

І. М. ПОГРЕЛЮК, О. В. ТКАЧУК, О. В. САМБОРСЬКИЙ (Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України), З. О. СІРИК (Львівська філія ДІТу)

МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ З ПОВЕРХНЕВИМИ ЗМІЦНЕНИМИ ШАРАМИ

Вивчено вплив оксинітрування та борування на механічні характеристики (тимчасовий опір руйнуванню за одновісного розтягу, пластичність, схильність до сповільненого руйнування, опір втомі при згині з обертанням, втомну довговічність при малоцикловому чистому згині) титанових сплавів.

Ключові слова: оксинітрування, борування, механічні характеристики, титановий сплав, опір втомі

Изучено влияние оксинитрирования и борирования на механические свойства (временное сопротивление разрушению при одноосном растяжении, пластичность, склонность к замедленному разрушению, сопротивление усталости при изгибе с вращением, усталостную долговечность при малоцикловом чистом изгибе) титановых сплавов.

Ключевые слова: оксинитрирование, борирование, механические свойства, титановый сплав, сопротивление усталости

Influence of oxinitriding and boriding on the mechanical properties (ultimate strength to destruction at uniaxial tension, plasticity, tendency to delayed destruction, fatigue resistance at bending with rotation, fatigue life at low-cycle pure bending) of titanium alloys is studied.

Keywords: oxinitriding, boriding, mechanical properties, titanium alloys, fatigue resistance

Вступ

Руйнування деталі в процесі експлуатації, як правило, починається з поверхневого шару. Це пояснюється тим, що поверхневі шари знаходяться в найбільш напруженому стані, є межами поділу фаз і піддаються впливу навколишнього середовища [1, 2].

При хіміко-термічній обробці в поверхневих шарах виробів з титанових сплавів внаслідок розчинення і дифузії елементів втілення (кисню, азоту, вуглецю, бору) спотворюється кристалічна ґратка металу, змінюються її періоди і вноситься істотний, а іноді й вирішальний вплив на кристалографію ковзання і механізми пластичної деформації [3].

Мета даної роботи – оцінити вплив термо-дифузійного оксинітрування та борування на механічні властивості титанових сплавів.

Методика досліджень

Досліджували зразки титанових сплавів ВТ1-0 (технічно чистий титан), ПТ-7М, ВТ20, ВТ6с і ВТ14. Після виготовлення зразки відпалювали у вакуумі (режим вакуумного відпалу: $T = 800$ °С, $\tau = 2$ год, $P = 0,05$ МПа, $I = 0,1$ МПа \times дм³ \times с⁻¹) для формування вихідного структурно-фазового стану (зняття напружень, видалення водню, гомогенізація та стабілізація структури), а далі піддавали хіміко-термічній обробці (ХТО) – оксидуванню, азотуванню, оксинітруванню та боруванню [4].

Механічні випробування проводили на зразках, представлених на рис. 1.

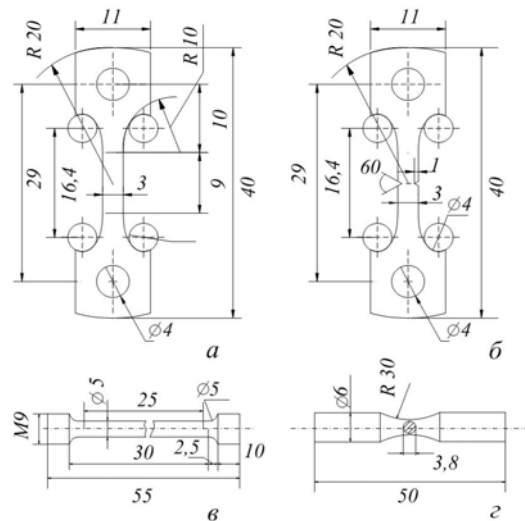


Рис. 1. Зразки для механічних випробувань: а – на малоцикловий чистий згин; б – на сповільнене руйнування; в – на короткотривалу міцність; з – на згин з крученням

Зразки (див. рис. 1, а, б) виготовляли методом штампування. Технологічний припуск, який після штампування становить 1 мм на сторону, видаляли шліфуванням. Робочу частину зразків доводили до регламентованих розмірів та якості поверхні в твердосплавних шаблонах шліфувальним папером М40...50 за ГОСТ 5009-82. Зразки з V-подібним концентратором (див. рис. 1, в) використовували для ви-

значення впливу ХТО на схильність титанових сплавів до сповільненого руйнування.

