

УДК 621:785.53

Канд. техн. наук Л. П. Степанова, д-р техн. наук В. Ю. Ольшанецький,
канд. техн. наук Г. В. Пухальська

Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя

ПРО СТВОРЕННЯ СПРИЯТЛИВОЇ КРИСТАЛОГЕОМЕТРІЇ ПОКРИТТІВ ТiN НА АВІАЦІЙНИХ ЛОПАТКАХ З ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ

Розглянуто способи обробки титанових лопаток (сплав ВТ8) компресорів газотурбінних авіадвигунів для зміни структури нанесених порошкових покриттів (TiN) з метою отримання сприятливої кристалогеоетрії поверхневих зон, що забезпечує суттєве підвищення механічних властивостей та експлуатаційних характеристик кінцевих виробів.

Ключові слова: титановий сплав, методи обробки, адгезія, кристалогеоетрія, властивості.

Як свідчить досвід експлуатації деталей авіаційної техніки (передусім гелікоптерів) несуча здатність лопаток компресорів низького тиску, виготовлених зі сплавів титану типу ВТ8М, залежить від загального стану їх поверхневих шарів, який можна суттєво поліпшити шляхом створення спеціального покриття та використання поверхневого деформаційного зміцнення [1]. Створення на деталях тонкоплівкових зносостійких покриттів із застосуванням вакуум-плазмових технологій отримало значне розповсюдження, особливо для високонавантажених лопаток, що працюють за умов знакозмінних навантажень.

Властивості і працездатність плазмових покриттів суттєво залежать від залишкових напружень, які виникають у процесі їх створення і на які впливають різні структурні та енергетичні фактори. Тому цьому питанню у статті приділено особливу увагу.

Нітридтитанові покриття створювали на лопатках зі сплаву ВТ8М за спеціальною технологією. Сутність методу полягала в розпиленні металу у вакуумі в середовищі реакційного газу, що приводило до конденсації газометалевої плазми на оброблюваній поверхні деталі (метод КІБ). Використовуючи азот як реакційний газ, отримували певного типу нітриди.

Високий ступінь іонізації плазмових потоків сприяє утворенню тугоплавких титанових з'єднань при порівняно низькій температурі (300...600 °С) оброблюваної поверхні деталі, що дозволяє створювати покриття на різних матеріалах, не змінюючи їх первинні фізико-хімічні властивості.

Подальше спеціальне ультразвукове зміцнення (УЗЗ) лопаток кульками певного розміру здійснювали за серійною технологією. Фінішною операцією для пера лопатки було віброполірування (ВП).

Вивчення впливу зміцнювальних обробок на структурні зміни в поверхневих шарах лопаток проводили за допомогою рентгеноструктурного аналізу в мідному випромінюванні на дифрактометрі типу ДРОН. Монохроматизацію дифракційних променів здійснювали за допомогою кварцового монохроматора, встановленого перед сцинтиляційним лічильником, що забезпечувало як фільтрацію β -випромінювання, так і істотне зменшення фону від зразка. Реєстрацію дифрактограм і обробку експериментальних даних проводили з використанням комп'ютера, сполученого з дифрактометром за допомогою спеціального пристрою. Дифрактограми знімали у повному діапазоні кутів відбиття в інтервалі $11 \dots 80^\circ$. Зйомку здійснювали з поверхні вихідної кромки і спинки у плоских ділянках пера лопатки.

Фазовий склад структури поверхневого шару проводили за стандартною методикою [2] шляхом порівняння експериментальних значень міжплощинних відстаней d_{HKL} із довідковими даними [3].

