

СУЧАСНІ АВІАЦІЙНО-КОСМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 539.43;539.53+623.4(045)

¹М.С. Кулик, д.т.н., проф.
²Б.А. Ляшенко, д.т.н., проф.
³В.І. Мірненко, д.т.н., проф.
⁴О.А. Тамаргазін, д.т.н., проф.

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК ПОВЕРХНЕВИМ ЗМІЦНЕННЯМ

^{1,2,4}Національний авіаційний університет

¹E-mail: kms@nau.edu.com

⁴E-mail: avia_icao@mail.ru

³Національна академія оборони України

Розглянуто питання підвищення надійності лопаток компресора на основі поліпшення комплексу термомеханічних властивостей титанових сплавів багатофункціональними вакуум-плазмовими (PVD) покриттями.

Рассмотрены вопросы повышения надежности лопаток компрессора на основе улучшения комплекса термомеханических свойств титановых сплавов многофункциональными вакуум-плазменными (PVD) покрытиями.

In this article we examine the question of reliability raise of compressor blades on the martempering basis of a complex of thermomechanical properties of titanium alloys multipurpose vacuum-plasma (PVD) covers.

Постановка проблеми

Найпоширенішими конструкційними матеріалами для газотурбінних установок є титанові сплави (Ті-сплави) [1].

Найважливішою перевагою Ті-сплавів є питомі міцність більша в два рази порівняно з легированими сталями, які використовуються у двигунобудівництві, за температури до 300 °С [2].

Межа міцності σ_y складнолегованих Ті-сплавів досягає 1500 МПа при відносному подовження на розрив δ до 15 %.

Більш широке застосування Ті-сплавів стримують:

- низький опір повзучості за температури понад 550 °С;
- невисока вібраційна міцність, зумовлена високою чутливістю до стану поверхні;
- взаємодія з газовим середовищем за підвищених температур.

У практиці поверхневого зміцнення титанових сплавів відоме застосування традиційних технологій зміцнювальних покриттів. За накопичення значного досвіду з поліпшення механічних і триботехнічних характеристик Ті-сплавів задовільного рішення не отримали.

Загальним недоліком була та обставина, що поліпшення однієї характеристики в разі нанесення покриття істотно знижувало інші.

Наприклад, підвищення ерозійної стійкості супроводжувалося зниженням межі витривалості.

Мета досліджень – визначення шляхів підвищення надійності деталей з Ті-сплавів за рахунок нанесення багатофункціонального, багат шарового покриття і розроблення концепції керування технологією його формування у разі одночасного підвищення всього комплексу характеристик міцності та газоабразивної стійкості.

Методи дослідження

Для дослідження технологічного процесу нанесення вакуум-плазмових покриттів був використаний метод багатофакторного планування експерименту і математичної обробки статистичних даних, що дозволило подати процес формування покриттів у вигляді функціональних залежностей вхідних і вихідних параметрів. Як критерій оптимізації обрали:

- межу міцності;
- умовну межу текучості;
- ізотермічну і термоциклічну повзучість;
- межу високочастотної багатоциклової витривалості;
- інтенсивність зношування абразивними частинками композиції «основа–покриття».

Як технологію покриттів обрали метод PVD (фізичне осадження з парогазової фази), який на сьогодні є найперспективнішим.

Технологією нанесення передбачено три етапи:

- іонне очищення поверхні;
- плазмохімічний синтез матеріалу, що випаровується, в об'ємі камери і на поверхні;
- конденсацію покриття на деталі.

У дослідженнях було використано модернізовану установку ННВ-6,6-И1 типу «Булат» з одночасним розпиленням матеріалів із трьох катодів. Формування поверхневого шару відбувається в імпульсному режимі за наявності додаткового нагрівника та пристрою для сепарації плазмового потоку [3; 4].

Для експериментальних досліджень впливу вакуум-плазмових покриттів (Ti, (TiAl)N, (Ti)N) на характеристики міцності та газоабразивної стійкості як матеріал основи використано сплав ВТ20.

Випробування проводили на зразках, виготовлених з листового матеріалу завтовшки 1,0 мм.

Випробування на короткочасну статичну міцність і пластичність за осьового розтягання проводили відповідно до ДСТУ 1497–84 і ДСТУ 25.505–85 у твердому режимі зі швидкістю переміщення активного захоплювача (близько 5 мм/хв), що приблизно відповідає швидкості навантаження $30 \text{ МПа}\cdot\text{с}^{-1}$, із записом діаграми розтягання в координатах «зусилля – деформація».