Випробування на тимчасовий опір руйнуванню при одноосьовому розтягуванні проводили на розривній машині Р-0,5. Швидкість розтягу – швидкість рухомого захвату становила 4,8 мм/хв. Діаграму розтягування будували в координатах «навантаження – видовження». Визначали величини σ_B і δ за стандартною методикою.

Втомні дослідження за схемою згин з обертаням проводили з частотою навантаження 46 Гц. Базу для визначення межі втоми – $1,5 \times 10^7$ циклів. Використовували циліндричні зразки за стандартом DIN 50113 (див. рис. 1, з).

Випробування на малоциклову втому проводили за схемою малоциклового чистого згину в режимі жорсткого навантаження із заданою амплітудою деформації і частотою навантаження $\nu = 0,5$ Гц. Результати випробувань представляли в координатах «максимальна амплітуда деформації ε_a – логарифм кількості циклів до руйнування».

Результати випробувань обробляли методами математичної статистики.

Результати та їх обговорення

Оксиднування. Формування нітридного та оксинітридного покриттів на зразках технічно чистого титану VT1-0 здійснювали за наступними режимами: оксинітрування – нагрів до 950 °С у вакуумі, напуск азоту (1 Па), 10 год., видалення азоту, напуск кисневмісного середовища ($p_{O_2} = 0,1$ Па), охолодження у цьому середовищі до 500 °С, вакуумування і подальше охолодження; азотування – нагрів до 950 °С у вакуумі, напуск азоту (10^5 Па), 10 год., охолодження в азоті. Для виключення впливу термічної обробки проводили вакуумний відпал за аналогічних температурно-часових параметрів (950 °С, 10 год., вакуум 10^{-3} Па).

Оксиднування дещо знеміцнює титан. Відзначимо, що істотної різниці у показниках після азотування та оксинітрування не спостерігається (табл. 1). Приріст міцності в результаті азотування супроводжується суттєвим зниженням пластичності титану (див. табл. 1). В той же час оксинітрування максимально зберігає пластичність титану.

Формування нітридного, оксидного та оксинітридного покриттів із ідентичними параметрами структурних складових (поверхнева плівка завтовшки 1...3 мкм і дифузійний шар завтовшки 40...60 мкм) на зразках титанового

сплаву VT14 здійснювали за наступними режимами: оксинітрування – нагрів до 850 °С у вакуумі, напуск азоту (10^5 Па), 3 год., видалення азоту, напуск кисневмісного середовища ($p_{O_2} = 0,01$ Па), охолодження у цьому середовищі до 500 °С, вакуумування і подальше охолодження; оксиднування – 800 °С, 4 год., 700 °С, 1,5 год., 0,01 Па; азотування – нагрів до 830 °С у вакуумі, напуск азоту (1 Па), 5 год.

Таблиця 1

Тимчасовий опір руйнуванню та відносне видовження зразків технічно чистого титану VT1-0 та титанового сплаву VT14 після обробок

Обробка	VT1-0		VT14	
	σ_B , МПа	δ , %	σ_B , МПа	δ , %
Вихідний стан	486	28,2	1003	19,6
Вакуумний відпал	490	14,7	–	–
Оксиднування	478	26,5	945	19,6
Азотування	540	12,3	950	18,8
Оксиднування	–	–	980	17

Отримані результати однозначно свідчать, що дифузійні покриття, що формуються під час ХТО, призводять до загального знеміцнення зразків сплаву VT14 (див. табл. 1). Проте ці зміни не є надто суттєві: втрата міцності складає всього лише 20...60 МПа. В той же час оксинітрування зберігає пластичні характеристики титанового сплаву VT14 (див. табл. 1). У свою чергу, оксиднування та азотування знижують ці значення, і суттєвіші втрати спостерігаються після оксиднування.

