

АРТЮШИН Л.М., заступник директора Інституту післядипломного навчання, доктор технічних наук, професор Національного авіаційного університету

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

ГРОМЕНКО В.Ю., кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРА АВІАЦІЙНИХ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

У статті запропоновано для підвищення механічних властивостей титанових лопаток компресора авіаційних газотурбінних двигунів багатofункціональні вакуум-плазмові покриття на основі нітриду титану

Умови експлуатаційного навантаження лопаток компресора авіаційних газотурбінних двигунів (АГТД) характеризуються одночасною дією високих статичних та динамічних навантажень, амплітуда та частота яких змінюється в значних межах, зміною температури в широкому інтервалі (теплові удари), наявністю агресивного середовища та абразивних часток в газовому потоці [1].

Технології зміцнення – механічна, термічна та хіміко-термічна обробка, що зараз широко використовуються, не забезпечують необхідного підвищення експлуатаційних властивостей конструкційних матеріалів АГТД. Для захисту лопаток компресора використовують покриття емаль ЕП586, покриття типу Ni-Cd, ДифА-СФ, Х-ДифА, АФГ та ВП-АФЦ-2 [2]. Проте, ці покриття погано протидіють ерозії, а поверхні із зруйнованим покриттям кородують. Крім того, технологічні процеси потребують значних матеріальних затрат. Недоліком неметалевих покриттів є їхня значна товщина (близько 100 мкм) та невисока температура використання – до 300⁰С. Загальним недоліком металевих покриттів, що звичайно наносяться гальванічним способом, є деяке зниження межі витривалості лопатки.

Перспективним є використання багаточарових вакуум-плазмових покриттів із металів та їх з'єднань з підвищеними фізико-хімічними та механічними характеристиками. Вакуум-плазмовий метод (PVD) знайшов широке застосування як на Україні так і за кордоном. Так, одні з найбільших авіапідприємств України “Мотор Січ” та Росії “Уральський завод цивільної авіації” використовують на титанових лопатках компресора вертолітного двигуна вакуум-плазмові покриття, які запобігають тільки їх ерозійному зношенню [3, 4]. Але, при нанесенні ерозійно стійких покриттів знижується межа витривалості на 10...15% [1, 5], а в деяких випадках на десятки відсотків [6]. Крім того, стримує використання титанових сплавів для лопаток компресора АГТД низький опір повзучості при

температурах $> 550^{\circ}\text{C}$ і та обставина, що внаслідок взаємодії з газовим середовищем при температурах $400\text{...}450^{\circ}\text{C}$ проходить окислення на велику глибину та, як наслідок, втрата пластичності [7].

Мета дослідження полягала у створенні технології нанесення багатофункціональних градієнтних вакуум-плазмових покриттів, які підвищують характеристики міцності в інтервалі температур до 640°C та ерозійну стійкість титанових лопаток компресора АГТД.

Для визначення оптимальних параметрів технологічного процесу нанесення вакуум-плазмових покриттів проведено його оптимізацію. Об'єктивна та повна оцінка умов роботи лопаток компресора дозволяє в якості критеріїв оптимізації вибрати характеристики міцності та газоабразивної стійкості: межу міцності, умовну межу текучості, ізотермічну та термоциклічну повзучість, межу витривалості та інтенсивність зношення. Експериментальні дослідження проводились з використанням методики планування експерименту.

Формування багатофункціональних PVD-покриттів TiN, (TiAl)N та (TiC)N здійснювалося на модернізованій установці ННВ-6,6-И1 типу "Булат" з одночасним розпиленням матеріалу з двох катодів (мішеней) (рис. 1). Дана установка відрізняється від серійної наявністю: нагрівача; пристрою для сепарації плазмового потоку, що відділяє парову і краплинну фази; блоку ступеневого переривання напруги, який дозволяє реалізувати новий принцип формування вакуум-плазмових покриттів в імпульсному режимі на етапі іонного травлення.

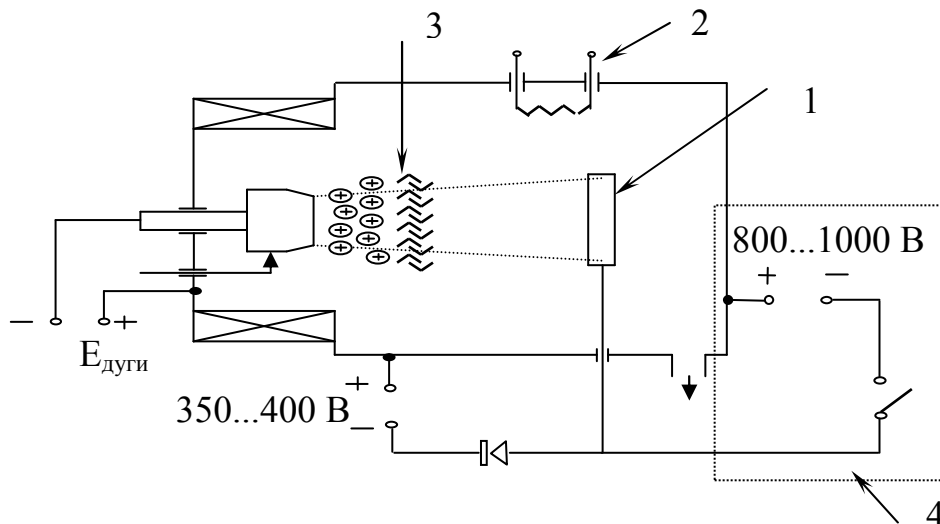


Рис. 1. Модернізована установка ННВ-6,6-И1 типу "Булат":

1 – деталь; 2 – нагрівач; 3 – сепаратор; 4 – блок ступеневого переривання напруги.

