

**МІРНЕНКО В.І.**, старший науковий співробітник, доктор технічних наук, професор кафедри економіки та фінансового забезпечення Національного університету оборони України

**ДЕРЕВ'ЯНКО М.М.**, заступник начальника науково – дослідного відділу Державного науково-дослідного інституту авіації

**РАДЬКО О.В.**, старший науковий співробітник Національного університету оборони України, кандидат технічних наук

### **ГАЗОАБРАЗИВНА СТІЙКІСТЬ ТИТАНОВИХ ЛОПАТОК З ВАКУУМ-ПЛАЗМОВИМИ ПОКРИТТЯМИ**

*У статті запропоновано використання методу багатокритеріальної оптимізації визначення компоновки багатощарових вакуум-плазмових покриттів та оптимальних режимів технологічного процесу їх нанесення для підвищення опору газоабразивному зношенню лопаток компресора.*

Відомо, що завдяки особливим фізико-хімічним властивостям (мала щільність, висока міцність при нормальних та підвищених температурах, корозійна стійкість в багатьох агресивних середовищах та висока температура плавлення) титанові сплави знайшли широке застосування в галузі двигунобудування. У сучасних авіаційних газотурбінних двигунах (АГТД) використання титанових сплавів досягає 36% [1]. Крім того, переваги титанових сплавів дозволяють використовувати їх замість сталей для виготовлення лопаток компресора газотурбінних силових установок (ГТУ), за рахунок росту питомого робочого об'єму та підвищення корозійної стійкості при статичному та циклічному режимах навантаження [2, 3].

Однією з найбільш характерних особливостей експлуатації АГТД є попадання разом з повітрям в компресор значної кількості пилу та сторонніх предметів. Концентрація кварцових частинок в пилу досягає 65...98% [4]. Відомо, що при концентрації пилу за повітряним фільтром в ГТД потужністю 50 МВт за день роботи попадає майже 18 кг твердих частинок [5]. Це призводить до інтенсивного зносу лопаток, появи забоїн на їх крайках, забруднення (шлакування), зменшенню запасу міцності та потужності АГТД у цілому. Установлено [6, 7], що забруднення (шлакування) робочих поверхонь повітряного компресора зменшує на 5% витрати в ньому повітря, а це приводить до зниження потужності ГТУ на ~13% і збільшення питомої витрати палива на ~5,5%.

Крім того, наявність пошкоджень та забруднення змінює характер обтікання лопаток повітрям, що знижує запас стійкості компресора щодо помпажу. Помпаж компресора може викликати не тільки самовимкнення двигуна, але й руйнування його елементів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій показує, що вирішення даної проблеми можливе в результаті комплексного підходу до формування на лопатках

компресора АГТД нових функціональних захисних покриттів та на їх основі прогнозування довговічності роботи конструкційних елементів в умовах газообразивного впливу агресивного середовища.

Мета роботи полягала в визначенні компоновки багат шарових вакуум-плазмових покриттів та оптимальних режимів технологічного процесу їх нанесення з підвищеним опором газообразивному зношенню, завдяки використанню методу багатокритеріальної оптимізації.

Для одержання багат шарових покриттів використовувався вакуум-плазмовий метод фізичного осадження покриттів з парогазової фази, що отримав назву в світовій практиці PVD (Physical vapor deposition).

Експериментальні дослідження багат шарових вакуум-плазмових покриттів проводились з використанням методу планування експерименту. Використовуючи методи експертної оцінки та результати робіт [8] щодо оптимізації технологічного процесу їх нанесення, а також зробивши серію відсіюючих експериментів, в матрицю планування в якості факторів варіювання були вибрані: тип покриття, товщина покриття, час іонної обробки та тиск реакційного газу (табл. 1). В якості матеріалу основи використовувався титановий сплав ВТ20.

