

УДК 621.891

О. В. ТІСОВ<sup>1</sup>, А. О. КОРНІЄНКО<sup>1</sup>, А. О. ЮРЧУК<sup>1</sup>, Н. О. НАУМЕНКО<sup>2</sup>,  
І. В. КОСТЕЦЬКИЙ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний авіаційний університет, Україна

<sup>2</sup>ДП "ДЕРЖАВТОТРАНСНДІПРОЕКТ", Україна

## ОГЛЯД РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ІНЖЕНЕРІЇ ПОВЕРХНІ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ ТІ-6АL-4V

У роботі проведено огляд досліджень щодо підвищення зносостійкості двофазного титанового сплаву Ti-6Al-4V, аналогом якого є вітчизняний сплав ВТ6. Дослідження виконувалися для різних умов тертя – палець по диску, точкових контактів, фретингу. Визначено, що попередня детонаційна імпульсна обробка пристосовує поверхню сплаву до хіміко-термічної обробки, унаслідок чого вдається суттєво збільшити товщину азотованого шару та покращити зносостійкість матеріалу. Лазерна імпульсна обробка має позитивний вплив на витривалість сплаву в умовах фретинг-втоми – понад 5 разів у порівнянні з базовим зразком. Встановлено, що ряд покриттів не тільки підвищують зносостійкість, але можуть одночасно знижувати коефіцієнт тертя (багатошарове PVD WC/C покриття). Для покращення адгезії, варто обирати системи, у яких різниця механічних характеристик (зокрема, модуля пружності) буде мінімальною. Важливим є нанесення проміжного підшару між матеріалом основи і покриттями, нанесених методами PVD і CVD. Такий підшар покращує адгезію покриття до основи, збільшує працездатність покриття. Покриття сплаву Ti-6Al-4V шаром вуглецю методом іонної імплантації теж суттєво покращує його трибологічні властивості – коефіцієнт тертя вдалося знизити до 0,12-0,14, а зношування контртіла було більше ніж у 10 разів меншим, порівняно із необробленим сплавом. В умовах удару з проковзуванням найкращі властивості мало вуглецеве покриття, нанесене методом іонної імплантації. Також, відмінні результати було отримано при дослідженні сплаву, покритого гідрогенізованим аморфним вуглецем. Отримані покриття мали товщину понад 5 мкм. Для покриттів, нанесених різними методами, було визначено критичне навантаження переходу від нормального до катастрофічного зношування. Найвище отримане значення – 80Н для покриття з CrN підшаром, тоді як для покриттів без підшару – 45Н.

**Ключові слова:** титан, титановий сплав, властивості, Ti-6Al-4V., ВТ6, зносостійкість, покриття

**Вступ.** Авіаційна промисловість є одним із найбільших споживачів титанових сплавів у світі. Сучасні тенденції розвитку авіаційного матеріалознавства полягають у все ширшому використанні композиційних матеріалів, у тому числі і металовмісних шаруватих конструкцій, стільникових конструкцій. У той час, як частка алюмінію у сухій масі знизилась (для прикладу, літак Boeing 787 Dreamliner, [1]) із понад 70 % до 20%, то частка титану складає 15%. Якщо раніше титанові сплави переважно застосовувались для виготовлення силового набору планера, лопаток вентилятора і компресора ГТД, то тепер вони застосовуються для виробництва стійок шасі, елементів механізації крила, частин гідро-системи; тобто для виготовлення елементів вузлів тертя. Тому, важливо мати уявлення і знати методи захисту цих сплавів від зношування. У цій роботі автори виконали огляд зарубіжних наукових видань і встановили основні способи підвищення зносостійкості титанового сплаву двофазного Ti-6Al-4V (вітчизняний аналог – ВТ6).

**Обговорення.** У роботі [2] автори досліджують вплив одношарових CrN і CrN/NbN і багатшарових WC/C нанесених за допомогою PVD технології. Матеріал основи був термооброблений до твердості 35 HRC. Вибір цього методу вони аргументують нижчою температурою процесу і зниженим тепловим впливом на матеріал основи, що дуже важливо для двофазного титанового сплаву. Зносостійкість досліджувалась в умовах точкового контакту за схемою куля-площина до моменту повного зношування нанесеного шару. Температура – кімнатна, атмосфера – лабораторне повітря, швидкість ковзання – 0,3 м/с, навантаження 30 – 60 Н з приростом 10 Н, що дозволяло отримати питомий тиск у Герцівському контакті від 95 до 125 МПа.