Порівнювали вплив азотування та оксинітрування на механічні характеристики титанових сплавів різних структурних класів (α -сплаву ПТ-7М, псевдо- α -сплаву VT20 та $(\alpha + \beta)$ -сплаву VT6с). Оксинітрування проводили наступним чином. Нагрівали до $T_A = 850$ °С у вакуумі 10 МПа, після чого насичували протягом $\tau_A = 5$ год. в молекулярному азоті $p_{N_2} = 10^5$ Па. Охолоджували до 500 °С в розрідженому кисневмісному середовищі ($p_{O_2} = 0,001$ Па), далі камеру вакуумували. Азотування здійснювали за аналогічних оксинітруванню температурно-часових та газодинамічних параметрів.

Величина тимчасового опору руйнуванню сплавів ПТ-7М і VT6с після оксинітрування знижується в порівнянні з азотуванням на

50...60 МПа (табл. 2). Водночас міцність титанового сплаву ВТ20 після оксинітрування зростає на 10 МПа відносно азотування.

Оксинітрування ефективніше зберігає титановим сплавам пластичність, ніж азотування. Так, пластичність сплавів ВТ20 і ПТ-7М після оксинітрування на 0,9...1,3 % більша, причому зі збільшенням вмісту α -фази у сплаві цей ефект суттєвіший.

Таблиця 2

Міцнісні характеристики титанових сплавів після азотування та оксинітрування

Характеристики*	ХТО	ПТ-7М	ВТ20	ВТ6с
σ_B , МПа	Азотування/ Оксинітрування	606/ 547	859/ 869	898/ 843
δ , %		21,2/ 22,5	9,0/ 9,9	10,7/ 10,6

* дослідження проводили на мікрорізках (див. рис. 1, а)

При випробуванні титанових сплавів з оксинітридними покриттями на втомну довговічність за малоциклового чистого згину було показано, що у досліджуваному діапазоні величини деформації число циклів до руйнування збільшується в напрямку ПТ-7М→ВТ20→ВТ6с (рис. 2). Це добре узгоджується із зменшенням вмісту α -фази у сплаві.

Для азотованого сплаву ПТ-7М в діапазоні величини деформації 0,6...1 % число циклів до руйнування більше, ніж для оксинітрованого сплаву (див. рис. 2, а). В діапазоні 1...1,3 %, навпаки, менше. Оксинітрований сплав ВТ20 у всьому досліджуваному діапазоні величини деформації характеризується вищим рівнем опору малоциклової втомі, ніж азотований (див. рис. 2, б). Число циклів до руйнування в діапазоні величини деформації від 0,75 до 1,22 % оксинітрованого сплаву ВТ6с більше, ніж азотованого. Зі збільшенням рівня деформації до 1,3 % більшу стійкість до дії малоциклової втоми забезпечує азотування (див. рис. 2 в).

Таким чином, оксинітридні покриття забезпечують титановим сплавам вищу втомну довговічність в ширшому діапазоні навантажень, ніж нітридні.

На рис. 3 та у табл. 3 наведені результати випробувань зразків сплаву ВТ14 з V-подібним концентратором, після оксинітрування, оксидування та азотування, на сповільнене руйнування під статичним навантаженням

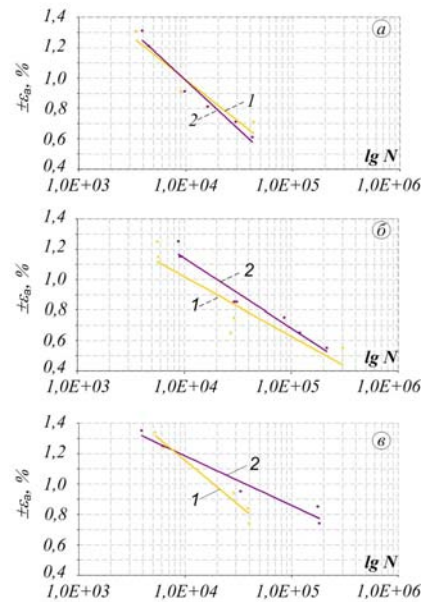


Рис. 2. Втомна довговічність титанових сплавів після азотування (1) і оксинітрування (2): а – ПТ-7М; б – ВТ20; в – ВТ6с.

