

УДК 621.785.532

В.Г. КАПЛУН, Ю.І. ШАЛАПКО, Н.С. МАШОВЕЦЬ

Хмельницький національний університет, Україна

НОРБЕРТ РАДЕК

Політехніка Свентокшиська, м. Кельце, Польща

МОДИФІКАЦІЯ ПОВЕРХНІ ТИТАНУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КОМПЛЕКСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Наведені результати експериментальних досліджень мікротвердості, товщини, фазового складу та зносостійкості поверхневого шару титану VT1-0 після лазерної обробки за різними режимами та наступного азотування в тліючому розряді в безводневих середовищах.

The experimental results of microhardness, thickness, phase composition and wear resistance of the surface layer of titanium VT1-0 after the laser treatment at different regimes and subsequent nitriding in glow discharge in hydrogen-free medium.

Ключові слова: лазерна обробка, азотування в тліючому розряді, титан VT1-0, зносостійкість, мікротвердість, фазовий склад.

Вступ. Титан є унікальним конструкційним матеріалом за своїми властивостями – малою питомою вагою, низьким модулем пружності, високою корозійною стійкістю і доброю сумісністю з організмом людини [1]. Разом з тим, чистий титан має низьку твердість і малу зносостійкість поверхні. Тому в техніці застосовуються титанові сплави, леговані іншими елементами (хром, молибден, нікель, алюміній, марганець, ніобій, цирконій, олово, азот та інші) [2, 3] для підвищення їх фізико-механічних властивостей. Але металеві сплави, які містять вищезгадані легуючі елементи, є токсичними для організму людини. В разі їх застосування в якості імплантатів відбувається розчинення легуючих елементів в біологічно активному середовищі та їх накопичення в життєво важливих органах живого організму. Крім того, відбувається розтравлення міжзернових границь і збільшується знос поверхні тертя [4]. Це є серйозною перешкодою для застосування таких сплавів при виготовленні імплантатів. Чистий титан VT1-0 не має таких вад, але потребує модифікації поверхні для підвищення його фізико-механічних і трибологічних характеристик у випадку застосування в якості імплантанта.

Застосування низькотемпературного азотування в тліючому розряді для зміцнення поверхневого шару титану VT1-0 [5] дозволило підвищити в 3,5 рази твердість поверхневого шару і майже на 2 порядки зносостійкість в агресивному середовищі (в рідині Рінгера) при збереженні вихідних характеристик міцності. Нові перспективи для підвищення міцності поверхневого шару титану VT1-0 відкриває застосування комплексних технологій з використанням лазерної термообробки і наступного азотування в тліючому розряді.

Методика експериментів. Зразки з титану VT1-0 діаметром 10 мм відпалювалися, шліфувалися на торцевій поверхні і оброблялися на цій поверхні імпульсним променем лазера з діаметром пучка 0,7 мм, часом дії імпульсу 0,4–0,69–8 мс, частотою 50 Гц, кроком переміщення стола 0,4 мм, в середовищі азоту з витратою 25 л/хв, за трьома різними режимами:

- 1 – без оплавлення (потужність 25 Вт, напруга 490 В, час імпульсу 0,45 мс);
- 2 – мале оплавлення (потужність 60 Вт, напруга 600 В, час імпульсу 0,45 мс);
- 3 – велике оплавлення (потужність 90 Вт, напруга 600 В, час імпульсу 0,68 мс).

Після лазерної термообробки зразки азотувалися в тліючому розряді в безводневому насичуючому середовищі на спеціальному обладнанні за режимом: температура дифузійного насичення 666 °С, тиск у вакуумній камері 240 Па, насичуюче середовище 55 об.% N₂ + 45 об.% Ar, час азотування 6 годин. Після кожного виду обробки, використовуючи методи металографії, вимірювалась мікротвердість поверхні, товщина зміцненого шару, розподіл мікротвердості за глибиною і фазовий склад поверхні з використанням приладу ДРОН 3-М. Дослідження зносостійкості зразків проводилося на машині торцевого тертя в середовищі рідини Рінгера при тиску на поверхні тертя 3,5 МПа і швидкості ковзання 0,057 м/с. В якості контролі використовувався титан VT1-0 з аналогічною обробкою поверхні, як і в дослідному зразку.