Супергратка CrN/NbN показує найвищі значення H (28 GPa) та E (340 GPa), завдяки своїй нанорозмірній багатшаровій структурі. Проміжні значення H і E (26 і 316 GPa, відповідно) були для CrN одношарових покриттів: ці значення порівнянні (у випадку з E) або трохи вищі. Найменші значення H та E показали покриття WC/C (12 і 136 GPa, відповідно). Для цього багатшарового покриття, виміряні значення залежать від складу і товщини шарів, але також і склад від верхнього шару. Зокрема, твердість покриттів з верхнім шаром WC майже на 30% вище, ніж у покриттів з вуглецевим поверхневим шаром. І навпаки, вуглецеві верхні шари покриттів показати значення модуля приблизно на 10% вище, ніж WC.

За результатами трибологічних досліджень було встановлено, що нанесені покриття покращують зносостійкість титанового сплаву Ti-6Al-4V. Критичне навантаження, яке відповідає повному зношуванню життя покриття, було встановлено для кожного випадку окремо. Найвищим критичне навантаження було для одношарового CrN і для багатшарових WC/C покриттів. Однак, невисокі механічні властивості матеріалу основи не дають у повній мірі проявитись властивостям покриттів. Із результатів дослідження випливає, що тільки багатшарове покриття WC/C підвищує зносостійкість, і знижує коефіцієнт тертя одночасно.

В [3] серію вуглецевих покриттів з різною твердістю та модулем пружності досліджували в умовах зношування, використовуючи різнойменні пари тертя (сплав Ti-6Al-4V з вуглецевим покриттям, яке наносилось на одну сторону зразка), випробовувались в умовах удару з проковзуванням. Покриття наносились різними способами – PVD, PE-CVD, магнетронне розпилення, метод іонної імплантації

Контртілом служив базовий сплав у стані постачання. Схема випробувань – палець по диску. Швидкість обертання – 2000 об/хв. Пружинна підвіска диска і пальця дозволяли періодично розмикати контакт і замикати його знову, створюючи таким чином ударне навантаження.

Результати дослідження засвідчили що всі вуглецеві покриття покращують трибологічні характеристики титанового сплаву Ti-6Al-4V. Однак, варто зазначити, що зношування необробленого контртіла значно зросло, порівняно із базовою однойменною (Ti-6Al-4V по Ti-6Al-4V) парою. Під час тертя спостерігалось часткове відшарування вуглецевого покриття, що автори пояснюють зниженням його адгезії до основи. Найкращих результатів вдалося досягти при мінімальній різниці механічних характеристик покриття і основи, коли покриття наносили методом іонної імплантації. Також, ці покриття характеризуються невисоким коефіцієнтом тертя – 0,12-0,14, тоді як коефіцієнт тертя PVD-покриття сягав 0,4-0,45. Об'ємне зношування титанового контртіла для першого покриття склало менше 0,05 мм<sup>3</sup>, тоді як для другого понад 0,5 мм<sup>3</sup>.

У цій роботі [4] автори дослідили вплив на трибологічні характеристики титанового сплаву Ti-6Al-4V комбінованого покриття системи Cu–Al в умовах фретинг-зношування і фретинг-втоми. Зразки титану оброблялись на твердий розчин протягом 105 хв за температури 935 °С, а потім – штучно зістарювались протягом 2 год. за температури 705 °С з подальшим охолодженням в аргоні. Cu–Al покриття наносилось методом плазмового напилення, середня товщина покриття складала 40 мкм. Склад покриття – 87-90% міді, 9-11% алюмінію, решта – домішки заліза (0,7-1,5%)

Дослідження проводили в умовах чистого фретингу і фретинг-втоми з максимальним втомним навантаженням у широкому діапазоні навантажень – до 300 МПа. Також, змінювали площу ділянки контакту. Менша ділянка утворювалась за допомогою накладки з радіусом 0,3 мм, для більшої використовували накладку радіусом 5,08 мм. Пошкодження поверхні оцінювалось за величиною дисипованої енергії.

Було виявлено лінійний зв'язок між накопиченою енергією розсіювання та обсягом зносу. Ця залежність не залежить від умов навантаження зразка з меншим розміром контакту. Проте це лінійне співвідношення було залежне від умови навантаження коли використовували зразки з великою площею контакту. Це вказувало на те, що для утворення продуктів зношування була необхідна більша енергія. Форми фретингових петель також були залежними від загального розміру контакту та умови завантаження на зразок. Без втомного навантаження на зразок, петлі були або еліптичними (режим часткового ковзання), або квазі-прямокутними (режим повного ковзання) для менших і більших розмірів контактів. Однак форма петлі змінюється на овальну і гострокутну для зразків з більшим розміром контакту, якщо до зразків прикладається втомне навантаження. Також, було встановлено лінійну залежність між приведеним лінійним зношуванням і дисипованою енергією, а також те, що ця залежність не залежить від режиму фретингу для даної площадки контакту.