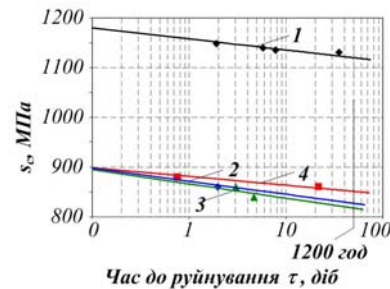


Рис. 3. Криві сповільненого руйнування під статичним навантаженням титанового сплаву ВТ14 у вихідному стані (1) та після оксидування (2), азотування (3), оксинітрування (4).

Таблиця 3

Руйнівні напруження (σ_c) за умов сповільненого руйнування під статичним навантаженням та границя втоми (σ_a) за умов обертового згину титанового сплаву ВТ14 після ХТО

Хіміко-термічна обробка	σ_c , МПа	σ_a , МПа
Вихідний стан	1120	470
Оксидування	825	380
Азотування	815	435
Оксинітрування	850	415

За усіх режимів ХТО руйнівні напруження зменшуються лінійно зі збільшенням логарифму часу до руйнування (див. рис. 3). Усі види ХТО призводять до суттєвого зниження величини напруження руйнування σ_c , визначеного на базі 1200 год. витримки під статичним нава-

нтаженням, порівняно з вихідним, відпаленим станом ($\sigma_c = 1125$ МПа).

Проте серед способів ХТО найсуттєвіше напруження руйнування зменшується (на 295 МПа) після оксидування – до 825 МПа (див. табл. 3). Це можна пояснити суттєвим окрихченням поверхневого шару титану внаслідок газонасичення та формування крихкої оксидної плівки [1]. Найменше напруження руйнування сплаву ВТ14 зменшується після оксинітрування (на 270 МПа).

Вплив різних способів ХТО на здатність титанового сплаву ВТ14 чинити опір руйнуванню оцінювали за результатами випробувань на циклічну витривалість за умов обертового згину. У табл. 3 та на рис. 4 наведені результати випробувань зразків титанового сплаву ВТ14 після оксинітрування, оксидування та азотування.

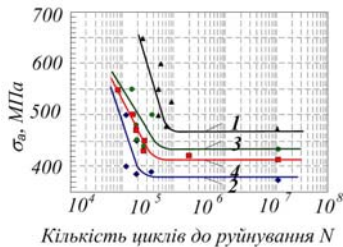


Рис. 4. Криві втоми (обертовий згин) титанового сплаву ВТ14 у вихідному стані (1) та після оксидування (2), азотування (3), оксинітрування (4).

Усі способи ХТО знижують границю втоми за умов обертового згину порівняно із вихідним, відпаленим станом. Найнижчі значення границі втоми за умов обертового згину сплав ВТ14 має після оксидування - $\sigma_a = 380$ МПа, а найвищі – після азотування - $\sigma_a = 435$ МПа. Границя втоми сплаву після оксинітрування нижча від границі втоми після азотування на 20 МПа, що не надто суттєво.

Отже, вплив оксинітрування на характеристики міцності, пластичності, втомної довговічності менш істотний, ніж оксидування та азотування. Покращення комплексу механічних характеристик відносно азотування можна пов'язувати з послабленням поля внутрішніх напружень у сформованих покриттях (рис. 5), яке оцінено рентгенографічним методом.