Вимірювання зносу проводилось на спеціальному пристрої через кожні 100 м шляху тертя з точністю до 0,5 мкм. При цьому вимірювалась мікротвердість поверхні тертя. Результати вимірювань визначались як середньоарифметичне значення після 10-кратного повторювання вимірювань на кожному зразку. Кожний дослід на зношування зразків за даним режимом зміцнювання повторювався три рази і кінцевий результат приймався як середньоарифметичне із трьох дослідів.

Результати досліджень. В табл. 1 наведені результати експериментальних досліджень властивостей поверхневого шару титану VT1-0 після різних методів обробки. З табл. 1 видно, що мікротвердість поверхневого шару після різних видів обробки має різні, але значно вищі значення в порівнянні з вихідною мікротвердістю 2 000 МПа. Зокрема, мікротвердість поверхні після лазерної обробки без оплавлення складала 9 370 МПа, після лазерної обробки з малим оплавленням – 10 360 МПа, після

лазерної обробки з великим оплавленням – 11 970 МПа. Застосування іонного азотування в тліючому розряді після попередньої лазерної обробки підвищує мікротвердість поверхні при всіх трьох видах лазерної обробки і складає, відповідно, 10 190 МПа, 11 700 МПа, 12 300 МПа (збільшення на 330–1340 МПа). Таке збільшення мікротвердості відбувається за рахунок утворення на поверхні нітридних сполук TiN і Ti₂N, твердість яких значно вища ніж мікротвердість структури після лазерної обробки. Підвищена мікротвердість основи титану VT1-0 після зношування зміцненого шару в порівнянні з вихідним значенням (2 000 МПа) обумовлена наклепом, що утворюється при терті.

Таблиця 1

Результати порівняльних випробувань титану VT1-0 на тертя та зношування при тиску 3,5 МПа, V=0,057 м/с, в середовищі рідини Рінгера

№	Режим обробки	Мікротвердість, Н ₁₀₀		Товщина зміцненого шару, h, мкм	Шлях тертя, L, м	Знос U, мкм	Інтенсивність зносу I·10 ⁻⁸
		До зношування	Після зношування				
1	Лазерна обробка без оплавлення + іонне азотування	10190	2440	170	500	228	45,6
2	Лазерна обробка без азотування	9370	2390	140	100	179	179
3	Лазерна обробка, мале оплавлення + іонне азотування	11700	2340	230	3200	267	8,3
4	Лазерна обробка з малим оплавленням	10360	2470	160	300	279	93
5	Лазерна обробка з великим оплавленням + іонне азотування	12300	2340	250	5000	341	6,8
6	Лазерна обробка з великим оплавленням	11970	2430	180	400	378	94,5
7	Іонне азотування: T=666 ⁰ C, P=240 Па, τ=6 год (опт. реж.)	6760	3240	250	1000	240	32,4
8	Не модифікований	2000	3310	-	100	400	400

На рис. 1 наведена мікроструктура поверхневого шару після лазерної обробки титану VT1-0 за різними режимами, з якого видно зміну структури і товщину модифіковано шару при різних видах обробки (табл. 1). Застосування азотування в тліючому розряді після лазерної обробки не лише збільшує твердість і змінює фазовий склад поверхні, але і збільшує товщину азотованого шару та зменшує градієнт твердості по глибині (рис. 2).