С. Martini з колегами [5] дослідили властивості гідрогенізованого аморфного вуглецю в умовах сухого тертя ковзання. Вони нанесли покриття з використанням технології PA-PVD трьома способами: (1) стандартним методом, (2) методом, що дозволяє наносити покриття в отворах, і (3) з CrN підшаром, що був нанесений методом PVD. Товщина покриттів: 2-5,3 мкм. Було визначено мікроемеханічні характеристики, адгезію і зносостійкість покриттів.

Матеріал основи був термооброблений за режимом: відпал, 900 °С протягом 30 хв, старіння за температури 515935 °С протягом 8,5 год. Трибологічні характеристики досліджували за схемою вал-площина з лінійним контактом. Контролю (вал) – сталь SAE 52100. Навантаження – 5-95 Н, швидкість ковзання – 0,3 м/с, шлях тертя – 1 км.

Дослідженнями встановлено критичне навантаження для кожного з покриттів (навантаження, коли відбувається перехід від нормального до катастрофічного зношування): для (1) це 45Н, для (2) це 55Н і для покриття з підшаром – 80Н. Покриття (2) було найменш щільним і мало меншу адгезію порівняно із стандартним (1). Тим не менше, це покриття було на 50% твердішим і на 30% більш жорстким порівняно із покриттям (1), що забезпечило йому високі антифрикційні властивості; високу зносостійкість за низьких питомих навантажень. Однак, на закритичних режимах (понад 55 Н) таке покриття втрачає працездатність. Автори також вкотре довели, що проміжні шари між основою і покриттям відіграють ключову роль у підвищенні вантажності і зносостійкості.

S. Taktak, H. Akbulut [6] досліджували зносостійкість і зазначеного сплаву, який азотували у плазмовому середовищі після детонаційного імпульсного зміцнення (explosive shock treatment). Азотування проводили за трьох різних температур – 700, 800 і 900 °С протягом 3, 6, 9 і 12 годин. Товщина азотованого шару – 5,5-9,3 мкм. Азотування при температурі вище, за температуру поліморфного перетворення дозволило отримати поверхневий шар  $\alpha$ -фази і шар твердого розчину азоту в сплаві. Зростання температури нанесення до 900 °С протягом 12 год. дозволило отримати поверхневу твердість 2500 HV<sub>0.05</sub>, тоді як за температури 700 °С отримали твердість 1714 HV<sub>0.05</sub>. Дослідження топографії і структури азотованого шару до випробувань засвідчили зростання шорсткості поверхні із зростанням температури азотування.

Трибологічні дослідження проводили в умовах сухого тертя за схемою диска-куля (точковий контакт). Контртіло – куля з твердого (WC-Co) сплаву діаметром 4,6 мм. Навантаження – 2,5-12,5Н, швидкість ковзання – 0,1 м/с.

Результати дослідження свідчать, що азотування суттєво підвищує зносостійкість титанового сплаву Ti-6Al-4V. Детонаційна імпульсна обробка змінює структуру поверхневого шару матеріалу, покращує і пришвидшує дифузію азоту, дозволяє отримати покриття більшої товщини. Таким чином, порівняно із матеріалом без детонаційної обробки, зносостійкість сплаву буде вищою за рахунок більшої твердості і товщини. Коефіцієнт тертя покриття, отриманого за температури 900 °С знаходився в межах 0,17-0,22. Після повного зношування покриття він піднімався до 0,46. Проведення детонаційного зміцнення перед азотуванням привело до більш ніж двократного зниження зносу сплаву. Головним механізмом зношування такого покриття в парі з твердим сплавом – переважно втомно-абразивне зношування.

У своїй роботі, S. Srinivasan із співробітниками [7] досліджували фретинг-втомні характеристики титанового сплаву Ti-6Al-4V після імпульсної лазерної обробки. В якості матеріалу використано титан в стані постачання, без додаткової термічної обробки. Схема контакту під час випробування обиралась таким чином, щоб максимально відтворити умови взаємодії в замковому сполученні лопатка – диск. Плоский зразок приводився в контакт з пальцем діаметром 0,12' (3,048 мм). Навантаження в контакті – 1000-1661 МПа. Результати засвідчили зростання часу випробувань оброблених зразків більше ніж у 5 разів.