Порівняльні випробування на ізотермічну та термоциклічну повзучість за фіксованого рівня навантаження ($0,8\sigma_b$) проводили в умовах осьового розтягнення з нагріванням робочої частини зразка шляхом фокусування променевої енергії в замкнутій оптичній безінерційній системі. Це дозволило нагрівати зразок до 1000°C без впливу електромагнітопластичного ефекту і охолоджувати його зі швидкістю до $100 \text{ град}/\text{с}$. Характеристики термічного циклу [5]:

- $350 - 640^\circ\text{C}$;
- час нагрівання 10 с;
- охолодження 15 с.

Вплив вакуум-плазмових покриттів на опір багаточислової втоми титанових сплавів оцінювали за допомогою високочастотних (до 10 кГц) прискорених випробувань на стомлення на консольний вигин із нагріванням зразка від джерела інфрачервоного випромінювання до 640°C [6].

Порівняльні випробування на газоабразивну стійкість проводили за допомогою відцентрового прискорювача, який дозволяє моделювати процеси зношування.

Під час дослідження як абразив використовували кварцовий пісок дисперсністю 200 мкм .

Тривалість його впливу становила 2 год, швидкість обертання ротора відцентрового прискорювача – $3000 \text{ об}/\text{хв}$. Під час цього швидкість вильоту частинок досягала $80 \text{ м}/\text{с}$. Зразки встановлювали під кутами $30, 45, 75, 90^\circ$ до вектора швидкості частинок, що вилітають із ротора.

Результати експериментальних досліджень

Для одержання вакуум-плазмових покриттів Ti, (TiAl)N, (Ti)N з мінімальною шорсткістю поверхні використовували сепаратор.

Краплинна фаза іонізованого потоку, проходячи крізь сепаратор, затримується на його пластинках.

Шорсткість поверхні сплаву ВТ20 з покриттями визначали профілографом-профілометром 201TE (рис. 1).

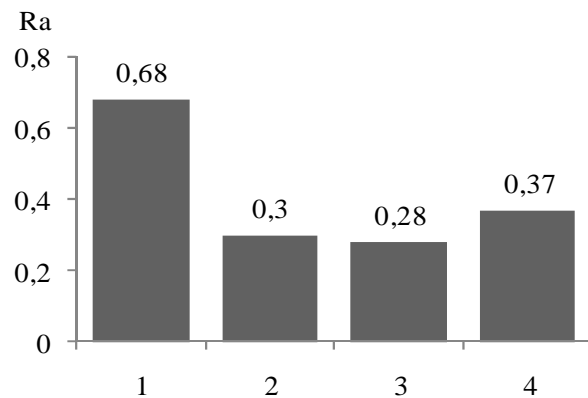


Рис. 1. Шорсткість поверхні титанового сплаву ВТ20:

- 1 – без покриття;
- 2 – з покриттям Ti;
- 3 – з покриттям (TiAl)N;
- 4 – з покриттям (Ti)N

Дослідження на мікротвердість проводили відповідно до ДСТУ 9450–76 за допомогою ПМТ-3. Кут між протилежними межами алмазної пірамідки становив 136° за навантаження 100 г .

Результати вимірювання мікротвердості сплаву ВТ20 без покриття та з покриттями Ti, (TiAl)N, (Ti)N показано на рис. 2.

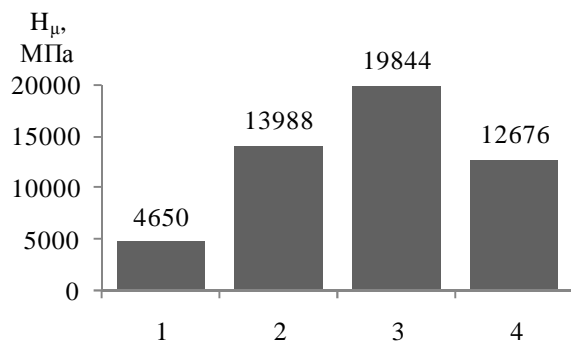


Рис. 2. Мікротвердість сплаву VT20:

- 1 – без покриття;
- 2 – з покриттям Ti;
- 3 – покриттям (TiAl)N;
- 4 – з покриттям (Ti)N

Випробування на ізотермічну та термоциклічну повзучість сплаву VT20 з вакуум-плазмовими покриттями проводили на установці «Щелкунчик» [5; 7].

Основними факторами, що призводять до пошкоджень, у прискорених термоциклічних випробуваннях є різкі тепломіни.

Повзучість за сталого статичного навантаження є чутливим інструментом для реєстрації зміни стану як покриття, так і поверхні розділу «основа–покриття».

