

## ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ, ЗМІЦНЕНОГО КЕРАМІЧНИМ КОМПОЗИЦІЙНИМ ПОКРИТТЯМ В УМОВАХ ФРЕТИНГ-КОРОЗІЇ

Лабунець В.Ф., Бурбела Ю.Б.

Національний авіаційний університет  
int2080@ukr.net

*У статті розглянуто зносостійкість титанового сплаву BT3-1 в умовах контактної навантаженості. Проаналізовано ситуацію проведення цієї роботи. Досліджено зміцнення поверхні титанового сплаву керамічними композиційними покриттями. Наведено результати випробувань в умовах фретинг-корозії під час тертя без мастильного матеріалу на повітрі в системах «покриття—покриття» і «покриття—сталь 45».*

*In this article the wearproofness of titanic alloy of BT3-1 is considered under conditions of a contact loading. The situation analysis and needs in such work have been carried out. The research of the surface strengthening of this alloy with ceramic composition coverages is also described. The tests results under conditions of fretage at a friction without lubricating material out on the air in the systems „coverage-coverage” and „coverage-steel 45” are shown here.*

### Вступ

Підвищення надійності та довговічності деталей машин і механізмів, які працюють у різних умовах контактної взаємодії, здійснюється за допомогою конструктивних, технологічних та експлуатаційних методів.

Сучасні технологічні методи поверхневого зміцнення та відновлення деталей машин відкривають необмежені можливості для створення захисних структур триботехнічного призначення, що забезпечують надійну роботу вузлів тертя в різноманітних умовах контактної взаємодії, а саме: у разі великих навантажень; високих температур; великих швидкостей; при впливі вібрації, радіації, абразивних та корозійних середовищ тощо. Упровадженню у виробництво технологічних процесів створення таких захисних структур передують визначення провідних процесів, які розвиваються на деталях певних пар тертя, розробка технології створення захисних структур і визначення їх триботехнічних характеристик.

Аналіз чисельних досліджень дає змогу визначити такі основні шляхи створення поверхневого прошарку зовнішнім механічним (або тепловим) впливом без зміни його хімічного складу:

- зміна структури поверхневого прошарку легування його різноманітними хімічними елементами;
- нанесення на поверхню тертя покриттів;
- комбінація перерахованих вище методів.

На сьогодні широке використання знайшли методи отримання захисних композиційних структур, які значно підвищують працездатність деталей вузлів тертя.

Особливо це стосується вузлів тертя, від працездатності яких залежать надійність і довговічність авіаційної техніки. У конструкції вузлів тертя все частіше використовують деталі, виготовлені із титанових сплавів як перспективних

матеріалів триботехнічного призначення. Більш широкому використанню титанових сплавів у конструкціях трибовузлів будуть сприяти розробки науково-технологічних основ формування зносостійких покриттів, а також виконання комплексу досліджень з визначення їх триботехнічних властивостей з метою запровадження результатів досліджень у технологічних процесах поверхневого зміцнення та відновлення деталей вузлів тертя.

### Аналіз досліджень

Основним споживачем титанових сплавів є галузь літакобудування, де використання цих матеріалів зумовлено, насамперед, високою питомою міцністю, жароміцністю і корозійною стійкістю [1]. Завдяки цим властивостям титанові сплави все більше витісняють із конструкції літаків і авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) конструкційні сплави на основі заліза, а під час експлуатації в умовах низьких і високих температур (до 500—550 °С) відповідно холодостійкі нержавіючі сталі і жароміцні сплави, причому обсяг використання титанових сплавів у літакобудуванні постійно зростає [2].

Різнманітність силових, контактних, температурних, корозійних та інших умов роботи деталей різних вузлів, систем і агрегатів повітряних суден і авіаційних ГТД приводить до процесів, які відбуваються як на поверхні, так і в тілі деталей, утворюючи різні за характером пошкодження та дефекти, в тому числі обумовлюють різні процеси, які відповідають за механізм та характер зношування.

З метою виявлення масштабів пошкодження деталей вузлів тертя на прикладі одного з авіаційних ГТД було проведено статистичний аналіз усіх несправностей і дефектів з визначенням відсотків по кожному із них у загальній кількості. Аналіз виконувався на основі інформації за даними дефектації деталей під час ремонту. Спо-

чатку аналізувались усі несправності і дефекти, які стали причиною вибракування деталей. До групи дефектів, пов'язаних з тертям та зношуванням належали такі, як спрацювання, знос поверхні, зменшення розміру, збільшення зазору у спряженні, відсутність натягу та інші подібні, які за своїми ознаками вказували про появу їх унаслідок тертя. Значну частку складають також дефекти пов'язані з об'ємним руйнуванням деталей — забоїни, сколи, тріщини, руйнування від втоми або «руйнування під дією статичного навантаження».