Інтенсивності ліній 111 і 200 для ГЦК ґратки нітриду титану (TiN) на дифрактограмах зразків значно відрізнялися залежно від виду зміцнювальної обробки, що свідчило про певну кристалографічну орієнтацію зерен у покриттях зі сполуки TiN. Для кількісної оцінки ступеня текстурованості й виявлення компонент текстури було обрано параметр P , який характеризував відношення інтенсивності дифракційної лінії 111 до інтенсивності лінії 200 ($P = I_{111}/I_{200}$). Аналогічний параметр був застосований і для зразка з нетекстурованою фазою TiN. Такий зразок був отриманий методом подрібнювання шару покриття TiN у порошок (при цьому фактично досягалося хаотичне розташування зерен TiN). Параметр P для нетекстурованого зразка дорівнював 0,55, що досить добре узгоджувалося із відомими значеннями інтенсивності дифракційних відбиттів для фази TiN [3]. Перевищення значень параметра P для експериментальних зразків при знятті покриття безпо-

*Зразки надані Лук'яненко О.Л. (АТ «Мотор Січ»)

середньо з лопатки, порівняно зі значенням 0,55, свідчило про формування текстури, при якій паралельно поверхні лопатки переважно розташовувалися зерна, орієнтовані площинами (111).

Для виявлення механізму формування найбільш сприятливої текстури покриття TiN, залежно від послідовності й поєднання зміцнювальних обробок (віброполірування (ВП), ультразвукове зміцнення (УЗЗ та КІБ)), визначали параметр $\varepsilon = I_{004}/I_{110}$, де у чисельнику I_{004} – інтенсивність дифракційної лінії 004, як відбиток від кристалографічних базисних площин (0001) гексагональної щільнопакованої ґратки α' - фази, а у знаменнику I_{110} – інтенсивність променів, відбитих від площин призматичного типу (1120) тієї ж ґратки. Параметр ε якісно характеризує кристалографічну орієнтацію зерен α' - фази, що виникає при виготовленні лопаток, а також її зміні у процесі різних обробок.

Надійність використання параметра ε підтверджується його низьким значенням (0,42) для порошкового нетекстурованого матеріалу лопатки. Збільшення параметра порівняно зі значенням 0,42 свідчить про те, що зерна α' - фази в об'ємі поверхневого шару лопатки орієнтовані відносно її поверхні переважно площинами (0001). Треба додати, що методику оцінки текстури в поверхневому шарі лопаток у процесі їхнього виготовлення вперше було описано в роботі [4], яка дещо відрізнялася при оцінці компонента текстури (0001) в цьому дослідженні.

Проведено також порівняльне вивчення характеристик структури поверхневого шару лопаток після віброполірування (ВП), а також ультразвукової обробки кульками (УЗЗ) з наступним або попереднім нанесенням покриттів TiN.

Аналіз дифрактограм зразків лопаток з нанесеними покриттями показав, що, крім ліній α' і β - фаз титану, в ньому наявні ще і лінії фази нітриду титану TiN з ГЦК ґраткою (просторова група Fm3m). Обрані для аналізу лінії 111 і 200 мали різну інтенсивність, що свідчило про наявність різного ступеня текстурованості покриття.

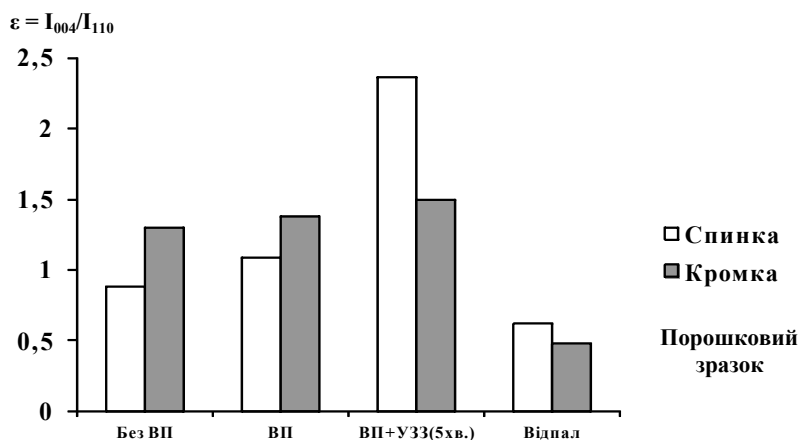


Рис. 1. Залежність параметра ε , що характеризує текстурованість α' - фази, від різних видів обробки і досліджуваних ділянок пера лопатки

Були визначені інтенсивності обраних ліній для α' - фази і хімічної сполуки TiN відповідно після кожного виду обробки для спинки й кромки, а також розраховано параметри ε , що характеризує текстуру α' - фази, і P для виявлення текстури покриття TiN. Розрахункові значення цих параметрів наведено в табл. 1 і 2.