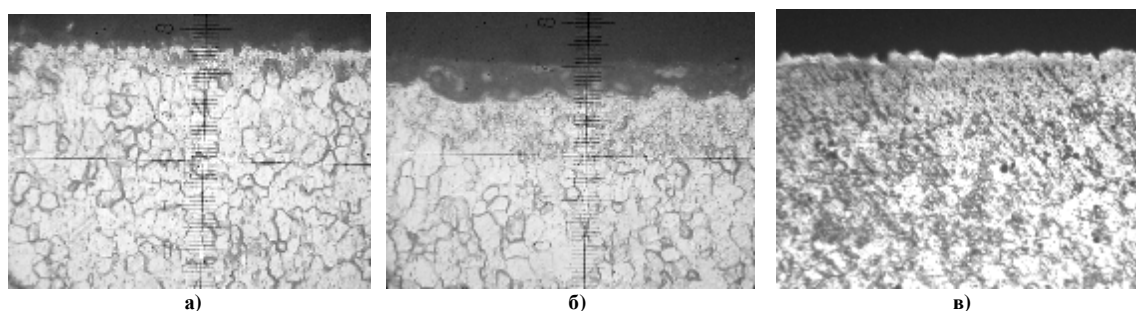


Рис. 1. Мікроструктура титану VT1-0 після модифікації поверхні лазерною обробкою без оплавлення (а), з оплавленням (б) та після лазерною обробкою без оплавлення з наступним азотуванням (в).

З табл. 1 видно, що максимальна товщина модифіковано шару одержана після лазерної обробки з великим оплавленням і наступним азотуванням в тліючому розряді і складала 250 мкм. Товщина зміцненого модифіковано шару при лазерній обробці без наступного азотування була меншою і складала 140 мкм при лазерній обробці без оплавлення, 160 мкм – при лазерній обробці з малим оплавленням, 180 мкм – при лазерній обробці з великим оплавленням. Виявлено, що товщина модифіковано шару залежить від потужності лазерного опромінення і збільшується з її збільшенням. Мікродисперсна структура поверхневого шару титану VT1-0, що утворилась при лазерній обробці з оплавленням, сприяла підвищенню дифузії азоту при азотуванні в тліючому розряді, і як наслідок, збільшенню товщини азотованого шару.

В табл. 1 і на рис. 3 наведені результати порівняльних випробувань зразків з титану VT1-0, поверхня

яких зміцнювалась за різними режимами, в середовищі рідини Рінгера. З табл. 1 видно, що найбільшу зносостійкість і довговічність (шлях тертя 5 000 м) мали зразки, що зміцнювались лазерним оплавленням з наступним азотуванням в тліючому розряді за оптимальним режимом [5]. Інтенсивність зношування зміцненого шару після шляху тертя 5 000 м складала $6,8 \cdot 10^{-8}$. При зміцненні титану за режимом малого оплавлення з наступним азотуванням в тліючому розряді довговічність зміцненого шару була меншою (шлях тертя 3 200 м), а інтенсивність зношування після шляху тертя 3 200 м була більшою і складала $8,3 \cdot 10^{-8}$. Довговічність зміцненого шару після обробки без оплавлення і наступного азотування була значно меншою (шлях тертя 500 м), а інтенсивність зношування після шляху тертя 500 м складала $45,6 \cdot 10^{-8}$, що в 5–6 разів більше в порівнянні з вищезгаданими режимами зміцнення.

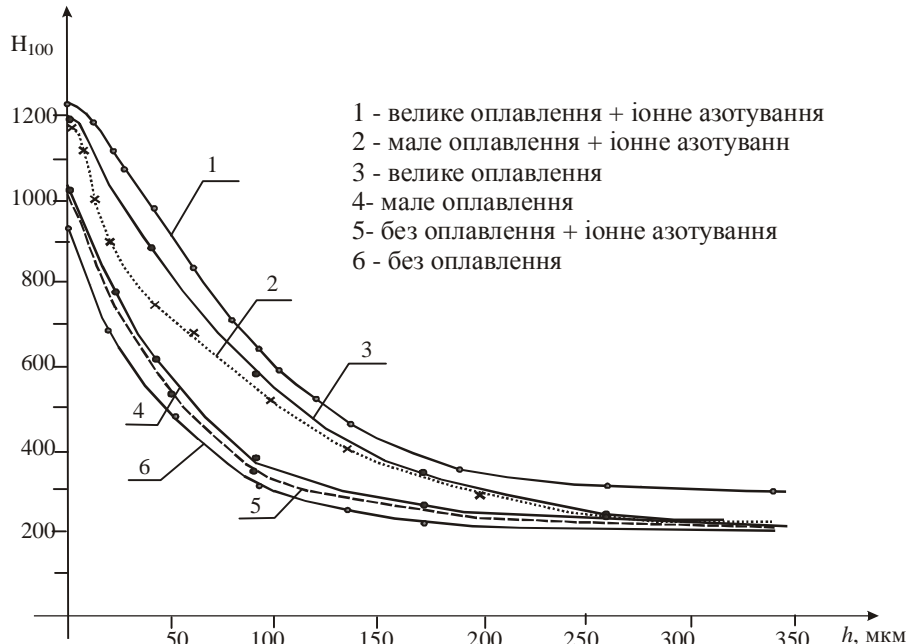


Рис. 2. Розподіл твердості за глибиною модифікованого шару титану VT1-0 за різних видів лазерної обробки та наступного іонного азотування