До першої групи належать деталі, зношування яких відбувається по поверхнях у номінально нерухомих з'єднаннях і пов'язане з розвитком фретинг-корозії. З цієї групи деталей найбільш значними за кількістю встановлених на двигуні, інтенсивністю зношування і впливу на показники надійності та вартості витрат за необхідності заміни їх під час ремонту є робочі лопатки компресора, насамперед бандажовані з антивібраційними полицями (АВП). Як показав аналіз, зношування лопаток відбувається по контактних поверхнях АВП унаслідок відносно циклічного вібропереміщення під дією вібрації, яка виникає за причини неурівноважування маси ротора і пульсації газового потоку. Вібрація і тертя в стиках замкових з'єднань робочих лопаток з диском призводить до утворення на контактних поверхнях лопаток пошкоджень, викликаних фретинг-корозією, і як неодноразово спостерігалось, стає причиною втомного руйнування лопаток по замковій частині і міжфазових виступів дисків компресорів ГТД із титанових сплавів при їх експлуатації [3].

До деталей першої групи, зношування яких пов'язане з розвитком фретинг-корозії по поверхнях в номінально нерухомих з'єднаннях, належать також напрямні лопатки компресора, переходники, кільця та інші, для яких вібрація і знакозмінне навантаження в процесі експлуатації є постійно діючим фактором.

Другу велику групу деталей ГТД із титанових сплавів складають деталі, зношування яких пов'язане з тертям ковзання. Найбільш масовими деталями цієї групи є робочі лопатки компресора низького і високого тиску. Причиною відбракування, спільною для цих деталей, є знос торців та, як наслідок, зменшення висоти лопаток, яка за міжремонтний період досягає 0,2 мм і більше.

### **Завдання**

Дослідити зносостійкість титанового сплаву ВТЗ-1 в умовах фретинг-корозії, зміцненого керамічними композиційними покриттями.

### **Основний матеріал дослідження**

Найважливіше значення висока питома міцність титанових сплавів має для авіаційної і ра-

кетно-космічної техніки, де важливу роль відіграє фактор вагової характеристики конструкції. Температурний інтервал використання титанових сплавів завдяки збереженню високої питомої міцності і жаростійкості сягає від криогенних температур до температури 500—550 °С, а для окремих сплавів, таких як інтерметалідний сплав TiAl (50 масових часток % Ti + 50 масових часток % Al) може доходити до 1100—1200 °С. При звичайних температурах титан і сплави на його основі майже не піддаються атмосферній корозії і корозії під дією більшості кислот і лужних розчинів, що забезпечує їх високу корозійну стійкість без застосування спеціальних засобів захисту, без яких використання більшості інших конструкційних сплавів у корозійних середовищах неможливе.

Якщо за рівнем питомої міцності і корозійної стійкості титанові сплави задовольняють вимоги конструкційного матеріалу для сучасної техніки і можуть не тільки конкурувати, а навіть мають значну перевагу над багатьма іншими конструкційними сплавами, то використання їх у вузлах тертя без певної зміцнювальної поверхневої обробки або захисних покриттів у більшості випадків не можливе. Незалежно від системи легування, фазового і структурного стану, рівня міцності і твердості, сплави на основі титану відрізняються низькими триботехнічними властивостями і схильні до схоплення і налипання під час тертя в будь-якому поєднанні з матеріалами пари тертя. Коефіцієнт тертя технічного титану в однойменній парі і в парах з іншими металами під час тертя ковзання на повітрі коливається в межах 0,48—0,68. Причому легування титану як  $\alpha$ , так і  $\beta$ -стабілізуючими елементами, термічна обробка титанових сплавів незначно підвищують стійкість до схоплення і знижують коефіцієнт тертя.

Відомо, що високу корозійну стійкість титану і його сплавів обумовлює наявність на поверхні плівки оксиду TiO<sub>2</sub>. Завдяки високій хімічній активності титану до кисню окисна плівка здатна швидко поновлюватись під час утворення ювенільної поверхні навіть за звичайних температур.