Борування. Для оцінки впливу термодифузійного насичення з боровмісного середовища на механічні характеристики проводили випробування зразків технічно чистого титану ВТ1-0 після неконтактного насичення з різних активних боровмісних середовищ (аморфний бор, вакуум 1 Па; карбід бору, вакуум 1 Па). Насичували за температури 850, 900 і 950 °С впро-

довж 8...12 год. Визначали міцність, пластичність і втомну довговічність.

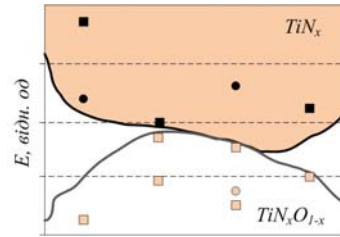


Рис. 5. Рівень мікронапружень у сформованих на титанових сплавах нітридних та оксинітридних покриттях

З підвищенням температури з 850 до 900 °С при насиченні впродовж 12 год. з аморфного бору у вакуумі 1 Па міцність титану ВТ1-0 зростає з 450 до 460 МПа (рис. 6). Обробка при 950 °С впродовж 8 год. у даному середовищі забезпечує границю міцності сплаву на рівні 540 МПа. Порівняно з азотуванням (відповідно 500, 620 і 550 МПа відповідно) за аналогічних температурно-часових параметрів рівень міцності, що забезпечується обробкою в боровмісному середовищі, є дещо нижчим. Правда, при цьому вищими є характеристики пластичності. Так, при обробці 850 °С, 12 год. відносно вдовження титану ВТ1-0 після насичення з аморфного бору складає 14,4 %, тоді як після азотування – 10,5 %.

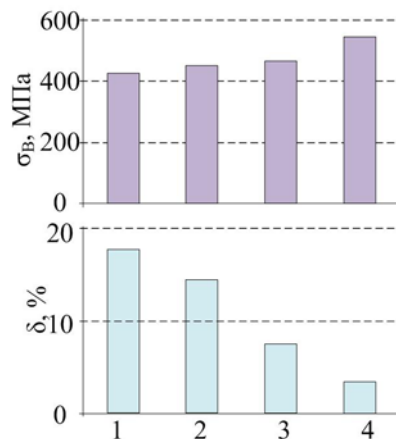


Рис. 6. Міцність і пластичність титану ВТ1-0 після неконтактного насичення з аморфного бору у вакуумі 1 Па:
1 – 850 °С, 6 год.; 2 – 850 °С, 12 год.;
3 – 900 °С, 12 год.; 4 – 950 °С, 8 год.

Рівень міцності титану ВТ1-0, що забезпечується ізотермічним насиченням з карбиду бору у вакуумі 1 Па, порівняно з насиченням з аморфного бору за ідентичних температурно-часових параметрів є дещо вищим (рис. 6, 7). З підвищенням температури з 850 до 900 °С при насиченні впродовж 12 год. міцність титану

зростає з 480 до 520 МПа. Обробка при 950 °С впродовж 8 год. забезпечує границю міцності сплаву на рівні 590 МПа.

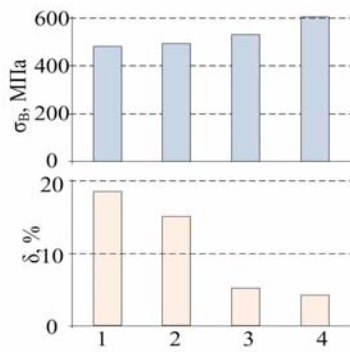


Рис. 7. Міцність і пластичність титану VT1-0 після неконтактного насичення з карбіду бору у вакуумі 1 Па:
1 – 850 °С, 6 год.; 2 – 850 °С, 12 год.;
3 – 900 °С, 12 год.; 4 – 950 °С, 8 год.

Порівняно з азотуванням за аналогічних температурно-часових параметрів рівень міцності сплаву VT1-0, як і після насичення з аморфного бору, є дещо нижчим. При цьому характеристики пластичності вищі лише після насичення за температури 850 °С (14,8 % проти 10,5 %). Після насичення за вищих температур відносно видовження після борування з карбіду бору вже поступається азотуванню (див. рис. 7).

