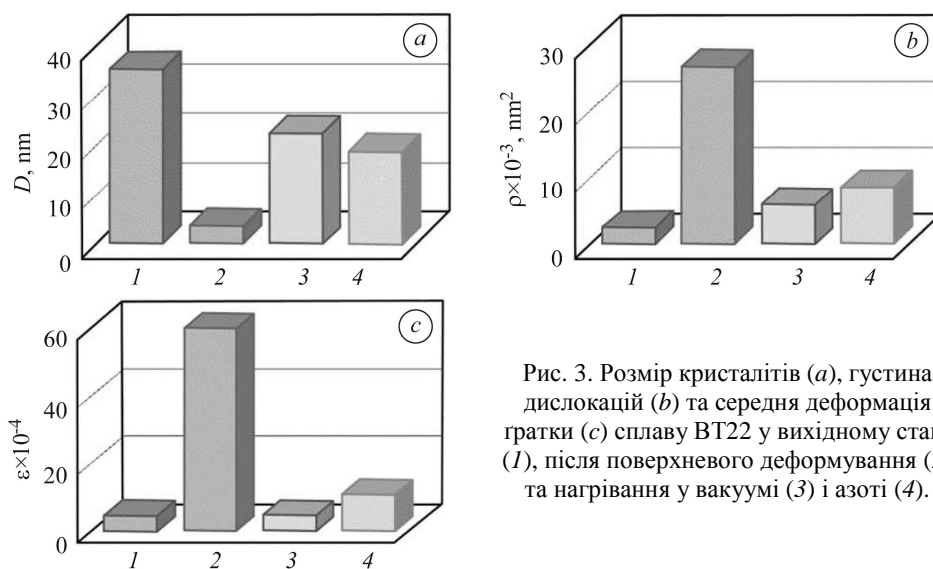


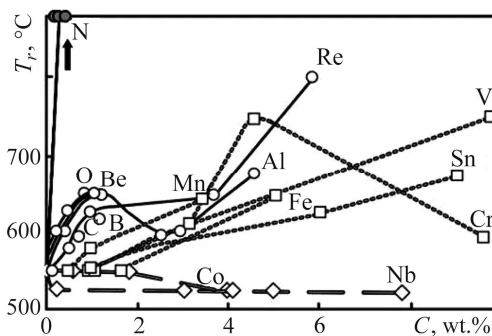
Рис. 3. Розмір кристалітів (a), густина дислокацій (b) та середня деформація ґратки (c) сплаву VT22 у вихідному стані (1), після поверхневого деформування (2) та нагрівання у вакуумі (3) і азоті (4).

Fig. 3. Crystallite size (a), dislocation density (b) and lattice strain (c) of Ti5Al5Mo5V1.5CuFe alloy in the initial state (1), after surface deformation (2) and heating in vacuum (3) and nitrogen (4).

Це можна пояснити так. По-перше, азот є сильним α -стабілізатором [7] і розширює температурний інтервал існування α -області, а отже, суттєво підвищує поріг рекристалізації сплаву (рис. 4). Також тут потрібно враховувати й інші чинники, які впливатимуть на цей процес у деформованому поверхневому шарі сплаву. Зокрема, в працях [10–12] вказано, що у металах з низькою енергією дефектів пакування (в нашому випадку α -титан з ГЦУ-граткою) інтенсивного перерозподілу дислокацій не відбувається аж до рекристалізації. Особливо стійкі дислокаційні конфігурації утворюються після значних деформацій.

Рис. 4. Вплив вмісту легувальних елементів на температуру рекристалізації титану [7].

Fig. 4. Influence of alloying elements on the recrystallization temperature of titanium [7].



У таких металах міцність помітно зменшується лише з початком збиральної і вторинної рекристалізації, тобто на етапах відновлення, полігонізації та первинної рекристалізації дислокаційні субструктури залишатимуться стійкими, а отже, пришвидшуватимуть твердорозчинне зміцнення, полегшуючи дифузію азоту, через що рекристалізація уповільнюватиметься. Також, згідно з працями [13, 14], з введенням у твердий розчин атомів проникнення (в нашому випадку атомів азоту) різко знижується швидкість міграції меж зерен під час збиральної рекристалізації. Це, вочевидь, пов'язано з тим, що атоми азоту в першу чергу дифундують межами зерна, створюючи стискальні напруження в них, що перешкоджатиме росту зерна, а отже, блокуватиме рекристалізацію.

ВИСНОВОК

Підтверджено термічну стабільність деформаційно зміцненого поверхнього шару сплаву VT22 під час нагрівання до температури 820°C у середовищі азоту. Виявлено, що за цих умов у ньому інтенсифікуються процеси твердорозчинного зміцнення, які пригнічують рекристалізацію.