Швидкість процесів руйнування і утворення окисної плівки під дією сил тертя при терті ковзання визначає тривалість так званого «латентного» періоду до настання схоплення, який залежить від питомого навантаження, швидкості ковзання, шорсткості поверхні спряжених деталей, температури експлуатації. Важливим фактором у цьому процесі є також ступінь відкритості вузла тертя, який визначається коефіцієнтом перекриття площі контакту спряжених деталей.

Природа низької зносостійкості і схильності до схоплення титану і його сплавів при терті ковзання нині з'ясована недостатньо повно, і в літературі наводяться різні уявлення про механізм і

фактори, які обумовлюють низькі антифрикційні властивості титанових сплавів. Так, у праці [4] низька зносостійкість титану пояснюється особливостями будови кристалічної ґратки  $\alpha$  – Ti, яка забезпечує в процесі пластичного деформування при терті ковзання відразу по декількох площинах, що викликає нагромадження дефектів типу вакансій і значну активацію поверхневих шарів, тобто збільшення внутрішньої енергії. Зменшення накопиченої внутрішньої енергії (пасивація) проявляється в схопленні шляхом взаємної дифузії атомів контактуючих металів по вакансійному механізму, в результаті чого в місцях контакту формуються спільні ґратки контактуючих металів.

Високу схильність до схоплення і низьку зносостійкість титанових сплавів автори пояснюють низькою міцністю вторинних структур, які утворюються на їх поверхні в процесі тертя. За допомогою просвічуваної електронної мікроскопії і мікродифракції ними встановлено, що на відміну від вторинних структур, які утворюються на сталі, міді і алюмінію, вторинні структури на титані не мають явно вираженої текстури і відрізняються значно більшою товщиною і меншою дисперсністю, що пояснюється високою рухомістю атомів кисню в  $\alpha$  – Ti.

Поряд з зазначеними факторами значний вплив на триботехнічні показники титану і його сплавів мають їх фізико-хімічні властивості — низька теплопровідність (теплопровідність титану в чотири рази нижча теплопровідності заліза і в 15 разів менша теплопровідності алюмінію), висока хімічна активність і здатність у великій кількості поглинати кисень, азот і водень.

Низька теплопровідність утруднює процес відведення тепла, яке виділяється при терті, з поверхні в об'єм деталі, в результаті чого значно зростає температура в зоні контакту. Цей процес може мати подвійний вплив. З одного боку, зростання температури сприяє окисненню й утворенню на поверхні деталі захисної оксидної плівки, що в деяких випадках може бути фактором зниження інтенсивності зношування, з іншого боку, великий градієнт температури в поверхневому шарі є фактором утворення додаткових термічних напружень і, відповідно, збільшення інтенсивності зношування.

Процес насичення приповерхневих шарів титану під дією високих контактних температур і трибоактивації приводить до підвищення твердості і окрихчування матеріалу. Так, вміст водню в  $\alpha$  – Ti понад 0,0015 % веде до утворення так званої водневої крихкості. З цього погляду зростання твердості і крихкості поверхневого шару за рахунок насичення газами при терті є негативним і буде призводити до зростання зносу, особливо при великих питомих напруженнях на плямах фактичного контакту і ударних навантаженнях.

Схильність до схоплення, низька стійкість до зношування при терті як в однойменних парах, так і в парі з іншими матеріалами, високий коефіцієнт тертя і низька ефективність змащування матеріалів є причиною того, що титанові сплави безпосередньо без відповідних захисних покриттів не використовуються як конструкційні для деталей вузлів тертя.

Різноманітність силових, контактних, температурних, корозійних та інших умов роботи деталей різних вузлів, систем і агрегатів повітряних суден і авіаційних ГТД приводить до різних процесів, які відбуваються як на поверхні, так і в об'ємі деталей і утворюючих різні за характером пошкодження та дефекти, в тому числі обумовлюють різні процеси, які відповідають за механізм та характер зношування.

Проведений аналіз причин пошкодження деталей вузлів тертя АТ показав [5], що проблема забезпечення зносостійкості деталей із титанових сплавів як при виробництві, так і під час ремонту АТ є актуальною і потребує подальшого дослідження. Вона актуальна також і для інших споріднених галузей техніки, де заміна традиційних конструкційних сплавів сплавами на основі титану дає значні техніко-економічні переваги при створенні нових зразків техніки, але використання титанових сплавів обмежується або унеможливується їх низькими антифрикційними властивостями і зносостійкістю при будь-яких умовах тертя та зношування, насамперед, у вузлах тертя, де об'єктивно існують умови для розвитку фретинг-корозії.