Таблиця 1 – Значення параметра ε , що характеризує текстурованість α' - фази для різних способів зміцнення і досліджуваних ділянок пера лопаток

Спосіб обробки	Параметр $\varepsilon = I_{004}/I_{110}$	
	спинка	кромка
Без ВП	0,88	1,30
ВП	1,09	1,38
ВП+УЗЗ (5хв)	2,36	1,50
ВП+УЗЗ (10хв)	2,00	1,6
ВП, 950 °- відпалення	0,62	0,48
КІБ	0,78	1,27
ВП+КІБ	0,81	1,29
ВП+УЗЗ (5хв)+КІБ	2,22	1,62
ВП+УЗЗ (10хв)+КІБ	1,92	1,80
ВП+КІБ+УЗЗ (5хв)	1,79	1,54

Таблиця 2 – Значення параметра P , що характеризує текстурованість покриття TiN для різних видів обробки й досліджуваних ділянок пера лопаток

Спосіб обробки	Параметр $P = I_{111}/I_{200}$	
	спинка	кромка
КІБ (без ВП)	6,2	3,2
ВП+КІБ	11,4	6,6
ВП+УЗЗ (5хв)+КІБ	17,4	12,6
ВП+УЗЗ (10хв)+КІБ	14,6	13,2
ВП+КІБ+УЗЗ (5хв)	13,0	10,3

Як показав аналіз (рис. 1, табл. 1), при обробці УЗЗ деформація в поверхневому шарі сприяла збільшенню кількості зерен α' - фази, орієнтованих відносно поверхні лопатки базисною площиною (0001). Після УЗЗ параметр ε для спинки становив 2,36 і 2,0, тоді як після віброполірування без обробки УЗЗ він дорівнював 1,09.

Обробка УЗЗ лопаток з покриттями приводить до збільшення кількості зерен, орієнтованих базисною площиною відносно їх поверхонь, але істотно менше, ніж попередня обробка УЗЗ до процесу покриття. При обробці ВП+КІБ для спинки її параметр ε дорівнював 0,81; для обробок ВП+КІБ+УЗЗ(5хв) і ВП+УЗЗ(5 хв)+КІБ відповідно 1,79 і 2,22 (рис. 2). Слід зазначити, що насичення твердого розчину α' - фази атомами азоту частково блокує розвиток процесів деформації у поверхне-

вих зонах лопаток, оскільки у цьому випадку збільшується частка зерен, орієнтованих площинами призматичного типу (1120), і цей факт збігається з літератури [7].

Аналіз текстури покриття показав істотний збіг на пряму зміни значень параметра P для покриття (рис. 3, табл. 2) і параметра ε для α' - фази (рис. 2, табл. 1).

Встановлено, що збільшення параметра P для спинки і кромки лопатки відбувається як у випадку попередньої обробки УЗЗ до нанесення покриття, так і при обробці УЗЗ після утворення покриттів. Відзначимо надзвичайно важливий факт, який свідчить про те, що при такій послідовності комплексної обробки спостерігається підвищення кількості зерен з базисною орієнтацією (0001) у поверхневих зонах виробів.