Покриття (TiAl)N перешкоджає газонасиченню поверхневого шару титанового сплаву VT20 (рис. 3, а). Це різко знижує швидкість повзучості, дозволяє підвищити температуру експлуатації деталей [7].

Криві термоциклічної повзучості сплаву VT20 з покриттям (TiAl)N за статичного навантаження $0,8\sigma_b$ показано на рис. 3, б.

Зразок нагрівали та охолоджували з максимальною швидкістю до 100 град/с.

У результаті експерименту було встановлено, що покриття знижує швидкість повзучості зразка в 2–4 рази і підвищує температурний інтервал його експлуатації.

Як критерії оцінювання ерозійної стійкості було використано втрату маси зразка та інтенсивність зношування K . Залежність інтенсивності зношування K сплаву VT20 від кута атаки абразиву α показано на рис. 4.

У результаті експериментальних досліджень встановлено, що основним кінематичним параметром, який визначає характер руйнування матеріалу, є кут падіння абразиву.

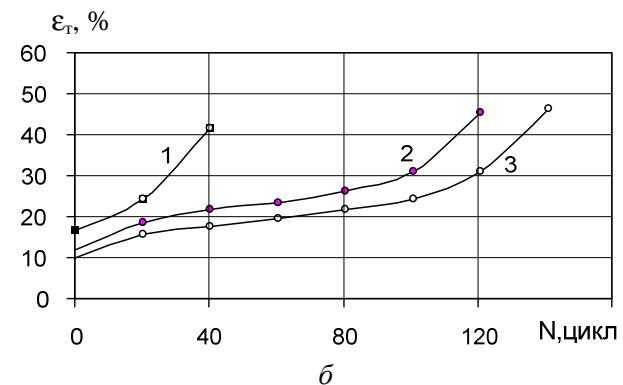
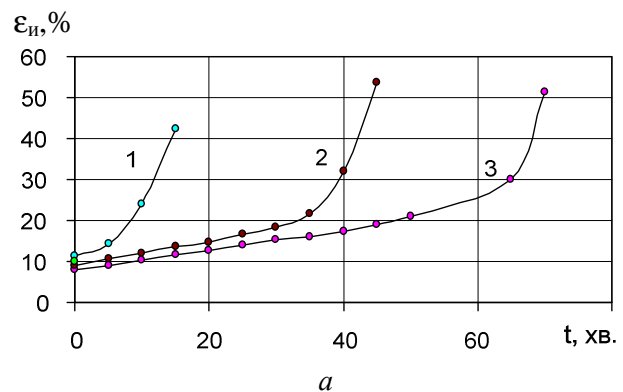


Рис. 3. Криві ізотермічної (а) та термоциклічної (б) повзучості сплаву VT20 з покриттям (TiAl)N:

- а: 1 – без покриття ($T = 590\text{ }^\circ\text{C}$);
- 2 – покриття (TiAl)N ($T = 623\text{ }^\circ\text{C}$);
- 3 – покриття (TiAl)N ($T = 606\text{ }^\circ\text{C}$);
- б: 1 – без покриття ($T = 610\text{--}390\text{ }^\circ\text{C}$);
- 2 – покриття (TiAl)N ($T = 623\text{--}400\text{ }^\circ\text{C}$);
- 3 – покриття (TiAl)N ($T = 606\text{--}389\text{ }^\circ\text{C}$)

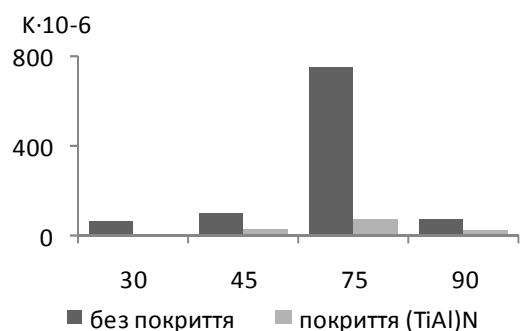


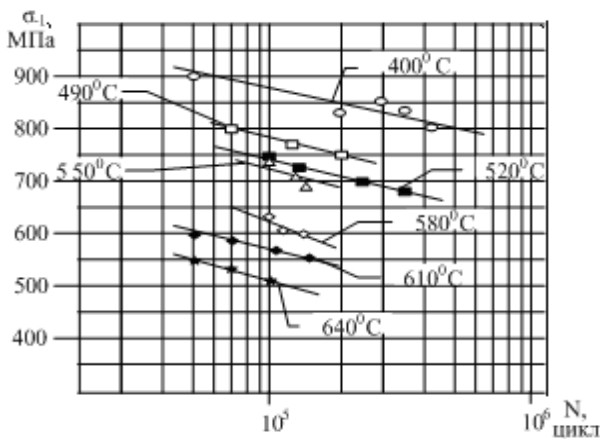
Рис. 4. Залежність ерозійної зносостійкості сплаву VT20 від кута атаки абразиву

Максимальна інтенсивність зношування титанового сплаву як з покриттям, так і без покриття спостерігається за кута атаки 75° . Залежно від параметрів технологічного процесу ерозійна стійкість титанового сплаву з вакуум-плазмовими покриттями підвищується в 10 разів [8].