#### Список літератури

1. <http://www.modernairliners.com/boeing-787-dreamliner/boeing-787-dreamliner-specs/>
2. C. Martini, L. Ceschini A. Comparative study of the tribological behaviour of PVD coatings on the Ti-6Al-4V alloy. Tribology International 44 (2011) 297–308.
3. Naoki Fujisawa, Michael V. Swain, Natalie L. James, John C. Woodard, Richard N. Tarrant, David R. McKenzie. Carbon coating of Ti-6Al-4V for reduced wear in combined impact and sliding applications. Tribology International 36 (2003), 873–882
4. Hyukjae Lee, Shankar Mall, Jeffrey H. Sanders, Shashi K. Sharma, Russell S. Magaziner. Characterization of fretting wear behavior of Cu–Al coating on Ti–6Al–4V substrate. Tribology International, 40 (2007), 1301-1310
5. C. Martini, L. Ceschini, B. Casadei, I. Boromei, J.B. Guion. Dry sliding behaviour of hydrogenated amorphous carbon (a-C:H) coatings on Ti-6Al-4V. Wear 271 (2011) 2025–2036.
6. S. Taktak, H. Akbulut. Dry wear and friction behaviour of plasma nitrided Ti–6Al–4V alloy after explosive shock treatment. Tribology International 40 (2007) 423–432
7. S. Srinivasan, D.B. Garcia, M.C. Gean, H. Murthy, T.N. Farris. Fretting fatigue of laser shock peened Ti–6Al–4V. Tribology International 42 (2009) 1324–1329.

Стаття надійшла до редакції 02.10.2018.

*O. V. TISOV, A. O. KORNIENKO, A. O. YURCHUK, N. O. NAUMENKO, I. V. KOSTETSKY*

## **A REVIEW OF STUDIES OF TITANIUM ALLOY Ti-6Al-4V SURFACE ENGINEERING METHODS**

The paper reviews researches on increasing the wear resistance of double-phase titanium alloy Ti-6Al-4V. The researches were carried out for various friction conditions – pin-on-disk, point contacts, fretting wear etc. It has been determined that the preliminary explosive shock treatment adapts the surface of alloy to the chemical-thermal treatment, which can significantly increase the thickness of the nitrated layer and improve the wear resistance of the material. Laser pulse pinning has a positive effect on the endurance of the alloy in conditions of fretting-fatigue - more than 5 times compared with the basic material.

It has been established that a number of coatings not only increase wear resistance, but can simultaneously reduce the coefficient of friction (multilayer PVD WC/C coating). To improve adhesion, it is worth choosing systems in which the difference in mechanical characteristics (in particular, the modulus of elasticity) will be minimal.

It is important to apply an intermediate sublayer between base material and the coatings applied by PVD and CVD methods. Such a sublayer improves the adhesion of the coating to the substrate, increases the working capacity of the coating. The coating of Ti-6Al-4V alloy by carbon using ion implantation method also significantly improves its tribological properties - friction coefficient was reduced to 0.12-0.14, and wear loss of counterpart was more than 10 times less when compared with untreated alloy. Under conditions of impact with a slip, the best properties were demonstrated by carbon coating applied by ion implantation method. Also, excellent results were obtained in the study of an alloy coated with hydrogenated amorphous carbon. The resulting coatings were thicker than 5 microns. For coatings applied by different methods, critical load of transition from normal to catastrophic wear was determined. The highest value is 80N for coating with CrN sublayer, and for coating with no sublayer – 45n.

**Key words:** titanium, titanium alloy, properties, Ti-6Al-4V., VT6, wear resistance, coating

**Тісов Олександр Вікторович** — канд. техн. наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри машинознавства, докторант кафедри машинознавства Національного авіаційного університету. E-mail: [tisov@nau.edu.ua](mailto:tisov@nau.edu.ua)

**Корнієнко Анатолій Олександрович** – канд. техн. наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри машинознавства Національного авіаційного університету. E-mail: [nau12@ukr.net](mailto:nau12@ukr.net)

**Юрчук Аліна Олександрівна** – канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Національного авіаційного університету.

**Науменко Ніла Олександрівна** – науковий співробітник ДП "ДЕРЖАВТОТРАНС-НДІПРОЕКТ".

**Костецький Іван Володимирович** – студент Національного авіаційного університету.