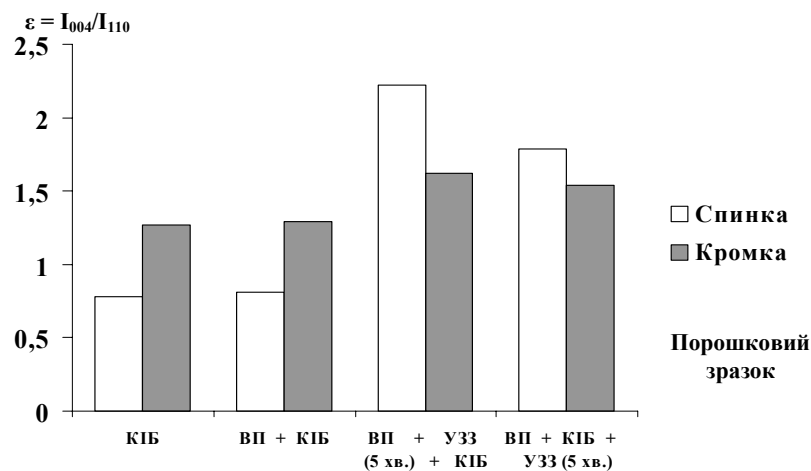


Рис. 2. Залежність параметра ε , що характеризує текстурованість α' -фази від різних видів обробки й досліджуваних ділянок пера лопатки із покриттям TiN

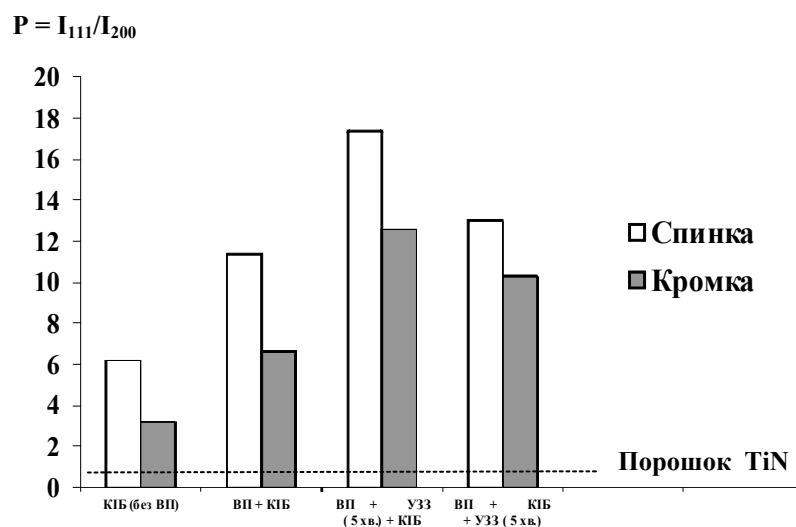


Рис. 3. Значення параметра P , що характеризує текстурованість покриття TiN від різних видів обробки й досліджуваних ділянок пера лопатки

Отримані результати можна пояснити з огляду на такі міркування. Відомо [8], що залежно від типу кристалічної ґратки переважну швидкість росту мають площини з найбільшою ретикулярною густиною, до яких належить і площина (111) ГЦК ґратки нітриду титану. Величина параметра P , отриманого для нетекстурованого нітридного покриття, знятого з поверхні лопатки й подрібненого в порошок, дорівнює 0,55 (на рис. 3 пунктирна лінія).

Істотне збільшення значень параметра P для всіх зразків порівняно з величиною 0,55 свідчить про переважну паралельну орієнтацію зерен титану (0001) відносно контактної площини (111) у покритті зерна, що повинно сприятливо впливати на зносостійкість матеріалу, оскільки площини типу (111) і (0001) є найбільш щільнопакованими. Збільшення загальної кількості зерен обох фаз із такою орієнтацією є значно суттєвішим (17,4 і 14,6) після попередньої обробки УЗЗ протягом відповідно 5 і 10 хвилин (табл. 2).