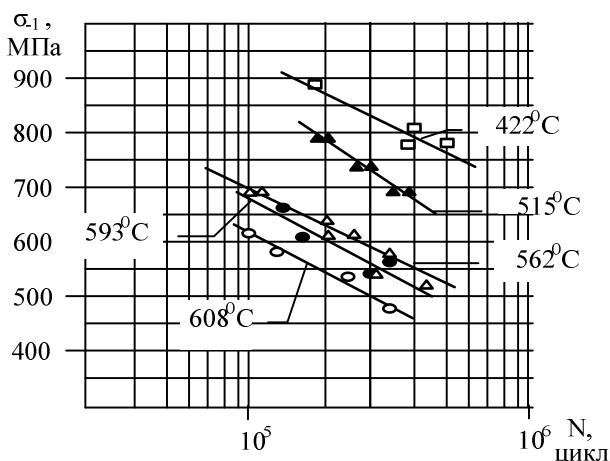
Більшість покриттів на титанових сплавах, які підвищують зносостійкість, приводять до зниження межі багатоциклової витривалості. Цю характеристику визначали на ультразвуковій установці за згинальних резонансних коливань зразка з різними покриттями за частоти навантаження 10 кГц [9].

Результати порівняльних випробувань на втому сплаву VT20 без покриття і з покриттям (TiAl)N показано на рис. 5. Всі варіанти покриттів – Ti, (TiAl)N і (Ti)N – загалом підвищують витривалість за даної кількості циклів навантаження (рис. 5, б).

Розв'язуючи задачу багатокритеріальної оптимізації, необхідно враховувати, що технологічний процес характеризується декількома критеріями.



а



б

Рис. 5. Криві втоми титанового сплаву VT20:

а – без покриття;

б – з покриттям (TiAl)N

Отже, постає проблема вибору значущості цих критеріїв і призначення їм вагових коефіцієнтів. Тому й виникає задача визначення деякої компромісної точки, яка однаковою мірою може задовольняти всім вимогам (компроміс за Парето).

Для оптимізації за результатами експериментальних досліджень був використаний метод випадкового пошуку на основі ЛП_r рівномірно розподілених випадкових точок.

Відповідно до методики математичного планування експерименту [10] визначення узагальненого критерію для кожного експерименту полягало у використанні системи експертних оцінок, згідно з якою кожному критерію оптимізації встановлено «рейтинг» і розраховано вагові коефіцієнти.

Найбільше значення ефективності критерію якості (менше значення узагальненого критерію) відповідає покриттю (TiAl)N, реалізовані в якому параметри технологічного процесу і є оптимальними.

Таким чином, у результаті проведеної з використанням отриманих математичних моделей багатокритеріальної оптимізації було знайдено оптимальне поєднання рівнів факторів, які впливають на критерії оптимізації:

X_1 – покриття (TiAl)N;

$X_2 - h_n = 6,5 \cdot 10^{-6}$ м;

$X_3 - t_{п.о} = 405$ с;

$X_4 - P_{p-г} = 0,3602$ Па.

Крім того, треба констатувати, що конструкційні елементи з титанових сплавів з вакуум-плазмовим покриттям (TiAl)N можна використовувати за температури $T = 593$ °С без зниження експлуатаційних властивостей. Це дає можливість на етапах розроблення і виробництва газотурбінних установок замість легированих сталей як конструкційні матеріали використовувати титанові сплави.

Оцінювання підвищення ресурсу конструкційних елементів газотурбінної установки за рахунок застосування технологічного процесу нанесення вакуум-плазмових покриттів полягало у визначенні комплексного показника, який ґрунтувався на аналізі рангів, вагових коефіцієнтів та середніх значень критеріїв оптимізації.

Завдяки підвищенню характеристик міцності та газообразивної стійкості титанових сплавів з вакуум-плазмовими покриттями можна прогнозувати поліпшення показників надійності за рахунок зниження ймовірності руйнування робочих лопаток компресора більш ніж у 2,5 рази.