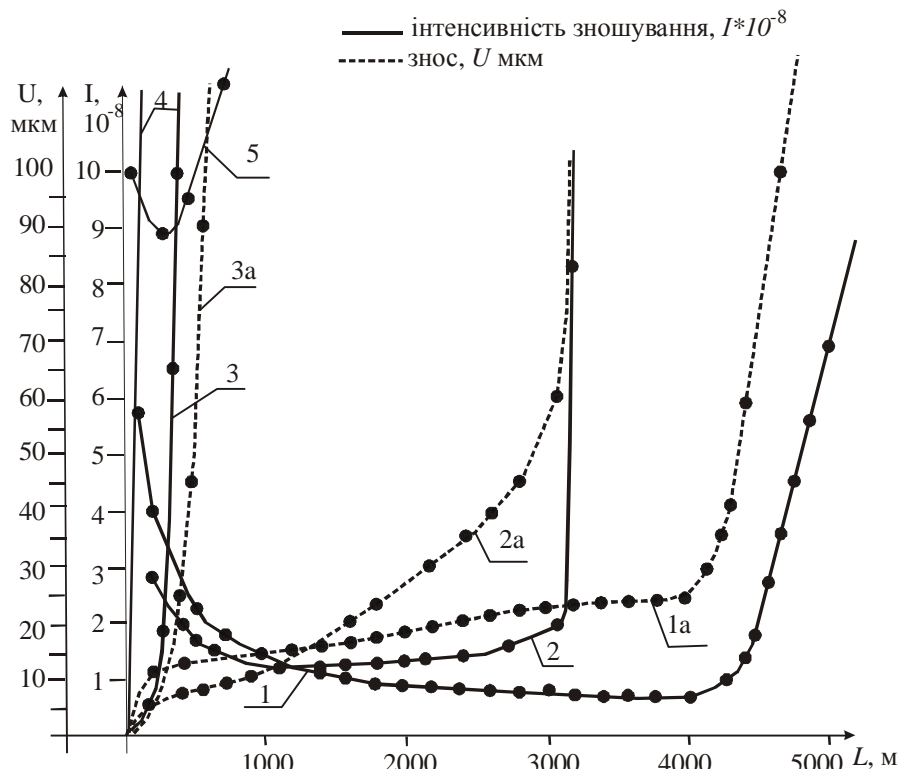


Рис. 3. Залежність зносу U та інтенсивності зношування $I \cdot 10^{-8}$ залежно від шляху тертя за різних видів лазерної обробки та азотування: 1,1a – велике оплавлення + азотування; 2,2a – мале оплавлення + азотування; 3,3a – без оплавлення + азотування; 4 – без оплавлення; 5 – велике оплавлення

Дослідження показали, що інтенсивність зношування зразків, що зміцнювались лазерною обробкою без наступного азотування, на порядок вище в порівнянні із зразками, які азотувалися після лазерної обробки.

Це пояснюється наявністю на поверхні тертя азоту і нітридних сполук, що виникають після азотування, їх антифрикційними властивостями та вищою твердістю і корозійною стійкістю модифікованих шарів.

На рис. 3 наведена кінетика зношування зразків титану VT1-0, що зміцнювалися за різними режимами, залежно від шляху тертя. З рис. 3 видно, що зразки, які зміцнювались за комплексною технологією (криві 1 і 2) на початку випробувань мали період припрацювання на шляху до 500 м і подальший період нормального зношування з постійною інтенсивністю на шляху до 3 000 м для зразків, оброблялись з малим оплавленням і 4 000 м для зразків, що оброблялись з великим оплавленням. В подальшому інтенсивність зношування різко збільшувалась в зв'язку із стиранням модифікованого шару.