Після насичення з аморфного бору у вакуумі за температури 850 °С впродовж 12 год. рівень втомних характеристик сплаву VT1-0 практично не відрізняється від отримуваних після азотування за однакових температурно-часових параметрів (рис. 8). Деяке відхилення в бік покращення відносно азотування спостерігається при деформаціях, менших 0,7 %.

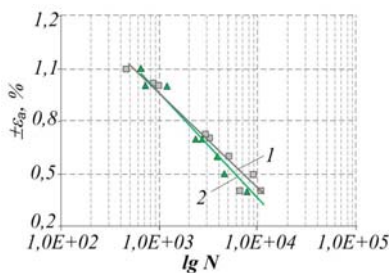


Рис. 8. Число циклів до руйнування при різних рівнях деформації сплаву VT1-0 після неконтактного насичення з аморфного бору у вакуумі (1) і після азотування (2) (850 °С, 12 год.)

Підвищення температури насичення до 900 °С за ідентичної експозиції змінює втомні характеристики сплаву не суттєво (рис. 9). При деформації, вищій 0,7 %, спостерігається деяке зменшення втомної довговічності, вищій 0,7 % – збільшення числа циклів до руйнування.

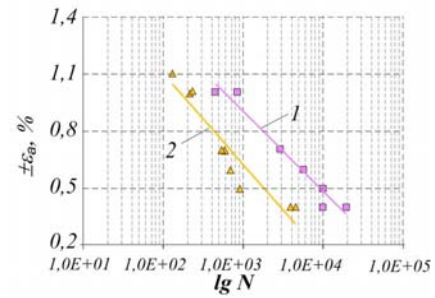


Рис. 9. Число циклів до руйнування при різних рівнях деформації сплаву VT1-0 після неконтактного насичення з аморфного бору у вакуумі (1) і після азотування (2) (900 °С, 12 год.)

Загалом, за вказаних параметрів оброблення, формування азотованого шару знижує втомні властивості титану VT1-0 на 10 % більше, ніж борованого.

Підвищення температури насичення до 950 °С при 8-годинній експозиції, коли на поверхні сплаву формується плівка дибориду титану, суттєво знижуються втомні характеристики сплаву VT1-0. Число циклів до руйнування відносно насичення при 850 і 900 °С впродовж 12 год. за деформації 0,7 % зменшується на 97 %. При цьому рівень втомної довговічності борованого сплаву за таких температурно-часових параметрів насичення мало поступається азотованому (рис. 10).

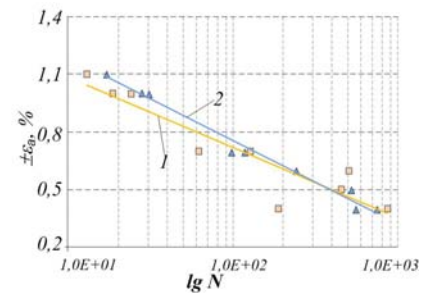


Рис. 10. Число циклів до руйнування при різних рівнях деформації сплаву VT1-0 після неконтактного насичення з аморфного бору у вакуумі (1) і після азотування (2) (950 °С, 8 год.)

Що стосується порівняння втомних характеристик титану після оброблення за температури 900 °С впродовж 12 год., то число циклів до руйнування борованих зразків на 81 % більше, ніж азотованих (див. рис. 9).

Використання в якості активного середовища карбіду бору за насичення при температурі 850 °С, 12 год. зменшує втомну довговічність технічно чистого титану VT1-0 порівняно з насиченням з аморфного бору (рис. 11): при деформації 0,7 % на 68 %. Після насичення за температури 900 °С це зниження ще суттєвіше (на 85 %) (рис. 12).