Виникнення сприятливої текстури нітридного покриття буде також визначатися найбільш переважним орієнтаційним узгодженням кристалічних ґраток підкладки (титану) й покриття [9]. Близькі характеристики структури в цьому плані мають площини типу (111) ГЦК ґратки нітриду титану й базисної площини (0001) ГЦП ґратки α' - фази (рис. 4). Отже, якщо на поверхні лопатки, як на підкладці, більшість зерен орієнтована базисною площиною (0001), то міжфазна границя між покриттям і поверхнею лопатки, очевидно, буде наближатися до когерентної (найбільш значний рівень кристалогометричного зв'язку). Це забезпечує термодинамічно вигідне формування кристалів TiN і α' - фази з найбільш сприятливим їх взаємним орієнтуванням.

У термодинамічному сенсі зазначене явище відзначається необхідним співвідношенням енергетичних характеристик, які пов'язані з майже максимальною адгезією одного типу матеріалу з іншим. Мірою термодинамічного вирашу слугує залежність

$$\Delta\gamma_{\text{покр/матр}} = \gamma_{\text{матр}} + \gamma_{\text{покр}} - \gamma_{\text{покр/матр}} \quad (1)$$

Тут усі γ – поверхневі енергії відповідно чистим поверхням матриці (підкладки), покриття і міжфазної межі покриття-матриця (в нашому випадку, покриття це – TiN, а матриця – α' - фаза титанового матеріалу). При цьому треба також зазначити, що у цьому випадку слід розглядати тільки ефект сильної адгезії, який забезпечується наявністю сильної нерівності

$$\frac{\Delta\gamma_{\text{покр/матр}}}{\gamma_{\text{покр}}} \gg 2. \text{ Це безпосередньо впливає з таких}$$

співвідношень:

$$\gamma_{\text{матр}} = \gamma_{\text{покр/матр}} + \gamma_{\text{матр}} \cos \theta, \quad (2)$$

де θ – кут умовного змочування одним матеріалом (покриттям) і іншого (матриці), а також і відомого рівняння Дюпре

$$1 + \cos \theta = \frac{\Delta\gamma_{\text{покр/матр}}}{\gamma_{\text{покр}}}. \quad (3)$$

З проведених дослідів легко бачити, що кут θ майже дорівнює нулю, а це свідчить про реалізацію при створенні покриттів TiN на двофазному титановому сплаві типу ВТ8 після його певної обробки, міцних з'єднань епітаксимального виду, бо різниця між атомними відстанями у площинах з максимальною ретикулярною густиною є в цьому випадку винятково малою (рис. 4).

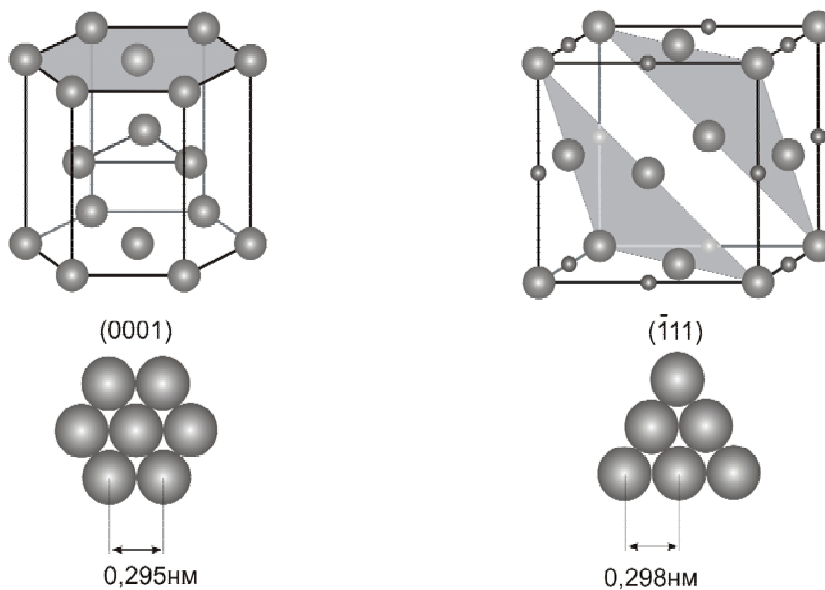


Рис. 4. Площини сполучення ґраток α' - фази і TiN

Низькі значення параметра $P_{6,2}$ для спинки й 3,2 – для кромки лопатки, які не піддавалися віброполіруванню, свідчать про те, що ефективність очищення поверхонь лопаток при бомбардуванні їх іонами титану трохи знижується через наявність макроушкоджень на поверхні, що, у свою чергу, зменшує міру текстурованості покриттів. Усунення віброполіруванням ушкоджень підвищує текстурованість покриття (обробка ВП+КІБ).