Зразки, що не азотувалися після лазерної обробки, на шляху тертя 200–300 м мали повністю зношений модифікований шар з наступним катастрофічним зносом.

Висновки. Таким чином, проведені дослідження показали, що застосування комплексної технології зміцнення титану VT1-0 з використанням лазерної обробки і наступним азотуванням в тліючому розряді дозволяє значно підвищити (на 2 порядки) зносостійкість поверхневого шару в агресивному середовищі рідини Рінгера в порівнянні з немодифікованим титаном.

Література

- Загородний Н.В. Титановые сплавы в эндопротезировании тазобедренного сустава. / [Н.В. Загородний, А.А. Ильин, В.Н. Карпов, А.М. и др.] // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Пирогова. – 2000. – № 2. – С. 73–75.
- Солонина О.П. Жаропрочные титановые сплавы / О. П. Солонина, С. Г. Глазунов. – М. : Металлургия, 1976 – 448 с.
- Цвиккер У. Титан и его сплавы / У. Цвиккер ; [пер. с нем. под ред. О. П. Елютина и С. Г. Глазунова]. – М. : Металлургия, 1979. – 512 с.
- Hench L.L. Bioceramics / L.L. Hench // J. Am. Ceram. Soc. – 1998. – 81, №7. pp. 1705–1727.
- Каплун В.Г. Влияние низкотемпературного азотування в тліючому розряді на зносостійкість пари «титан-титан» / [Каплун В.Г., Машовець Н.С., Розенберг О.О., Шейкін С.Є.] // Вісник двигунобудування. – 2011. – № 1. – С. 67–73.

Надійшла 11.9.2011 р.

УДК 621.78/(66.088+537.52+66.046)

І.М. ПАСТУХ, М.В. ЛУК'ЯНЮК, В.О. КУРСКАЯ
Хмельницький національний університет

КЛАСИФІКАЦІЙНІ КРИТЕРІЇ ПРОЦЕСІВ АЗОТУВАННЯ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ З НЕСТАЦІОНАРНИМ ЖИВЛЕННЯМ

Розглянута структура та взаємозв'язок головних складових процесів азотування в тліючому розряді з непостійним живленням.

A structure and intercommunication of making processes of nitriding in glow discharge with the variable delivery is considered.

Ключові слова: азотування, тліючий розряд, нестационарне живлення, класифікація.

Модифікаційні процеси, в основі яких лежить використання вакуумно-дифузійних газорозрядних технологій, класифіковані в [1], при цьому була обґрунтована і призначена, як найбільш доцільна, наступна ієрархія рівнів вибору параметрів, за якими буде узагальнюватися інформація: фазовий склад середовища, що містить активний елемент модифікації; його стан; тип процесу модифікації; активатор процесу. Наведена система класифікаційних критеріїв відповідала поточним задачам дослідження, а саме – створенню моделі процесу та аналітичних характеристик, за допомогою яких було обґрунтовано енергетичний підхід до розгляду всіх явищ, котрі характерні саме для цього варіанту модифікації металевих поверхонь. Проте, в якості головної початкової гіпотези була прийнята умова незмінності електричних параметрів розряду протягом всієї фази обробки. Як відомо, таких параметрів два – напруга U між електродами, негативний з яких у звичайному варіанті модифікації комутований з об'єктом модифікації, позитивний – навпаки з розрядною камерою; густина струму j . З деякими умовностями можна вважати, що міжелектродна напруга в основному формує енергію часток падаючого потоку, а густина струму – його інтенсивність. З цієї причини теза про мінімум питомої потужності [2], як критерій найбільш результативного та оптимального режиму модифікації, безсумнісний, оскільки одне і теж значення потужності може бути отримане як безкінечна кількість варіантів добуток зазначених вище параметрів, проте результати обробки, очевидно, при цьому можуть бути діаметрально протилежними. Дійсно, при значних напругах, але малому струмові (густині струму) може спостерігатись інтенсивне розпорощення поверхні, що характерне для фази катодної очистки поверхні, і, навпаки – при протилежній комбінації цих основоположних характеристик такими, що