Найбільш ефективним способом підвищення триботехнічних властивостей деталей є нанесення захисних покриттів, зокрема методом електроіскрового легування (ЕІЛ), який відрізняється технологічною простотою, низькою енергомісткістю, високою міцністю зчеплення покриття з основою і можливістю отримання багатофункціональних градієнтних шарів з дискретною структурою і змінним по товщині фазовим складом.

Традиційними матеріалами для створення зносостійких покриттів на титанових сплавах є тугоплавкі з'єднання титану з киснем, азотом, вуглецем [6].

Недоліком матеріалів, що містять титан є схильність титану до утворення крихкотілих оксидних плівок у процесах стаціонарного окиснення та трибоокиснення. Крихкотіла плівка оксиду титану має в 1,6 разу більший питомий об'єм, ніж матеріал покриття. Згідно з критерієм Пілінга—Бедвардса, такі плівки є нещільними і не захищають поверхню від окиснення [7]. Це призводить до руйнування вторинних структур та їх винесення із зони трибоконтакту. У зв'язку з цим цікаво дослідити, як впливають на триботехнічні властивості титанових сплавів покриття

із тугоплавких сполук цирконію, який на відміну від титану, при окисненні утворює щільний шар оксиду  $ZrO_2$ . Крім того, кераміка на основі  $ZrB_2$  із жаростійкими кремнійвміщувальними домішками розглядається як перспективний матеріал, стійкий до високотемпературного окиснення (до  $1600\text{ }^\circ\text{C}$ ). Перспективність використання матеріалів на основі  $ZrB_2$  було доведено на прикладі отримання зносостійких ЕІЛ-покриттів із них на сталях та алюмінієвих сплавах [8; 9]. Оскільки  $Ti$  та  $Zr$  є ізоелектронними та ізоструктурними елементами, можна очікувати змочуваності титаном тугоплавких з'єднань цирконію, що необхідно для міцного адгезійного зв'язку в системі  $ZrX$ - $Ti$ -сплав ( $X = B, C, N$ ).

Із тугоплавких сполук титану та цирконію становлять інтерес бориди завдяки їх підвищеній твердості. Близькість коефіцієнта лінійного теплового розширення титану та боридних фаз ( $TiB_2$  та  $ZrB_2$ ) дасть змогу уникнути напружень на межі покриття—підкладка при підвищених температурах:  $\alpha_{Ti} = 9,2 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ ,  $\alpha_{TiB_2} = 4,8 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ ,  $\alpha_{ZrB_2} = 5,9 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ ,  $\alpha_{AlN} = 5,98 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ . При цьому менша різниця в величині  $\alpha$  для  $Ti$  та  $ZrB_2$  ( $3,3 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ ),  $Ti$  та  $AlN$  ( $3,2 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ ), порівняно з  $Ti$  та  $TiB_2$  ( $4,4 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ ), дає змогу віддати перевагу дибориду цирконію та нітриду алюмінію.

У складі покриттів високою зносостійкістю відрізняються також композиційні матеріали на основі карбиду вольфраму  $WC$  і карбиду хрому  $Cr_2C_3$ .

У зв'язку з вищезазначеними принципами для дослідження формування зносостійких покриттів на титанових сплавах методом ЕІЛ вибрані композиції на основі  $ZrB_2$ ,  $AlN$ ,  $TiN$ ,  $WC$  і  $Cr_2C_3$  з таких систем:

1. ЦБСАН ( $AlN - ZrB_2$  на основі  $AlN$ ).
2. ЦЛАБ — 2 ( $ZrB_2 - ZrSi_2$  на основі  $ZrBr_2$  з домішкою  $LaB_6$ ).

3. ЦЛАБ — 3 ( $ZrB_2 - ZrSi_2$  на основі  $ZrB_2$  з домішкою  $SiC$ ).

4. ТАН ( $TiN - AlN$  (1:1)).

5. КХНТ — НХ ( $TiN - Cr_2C_3$ ) +  $NiCr$ .

6. Шарувате покриття ЦЛАБ — 2 / ЦЛАБ — 2 +  $NiCr$  / НИАТ — 5 / ЦЛАБ — 2 +  $NiCr$  / НИАТ — титановий сплав.

7. ВКЗ (сплав становить 97 масову частку %  $WC$  + 3 масову частку %  $Co$ ).