Відзначимо, що для всіх комплексних обробок частка зерен, орієнтованих площинами (111) паралельно поверхні спинки лопатки перевищує текстурованість покриття на кромках (можливо через менше очищення поверхні гострих кромки, а також розбіжності в характері текстури α' - фази).

У роботі [10] відзначається, що в процесі КІБ плазмохімічна реакція титану з азотом при утворенні нітриду титану відбувається переважно на поверхні виробів і тому ймовірність дифузії азоту в поверхневий шар лопатки є досить високою. Оскільки азот, відповідно до діаграми стану Ti-N, є α' - стабілізатором, то утворення твердого розчину впровадження азоту у гратку α' - фази завжди приводить до збільшення параметра гратки, що є характерним саме для твердих розчинів впровадження.

З метою підтвердження можливості дифузії азоту із утворенням твердого розчину впровадження були визначені періоди елементарної комірки α' - фази a і c при використанні ліній 110 α' і 004 α' . Розрахункові дані цього експерименту представлені в табл. 3.

Таблиця 3 – Періоди (параметри) елементарної комірки α' - фази після різних способів зміцнення для спинки пера лопаток

Спосіб зміцнення	Параметри елементарної комірки	
	c , нм	a , нм
Без ВП	0,4663	0,2929
ВП	0,4663	0,2931
ВП+КІБ	0,4660	0,2930
КІБ	0,4668	0,2932
ВП+УЗЗ (5 хв)	0,4663	0,2930
ВП+УЗЗ (10 хв)	0,4662	0,2932
ВП+УЗЗ (5хв)+КІБ	0,4674	0,2931
ВП+УЗЗ (10хв)+КІБ	0,4673	0,2933
ВП+КІБ+УЗЗ (5хв)	0,4679	0,2928

Виявлено істотну розбіжність у значеннях параметра c , (у той же час параметр a практично залишається незмінним), що не суперечить даним роботи [9], у якій спостерігали збільшення параметра c залежно від кількості азоту в титані.

Відомо, що азот у твердому розчині ГЦП- гратки займає позиції в тетраедричних і октаедричних порах. При цьому останні мають більший об'єм порівняно з тетраедричними і являють собою в напрямках [0001] суцільні сприятливі канали [6], чим і пояснюється збільшення параметра c для всіх зразків лопаток з нанесеними покриттями нітриду титану (табл. 3).

Параметр c на зразках з попередньою обробкою УЗЗ протягом 5 і 10 хвилин перед покриттям в порівнянні зі зразками без обробки УЗЗ є більшим, що пов'язано, ймовірно, зі збільшенням кількості зерен, орієнтованих площинами (0001) паралельно поверхням лопаток. Останнє підтверджується даними по визначенню фактора P , який характеризує зміну текстури. Так, при обробці УЗЗ протягом 5 хвилин, значення P збільшується до величини 2,36 у порівнянні з величиною 1,09 для цієї характеристики безпосередньо після віброполірування (табл. 1).

Якщо обробку УЗЗ проводили після нанесення покриття (ВП+КІБ+УЗЗ 5 хв), то значення параметра c становить відповідно 0,4679 нм, що перевищувало цю характеристику в тому випадку, коли обробка УЗЗ передувала процесу створення покриття.

Зміцнення твердого розчину внаслідок пошкодження кристалічної гратки, а також блокування атомами азоту дислокацій, підвищують залишкові напруження стиснення для варіанту послідовності обробок ВП+УЗЗ (5 хв) + КІБ. Слід зазначити, що наявність азоту у твердому розчині гратки α' - фази, як домішки впровадження, може приводити до появи деякої частки спрямованого ковалентного зв'язку [8], а це є також одним із факторів, які сприяють підвищенню міцності матеріалу.