1. *Vacuum tribological properties of titanium enhanced via ultrasonic surface rolling processing pre-treatment and plasma nitriding* / Dingshun She, Wen Yue, Jiajie Kang, Fei Huang, Chengbiao Wang, and Jing Shen // Tribol. Trans. – 2018. – **61**, № 4. – P. 612–620.
2. *Liling Ge, Na Tian, Zhengxin Lu, Caiyin You. Influence of the surface nanocrystallization on the gas nitriding of Ti–6Al–4V alloy* // Appl. Surf. Sci. – 2013. – **286**. – P. 412–416.
3. *Термодифузійне насичення поверхні титанового сплаву VT22 з контрольованого кисеньазотовмісного газового середовища на стадії старіння* / В. М. Федірко, І. М. Погрелюк, О. Г. Лук'яненко, С. М. Лаврись, М. В. Кіндрачук, О. І. Духота, О. В. Тісов, В. В. Загребельний // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – **53**, № 5. – С. 100–109.
(*Thermodiffusion saturation of the surface of VT22 titanium alloy from a controlled oxygen-nitrogen-containing atmosphere in the stage of aging* / V. M. Fedirko, I. M. Pohrel'yuk, O. H. Luk'yanyenko, S. M. Lavryis, M. V. Kindrachuk, O. I. Dukhota, O. V. Tisov, and V. V. Zahrebel'nyi // Materials Science. – 2017. – **53**, № 5. – P. 100–109.)
4. *Farokhzadeh K., Qian J., and Edrissy A. The Effect of SPD surface layer on plasma nitriding of Ti–6Al–4V alloy* // Mat. Sci. Eng. A. – 2014. – **589**, № 1. – P. 199–209.

5. *Погрелюк І. М., Кіндрачук М. В., Лаврись С. М.* Зносотривкість титанового сплаву VT22 після азотування, суміщеного з термічною обробкою // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – **52**, № 1. – С. 56–60.
(*Pohrelyuk I. M., Kindrachuk M. V., Lavrys' S. M.* Wear resistance of VT22 titanium alloy after nitriding combined with heat treatment // *Materials Science*. – 2016. – **52**, № 1. – P. 56–61.)
6. *Pohrelyuk I. M., Fedirko V. M., and Lavrys S. M.* Effect of preliminary ball burnishing on wear resistance of the nitrated VT22 alloy // *J. Frict. Wear*. – 2017. – **38**, № 3. – P. 221–224.
7. *Солонина О. П., Глазунов С. Г.* Титановые сплавы. Жаропрочные титановые сплавы. – М.: Металлургия, 1976. – 448 с.
8. *Fedirko V. N., Luk'yanenko A. G., and Trush V. S.* Solid-solution hardening of the surface layer of titanium alloys. Part 2. Effect on metallophysical properties // *Met. Sci. Heat Treat.* – 2015. – **56**, №11–12. – P. 661–664.
9. *Труш В. С., Лук'яненко О. Г., Стоєв П. І.* Вплив модифікування поверхневого шару домішками проникнення на тривалу міцність сплаву Zr–1%Nb // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2019. – **55**, № 4. – С. 114–118.
(*Trush V. S., Lukianenko O. H., Stoev P. I.* Influence of modification of the surface layer by penetrating impurities on the long-term strength of Zr–1% Nb Alloy // *Materials Science*. – 2020. – **55**, № 4. – P. 585–589.)
10. *Han J., Sheng G. M., and Hu G. X.* Nanostructured surface layer of Ti–4Al–2V by means of high energy shot peening // *ISIJ International*. – 2008. – **48**, № 2. – С. 218–223.
11. *Olidko I. A. and Reizis A. B.* Grain-boundary dislocation climb and diffusion in nanocrystalline // *Phys. Solid State*. – 2001. – **43**. – С. 35–38.
12. *Электроискровое диспергирование металлических материалов. III. Влияние технологических факторов на размеры, форму и структурное состояние высокодисперсных частиц / А. Е. Перекос, А. И. Устинов, С. Н. Захарченко, О. Ф. Бойцов, В. З. Войнаш, В. П. Залуцкий // Металлофіз. новітні технології. – 2019. – **41**, № 1. – С. 101–120.*
13. *Федирко В. Н., Погрелюк І. Н.* О кинетике азотирования титановых сплавов при температуре 1173°K // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1983. – **19**, № 6. – С. 33–35.
(*Fedirko V. N. and Pogrelyuk I. N.* Kinetics of nitriding of titanium alloys at 1173°K // *Materials Science*. – 1983. – **19**, № 6. – P. 511–513.)
14. *Chuvil'deev V. N. and Smirnova E. S.* Recrystallization temperature in metals with small impurity additions // *Phys. Met. Metallogr.* – 2001. – **92**, № 2. – С. 117–122.

Одержано 21.10.2020