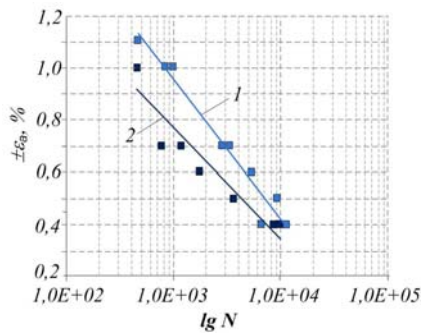


Рис. 11. Число циклів до руйнування при різних рівнях деформації сплаву VT1-0 після неконтактного насичення з аморфного бору у вакуумі (1) і з карбіду бору у вакуумі (2) (850 °С, 12 год.).

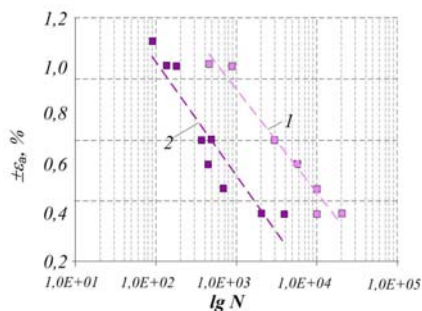


Рис. 12. Число циклів до руйнування при різних рівнях деформації сплаву VT1-0 після неконтактного насичення з аморфного бору у вакуумі (1) і з карбіду бору у вакуумі (2) (900 °С, 12 год.).

Подальше підвищення температури ізотермічної витримки при боруванні вносить зміни у зазначені закономірності. Зокрема, після оброблення за температури 950 °С впродовж 8 год. число циклів до руйнування зразків технічно чистого титану VT1-0 після насичення з карбіду бору на 80 % більше, ніж після насичення з аморфного бору (рис. 13).

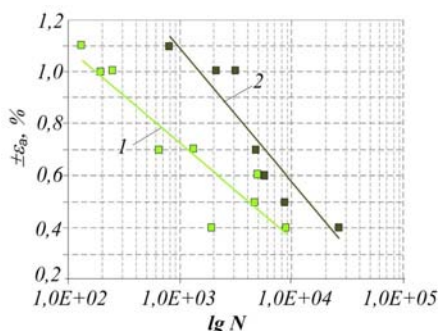


Рис. 13. Число циклів до руйнування при різних рівнях деформації сплаву VT1-0 після неконтактного насичення з аморфного бору у вакуумі (1) і з карбіду бору у вакуумі (2) (950 °С, 8 год.).

Висновки

Встановлено, що після оксинітридування краще зберігають міцнісні та втомні характеристики титанових сплавів, ніж після оксидування та азотування. Так, пластичність титанових сплавів з оксинітридними покриттями на 1,8...14,2 % більша, ніж з оксидними та нітридними із ідентичними параметрами структурних складових. Покращення комплексу механічних характеристик титанових сплавів з оксинітридними покриттями порівняно з нітридними пов'язано з послабленням поля внутрішніх напружень у цих покриттях відносно нітридних.

Термодифузійне неконтактне насичення з аморфного бору у вакуумі з формуванням поверхневої плівки монобориду титану і перехідного дифузійного шару забезпечує вищий рівень втомних характеристик титановим сплавам порівняно з азотуванням.

БІБЛЮГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Колачев, Б. А., Физические основы разрушения титана [Текст] / Б. А. Колачев, А. В. Мальков. – М.: Металлургия, 1983. – 160 с.
2. Чечулин, Б. Б. Циклическая и коррозионная прочность титановых сплавов [Текст] / Б. Б. Чечулин, Ю. Д. Хесин. – М.: Металлургия, 1987. – 208 с.
3. Цвиккер и его сплавы [Текст] / У. Цвиккер. – М.: Металлургия, 1979. – 512 с.
4. Погрелюк, І. М., Проблеми інженерії поверхні титанових сплавів [Текст]: фізико-механічний інститут (до 60-річчя з часу заснування) / під ред. В. В. Панасюка – Львів: СПОЛОМ, 2011. – 121 – 138.

Надійшла до редколегії 16.05.2011.

Прийнята до друку 30.05.2011.