Висновки

1. Удосконалено технологію нанесення PVD-покриттів. Шляхом сепарації краплинної фази іонізованого потоку матеріалу покриттів мінімізовано шорсткість поверхні деталі. На прикладі сплаву VT20 шорсткість знизилася в середньому у два рази для всіх трьох видів покриттів: Ti, (TiAl)N, (Ti)N.

2. Вимірювання мікротвердості сплаву VT20 без покриття і з покриттям Ti, (TiAl)N, (Ti)N показало істотне її підвищення (в 1,5–4 рази).

3. На прикладі покриття (TiAl)N показано, що швидкість ізотермічної повзучості сплаву VT20 знижується в 2–3 рази, а швидкість термоциклічної повзучості – в 2–4 рази, що дозволяє підвищити температурний інтервал експлуатації деталей із титанового сплаву.

4. Максимальна інтенсивність ерозійного зношування сплаву VT20 як з покриттям, так і без покриття спостерігається в разі кута падіння абразиву 75°. При цьому визначено, що залежно від параметрів технології ерозійна стійкість сплаву VT20 з покриттям (TiAl)N підвищується в 10 разів.

5. Покриття Ti, (TiAl)N і (Ti)N на прийнятій базі обмеженої витривалості підвищують витривалість сплаву VT20 як за нормальної, так і за підвищеної температури ($T = 20 \dots 650$ °C).

6. Із розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації випливає, що максимальному значенню критерію якості відповідає покриття (TiAl)N.

7. Підвищення ресурсу елементів газотурбінного двигуна завдяки застосуванню досліджених покриттів приводить до підвищення відповідних показників надійності газотурбінного двигуна в експлуатації.

Література

1. *Підвищення ресурсу деталей ГТД із титанових сплавів* / В.А. Богуслаєв, А.И. Долматов, П.Д. Жеманюк та ін. – Запоріжжя: ВАТ «Мотор Сич», 2000. – 110 с.

2. *Титанові сплави в конструкціях і виробництві авіадвигунів і авіаційно-космічної техніки* / Б.А. Колачев, Ю.С. Єлисеєв, А.Г. Братухін, В.Д. Талалаєв. – М.: МАИ, 2001. – 411 с.

3. *Пат. 4250 Україна, МКП 7 C23C14/00, 323C14/24, 323C14/26. Установа для вакуум-плазмового напилення* / В.І. Мірненко, Б.А. Ляшенко, А.В. Рутковський, Б.Й. Семон; Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України. – № 2004032217; Заявл. 25.03.04; Опубл. 17.01.05, Бюл. №1. – 2 с.

4. *Пат. 5174 Україна, МКП 7 C23C14/00. Установа для вакуум-плазмового напилення* / В.І. Мірненко, Б.А. Ляшенко, А.В. Рутковський, А.М. Петренко; Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України. – № 20040705862; Заявл. 16.07.04; Опубл. 15.02.05, Бюл. №2. – 3 с.

5. *Ляшенко Б. А. Оптимізація і ресурс теплозахисних покриттів деталей ГТД* / Б.А. Ляшенко, Н.И. Гречанюк // Пр. Міжнар. конф. «Оцінка й обґрунтування продовження ресурсу елементів конструкцій». – К.: ИПП НАН України, 2000. – С. 819–824.

6. *Пат. 2489 Україна, МКП 7 G01N3/00. Установа для дослідження зразків матеріалів на термомеханічну втому* / Б.А. Ляшенко, О.Г. Трапезон, А.В. Рутковський, В.І. Мірненко, А.В. Бондар; Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України. – №2003076427; Заявл. 09.07.03; Опубл. 17.05.04, Бюл. №5. – 3 с.

7. *Мірненко В.І. Вплив вакуум-плазмових покриттів на ізотермічну та термоциклічну повзучість титанового сплаву VT20* / В.І. Мірненко, А.В. Рутковський, А.М. Петренко // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – Черкаси: ЧДТУ. – 2004. – №1. – С. 41–45.

8. *Газоабразивна стійкість титанового сплаву VT20 з вакуум-плазмовими покриттями* / Б.А. Ляшенко, В.І. Мірненко, А.В. Рутковський, А.М. Петренко // Проблеми трибології. – 2004. – №2. – С. 142–149.

9. *Трапезон А.Г. Циклічна міцність титанових сплавів при нормальних і підвищених температурах в умовах високої частоти нагрівання* / А.Г. Трапезон, В.І. Мірненко, А.В. Бондар // Вібрації в техніці та технологіях. – 2004. – №5(37). – С.85–88.

10. *Радченко С.Г. Математичне моделювання технологічних процесів у машинобудуванні* / С.Г. Радченко. – К.: ЗАТ «Укрспецмонтажпроект», 1998. – 274 с.