При плануванні експерименту використовувалися багат факторні регулярні плани [9]. Для вибраного числа факторів та рівнів варіювання побудований план експерименту. Він представлений у вигляді робочої матриці факторів, які варіюють (табл. 2).

На основі одержаних результатів проводилось нанесення покриттів та їх експериментальні дослідження на газообразивну стійкість.

Таблиця 1.

Фактори та рівні їх варіювання

| № | Фактори                        | Позначення     | Рівні варіювання                               |         |        |
|---|--------------------------------|----------------|--|---------|--------|
| 1 | Тип покриття                   | X <sub>1</sub> | TiN  | (TiAl)N | (TiC)N |
| 2 | Товщина покриття (м)           | X <sub>2</sub> | 2 · 10 <sup>-6</sup> ... 10 · 10 <sup>-6</sup> |         |        |
| 3 | Час іонної обробки (с)         | X <sub>3</sub> | 360 ... 1080                                   |         |        |
| 4 | Тиск реакційного газу (Па)     | X <sub>4</sub> | 0,267 ... 0,48                                 |         |        |
| 5 | Експлуатаційна температура (К) | X <sub>5</sub> | 663...913                                      |         |        |

Таблиця 2.

План експерименту в натуральних координатах

| №  | X <sub>1</sub> | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> | X <sub>4</sub> | X <sub>5</sub> |
|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1  | 2              | 3              | 4              | 5              | 6              |
| 1  | (TiAl)N        | 5,73           | 696            | 0,3664         | 779,7          |
| 2  | TiN            | 8,4            | 504            | 0,4374         | 713            |
| 3  | (TiC)N         | 3,6            | 936            | 0,3096         | 863            |
| 4  | TiN            | 7,33           | 1032           | 0,4658         | 829,7          |
| 5  | (TiAl)N        | 2,53           | 600            | 0,338          | 679,7          |
| 6  | (TiAl)N        | 4,66           | 840            | 0,2812         | 896,4          |
| 7  | (TiC)N         | 9,46           | 408            | 0,409          | 746,4          |
| 8  | TiN            | 10             | 888            | 0,3238         | 696,4          |
| 9  | (TiAl)N        | 5,2            | 456            | 0,4516         | 846,4          |
| 10 | TiN            | 3,06           | 1080           | 0,3948         | 763            |

| 1  | 2       | 3    | 4   | 5      | 6     |
|----|---------|------|-----|--------|-------|
| 11 | (TiC)N  | 7,86 | 648 | 0,267  | 913   |
| 12 | TiN     | 4,13 | 552 | 0,4232 | 813   |
| 13 | (TiC)N  | 8,93 | 984 | 0,2954 | 663   |
| 14 | (TiAl)N | 6,80 | 360 | 0,3522 | 879,7 |
| 15 | (TiC)N  | 2    | 792 | 0,48   | 729,7 |
| 16 | TiN     | 6,26 | 624 | 0,3025 | 771,3 |

Відносну газоабразивну зносостійкість титанового сплаву ВТ20 з вакуум-плазмовими покриттями TiN, (TiAl)N та (TiC)N визначали за методикою випробування матеріалів і покриттів на газоабразивне зношування за допомогою відцентрового прискорювача (ГОСТ 2301-78), що дозволяє моделювати реальні процеси зношування деталей (рис. 1).

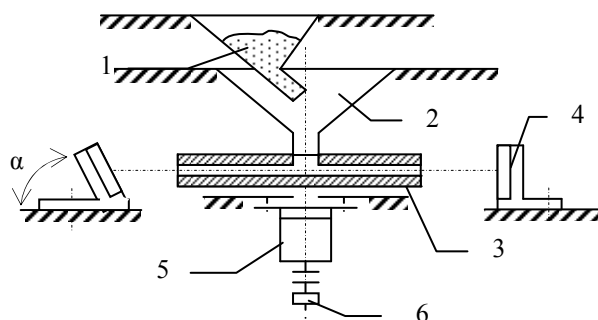


Рис. 1. Схема відцентрового прискорювача:

1 – ємкість з абразивними частинками; 2 – змішувальний бункер; 3 – ротор; 4 – зразок; 5 – електродвигун; 6 – тахометр

Під час дослідження в якості абразиву використовувався кварцовий пісок масою 3 кг (на одне випробування) та дисперсністю 200 мкм. Термін впливу абразиву становив  $2 \pm 0,15$  години. Швидкість обертання ротора відцентрового прискорювача становила 3000 об/хв, при цьому швидкість абразиву досягала 38 м/с. Випробування зразків розміром 25x15 мм проводились при чотирьох кутах атаки впливу абразивних часток:  $30^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $75^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ .

В якості критеріїв стійкості матеріалу при впливі абразивного потоку використовувалась відносна зносостійкість та інтенсивність зношування. Ці характеристики розраховуються з параметру втрати маси зразка.

Відносну зносостійкість визначали за формулою:

$$\varepsilon = \frac{\delta_e}{\delta_3}, \quad (1)$$

де  $\delta_e$  – втрата маси загального зразка, кг;  $\delta_3$  – втрата маси досліджуваного зразка, кг.

Крім відносної зносостійкості титанового сплаву ВТ20 з вакуум-плазмовими покриттями визначали інтенсивність зношування  $K$ :

$$K = \frac{\delta_3}{Q}, \quad (2)$$

де  $Q$  – кількість абразиву, що попадає на один зразок, кг.

$$Q = \frac{\alpha}{2\pi} \cdot Q_1, \quad (3)$$

де  $Q_1$  – загальна кількість абразиву, кг;  $\alpha$  – кут падіння, в радіанах.

Враховуючи те, що кут вильоту газоабразивної суміші становить  $55^{\circ}$ , інтенсивність зношування визначали за формулою:

$$K = \frac{31,5 \cdot \delta_3}{Q_1} \quad (4)$$

Зважування зразків до і після випробування проводили на аналітичних вагах ВЛР-200 з точністю до  $\pm 0,0001$  г.

В результаті експериментальних досліджень виявлено, що найбільша інтенсивність зношування титанового сплаву, як з покриттям так і без, спостерігається при куті атаки абразиву, що становить  $75^{\circ}$ . Це пов'язано із комплексним впливом процесів мікрорізання та пластичного деформування матеріалу. При цьому зношування матеріалу зумовлено такими процесами:

мікрорізання з утворенням рельєфної поверхні внаслідок руйнування поверхневих шарів у ділянках контакту;

адгезійно-когезійним руйнуванням поверхневих шарів у ділянках контакту;

втомленим зношуванням, яке зумовлене пружною деформацією матеріалу зовнішнім тілом;

пластичною деформацією поверхні матеріалу.

Також, встановлено, що кращі характеристики газоабразивної стійкості має покриття (TiAl)N завдяки властивостям поверхневого шару.

Регресійний аналіз результатів досліджень та перевірка одержаних математичних моделей проводилось за алгоритмом згідно методики [10]. Розрахунок моделей здійснювався за допомогою пакету прикладних програм ПРІАМ (планування, регресія і аналіз моделей).

За результатами регресійного статистичного аналізу одержані залежності інтенсивності зношування титанових зразків з вакуум-плазмовими покриттями за кутами зіткнення з абразивом від конструкційних, технологічних та експлуатаційних факторів.

Технологічний процес формування вакуум-плазмових покриттів є складним та багатопараметричним. Тому, проблема вибору оптимальних режимів нанесення багат шарових функціональних покриттів є однією з найбільш важливих.

При вирішенні задачі вибору оптимальних режимів нанесення функціональних багат шарових вакуум-плазмових покриттів технологічний процес характеризується не одним, а декількома показниками якості (табл. 1). При оптимізації вимоги до них можуть бути достатньо суперечливими, тобто поліпшуючи один показник, неминуче погіршуємо інші. Тому виникає задача проведення багатокритеріальної оптимізації шляхом визначення деякої компромісної точки, яка в рівній мірі буде задовольняти всім вимогам (компроміс по Парето).