Висновки

1. Встановлено, що покриття нітриду титану на лопатках текстуровані з переважною орієнтацією напрямку [111] відносно поверхні лопатки. Найкраще розмірне і структурне співвідношення спостерігається між площинами (111) ГЦК гратки нітриду титану та (0001) ГЦП гратки α' - фази титанового сплаву. Гратки TiN і α' -Ti є майже ідеальною епітаксимальною парою, що забезпечує мінімальну питому енергію міжфазної границі і суттєво підвищує рівень адгезії між контактними поверхнями фаз.

2. Сприятливі умови для росту зерен TiN створюються при попередній обробці УЗУ (5 хв), коли збільшується кількість зерен α' - фази в титановому сплаві, орієнтованих площинами (0001) відносно поверхні титанової лопатки.

Список літератури

1. Аппен А. А. Основные физико-химические принципы создания жаростойких неорганических покрытий / Аппен А. А. // Жаростойкие покрытия. – Л.; М. : Наука, 1965. – С. 3–54.
2. Русаков А. А. Рентгенография материалов / Русаков А. А. // М. : Атомиздат. – 1977. – 480 с.

3. Горелик С. С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ // Горелик С. С., Расторгуев Л. Н., Скаков Ю. А. – М. : Металлургия, 1979. – 366 с.
4. Влияние технологии изготовления и характер текстурованности лопаток ГДТ / [Жеманюк П. Д., Ольшанецкий В. Е., Степанова Л. П. и др.] // Металлознавство та обробка металів, 1998. – № 3. – С. 22–27.
5. У. Цвиккер Титан и его сплавы / У. Цвиккер. – М. : Металлургия, 1979. – 512 с.
6. Шаскольская М. П. Кристаллография / Шаскольская М. П. – М., 1976. – 391 с.
7. Бабад-Захрапин А. А. Текстурованные высокотемпературные покрытия / Бабад-Захрапин А. А., Кузнецов Г. Д. – М.: Атомиздат. – 176 с.
8. Коллингз Е. В. Физическое металловедение титановых сплавов / Коллингз Е. В. – М. : Металлургия, 1988. – 223 с.
9. Рудницький Н. М. До оцінки впливу залишкових напружень і зміцнення поверхневого шару на втомную міцність деталей / Рудницький Н. М. // Пробл. міцності, 1981. – № 10. – С. 27–34.
10. Нанесення зносостійких покриттів на швидкорізальний інструмент // [Внуков А. А., Марков Л. В., Лаврова Л. В., Бердишев Н. Ю]. –К. : Техника, 1992. – 143 с.

Одержано 09.12.2015

Степанова Л.П., Ольшанецкий В.Е., Пухальская Г.В. Об образовании благоприятной кристаллогеометрии покрытий TiN на авиационных лопатках из титановых сплавов

Рассмотрены способы обработки титановых лопаток (сплав VT8) компрессоров газотурбинных авиадвигателей для изменения структуры нанесенных порошковых покрытий (TiN) в плане создания благоприятной кристаллогеометрии поверхностных зон деталей, которая обеспечивает существенное повышение механических свойств и эксплуатационных характеристик изделий.

Ключевые слова: титановый сплав, методы обработки, адгезия, кристаллогеометрия, свойства.

Stepanova L., Ol'shanetskii V., Pukhal'skaia G. The formation of a favorable crystal geometry of TiN coatings on aircraft blades made of titanium alloys

The methods of processing titanium blades (VT8 alloy) of compressor turbine engines to change the structure of the powder coating (TiN) in terms of creating a favorable geometry of adhesion the surface areas of parts, which provides a significant improvement in the mechanical properties and performance of final product.

Key words: titanium alloy, processing methods, adhesion, crystal geometry, properties.