Електродні матеріали систем ЦБСАН, ЦЛАБ — 2, ЦЛАБ — 3, ТАН, КХНТ — НХ розроблені Інститутом проблем матеріалознавства НАН України.

Шарувате розкриття отримували при пошаровому легуванні матеріалами ЦЛАБ — 2, ЦЛАБ — 2 +  $NiCr$  і металевими сплавами 11X15H25M6AG2- (НИАТ-5) системи  $Fe - Ni - Cr$ .

Покриття наносили на зразки із титанового сплаву ВТЗ-1 з використанням установки електроіскрового легування «Елітрон»-21, у режимі: струм короткого замикання  $I_{кз} \leq 1A$ , частота вібрації електроду  $f = 1200\text{ Гц}$ , енергія імпульсу  $E_{имп.} = 0,08\text{ Дж}$ , час обробки  $t = 2 - 7\text{ хв/см}^2$ .

Такий режим обробки забезпечує для всіх досліджуваних електродних матеріалів сталість процесу масоперенесення матеріалу електрода на поверхню підкладки, що проявляється у збільшенні товщини нарощуваного покриття в часі.

Зразки з покриттями випробували на фретинг-корозію під час тертя без мастильного матеріалу на повітрі в системі однойменних пар «покриття—покриття» і в парі «покриття—сталь 45» при таких параметрах віброконтактного навантаження:

- амплітуда відносного віброконтактного ковзання  $A - 87\text{ мкм}$ ;
  - частота коливань  $\nu - 25\text{ Гц}$ ;
  - питома контактне навантаження  $P - 19,8\text{ МПа}$ ;
  - кількість циклів віброколивань  $N - 5 \cdot 10^5\text{ цикл}$ .
- Результати випробувань зразків з досліджуваними варіантами покриттів подано на рис 1.1, 1.2.

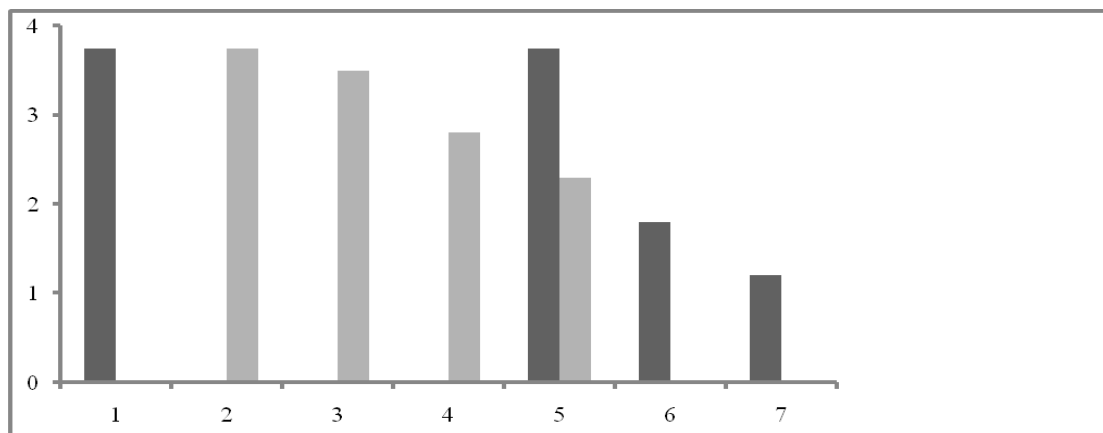


Рис. 1. Гістограма зносу ЕІЛ-покриттів в умовах фретинг-корозії без змащування для пари тертя «покриття—покриття»: ■ — структурно-однорідні покриття; ■ — глобулярні покриття