В таблиці 3 представлені результати багатокритеріальної оптимізації.

Таблиця 3.

Результати багатокритеріальної оптимізації.

| X <sub>1</sub> | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> | X <sub>4</sub> |
|----------------|----------------|----------------|----------------|
| TiN            | 6,26           | 624            | 0,3025         |
| (TiC)N         | 8,93           | 984            | 0,2954         |
| (TiAl)N        | 2,53           | 600            | 0,3380         |

**Висновки:**

1. Результати проведених досліджень показують високу стійкість до абразивного зношування титанового сплаву ВТ 20 з вакуум-плазмовими покриттями TiN, (TiAl)N та (TiC)N. Експериментально встановлено, що механізм абразивного зношення зумовлений проходженням різного роду фізико-хімічних процесів на поверхні покриття, визначальними з яких є процеси мікрорізання і пластичного деформування матеріалу.

2. Найбільша інтенсивність зношування титанового сплаву з покриттями TiN, (TiAl)N та (TiC)N спостерігається при куті атаки, який становить  $75^{\circ}$ . Це пов'язано з комплексним впливом процесів мікрорізання та пластичного деформування матеріалу, що зумовлено значними дотичними і нормальними напруженнями в системі "основа-покриття".

3. Аналіз результатів експериментальних досліджень титанового сплаву ВТ 20 з покриттями на газоабразивну стійкість показав, що найкращі характеристики ерозійної стійкості має покриття (TiAl)N, що, у значній мірі, визначається технологічним режимом нанесення вакуум-плазмових покриттів. Тобто, завдяки зміні технологічних режимів процесу нанесення, можна отримувати покриття з заданими властивостями.

4. Багатокритеріальна оптимізація технологічного процесу нанесення багат шарових вакуум-плазмових покриттів дає можливість одержати комплексну оцінку впливу вхідних змінних процесу на вихідні показники і дозволяє визначити поєднання технологічних і конструктивних факторів при яких одержуються покриття з заданими властивостями.

## **ЛІТЕРАТУРА**

1. Оцуки Юкио, Акикава Наофуми. Применение титановых сплавов в ГТД авиационного и промышленного назначения. Kinzoku // *Metals and Technol.* – 1998. - 68, № 12. – P. 72-75.
2. Rust Thomas M., Steltz William G. Titanium for steam turbine blades. // *J. Metals.* – 1982. – 34, №9. – P. 42-47.
3. Ohama Shinichi. Koku gijutsu // *Avian. Eng.* – 1995. - №482. – P. 26-31.
4. Тюнин В.Д. Износостойкость авиационных деталей: Учебное пособие. – К.: КВВАИУ, 1978. – 35 с.
5. Swanekamp Robert. Monitoring and maintaining advanced gas turbines // *Power (USA).* – 2001. – 145, № 2. – P. 55-56, 58, 60-62, 64, 66, 68, 70, 72, 74.
6. Stalder J.-P. Gas turbine compressor washing state of the art: Field experiences // *Trans. ASME. J. Eng. Gas Turbines and Power.* – 2001. – 123, № 2. – P.363-370.
7. Александров В.Г., Майоров А.В., Потюков Н.П. Авиационный технический справочник. – М.: Транспорт. - 1975. – 432 с.
8. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент / Внуков Ю.Н., Марков А.А., Лавров Л.В., Бердышев Н.Ю. – К.: Тэхника, 1992. – 143 с.
9. Бродский В.Э. Многофакторные регулярные планы. – М.: Изд-во МГУ, 1972. – 218 с.
10. Радченко С.Г. Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении. – Киев.: ЗАТ «Укрспецмонтажпроект», - 1998.- 274 с.