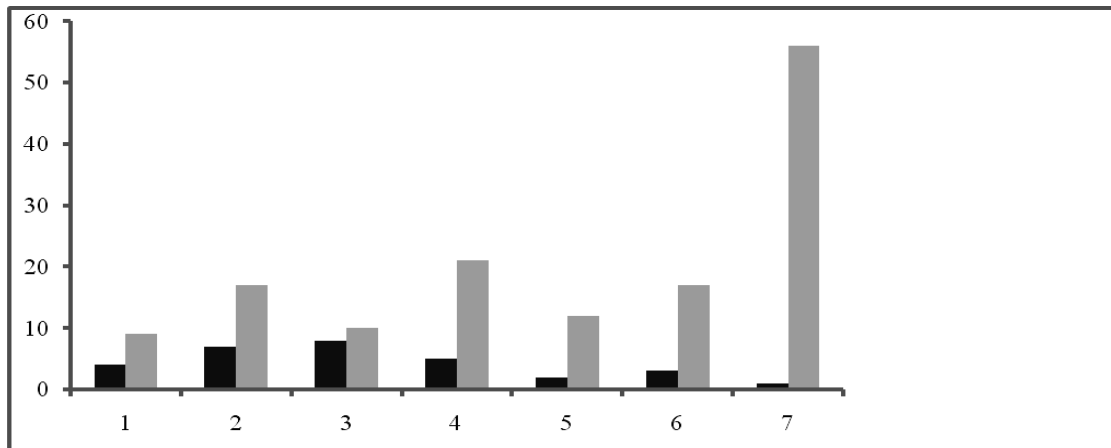


Рис. 2. Гістограма зносу ЕІЛ-покриттів в умовах фретинг-корозії без змащування для пари тертя «покриття—сталь 45»: ■ — ЕІЛ-покриття; ■ — сталь 45 (контртіло)

## Висновок

Обґрунтовано вибір матеріалів для нанесення функціональних покриттів на титанові й алюмінієві сплави. Доведено, що перспективними матеріалами для формування зносостійких покриттів методом електроіскрового легування є композиційні керамічні матеріали на основі дибориду цирконію  $ZrB_2$ , і нітриду алюмінію  $AlN$ .

На підставі триботехнічних досліджень встановлено істотне підвищення зносостійкості титанових сплавів завдяки нанесенню електроіскрових композиційних покриттів в умовах фретинг-корозії. Електроіскрові покриття на титановому сплаві ВТЗ-1 із композиційної кераміки на основі тугоплавких сполук титану і цирконію забезпечують під час тертя без мастильного матеріалу збільшення зносостійкості в 1,6—3 рази порівняно з покриттями із карбидовольфрамового твердого сплаву. Перспективним способом підвищення зносостійкості і товщини таких покриттів (з метою відновлення деталей) є пошарове електроіскрове легування, яке передбачає перемежування м'якої (металевий сплав) і твердої (керамічний композиційний матеріал) фаз в структурі покриття.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Трофимов В. А. Особенности применения высококоррозионных материалов в самолетных конструкциях АН / В. А. Трофимов, И. Г. Лавренко, Е. Т. Василевский и др. // Технологические системы. — 2006. — № 4. — С. 38—47.
2. Трофимов В. А. Обеспечение надежности и долговечности подвижных соединений шасси, выполненных из титановых сплавов / В. А. Трофимов, В. М. Борецкий // Технологические системы. — 2002. — № 5. — С. 56—65.
3. Богуслав А. В. Особенности разрушения межпазовых выступов дисков из титановых сплавов компрессоров ГТД при их эксплуатации / А. В. Богуслав,

А. Я. Качан, Д. А. Долматов, В. А. Малютин // Технологические системы. — 2003. — № 3. — С. 38—41.

4. Носовский И. Г. О механизме схватывания металлов при трении / И. Г. Носовский // Трение и износ. — 1993. — Т. 14. — № 4. — С. 19—24.

5. Духота О. І., Кіндрачук М. В., Лабунець В. Ф. Проблемні питання використання титанових сплавів в вузлах тертя авіаційної техніки // проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. — К. : НАУ, 2008. — Вип. 49. — Т. 1. — С. 14—26.

6. Федірко В. М. Формування на титані функціональних покриттів на основі сполук втілення за термодифузійного насичення / В. М. Федірко, І. М. Погрелюк, О. І. Яськів // Фізико-хімічна механіка матеріалів. — 2006. — Т. 42. — № 3. — С. 5—16.

7. Кубашевский О. Окисление металлов и сплавов / О. Кубашевский, Б. Гипкинс. — М. : Иностранная литература, 1995. — 311 с.

8. Подчерняева И. А. Износостойкие слоистые электроискровые покрытия на основе  $ZrB_2$  / И. А. Подчерняева, О. Н. Григорьев, В. Н. Субботин и др., // Порошковая металлургия. — 2004. — № 7/8. — С. 77—81.

9. Подчерняева И. А. Структурообразование и массоперенос износостойких покрытий при электроискровом легировании Al-Si-сплавов композиционной керамикой  $LaB_6-ZrB_2$  / И. А. Подчерняева, А. Д. Панасюк, С. С. Затуловский и др., // Сверхтвердые материалы. — 2003. — № 6. — С. 50—59.