Технологічний процес нанесення покриттів складається з трьох етапів: іонне очищення (травлення) поверхні, іонне осадження та охолодження в вакуумній камері. До того ж, для отримання покриттів високої якості необхідно забезпечити точний вимір та підтримання температури підложки в зазначених межах протягом всього технологічного процесу. Крім цього, процес іонного травлення здійснюється в пульсуючому режимі, тобто подача імпульсу напруги в $800\text{...}1000\text{ В}$ на підложку триває 20 мкс за період 200 мкс . Блок схема алгоритму нанесення вакуум-плазмових покриттів представлено на рис. 2.

Іонне травлення здійснюється шляхом катодного розпилювання поверхневого шару оброблюваного матеріалу іонами плазми вакуумної дуги, прискореними до енергії 0,5...3 кеВ.

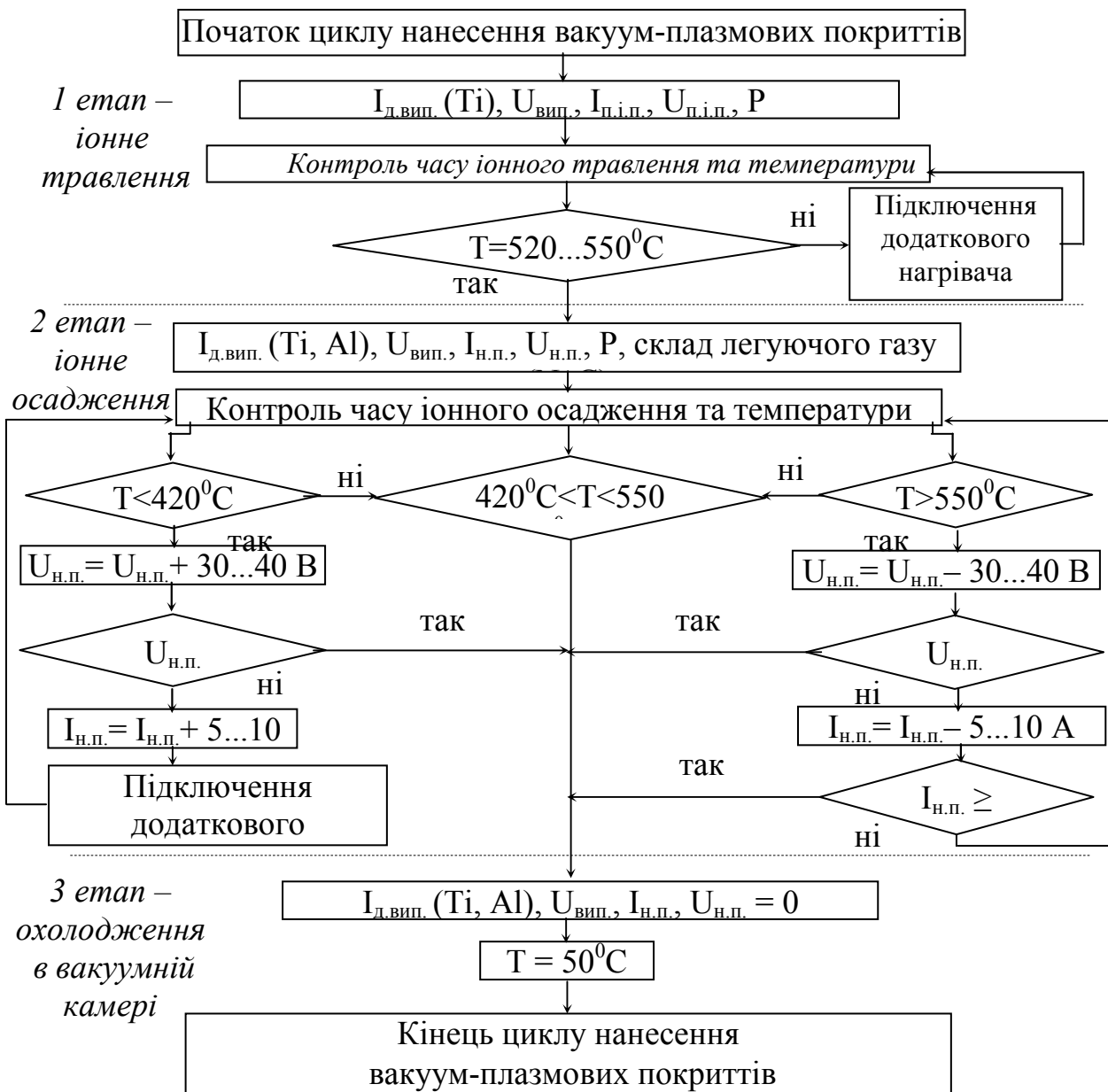


Рис. 2. Блок-схема алгоритму нанесення вакуум-плазмових покриттів

У процесі іонного бомбардування поверхня підложки піддається інтенсивному іонному очищенню, видаляються оксиди, забруднення, гази. Крім того, у період іонного травлення встановлюється температура підложки 520...550°С та задається час обробки. При досягненні на поверхні деталі оптимальної температури проходить етап осадження покриттів. Якщо підложка нагрілася до цієї температури раніше заданого часу, випаровувачі виключаються і після охолодження до 450°С включаються знову. При обробці деталей великої маси, де заданого часу іонного травлення недостатньо для їх нагрівання, підключається джерело додаткового нагрівання.

Процес конденсації здійснюється безпосередньо після очищення підложки при зменшенні її потенціалу до декількох десятків-сотень вольт (10...300 В). У процесі осадження покриття встановлюються початкові значення основних технологічних параметрів. Через кожну хвилину інформація про температурний стан підложки порівнюється із заданою та приймається необхідне рішення.

У першому випадку $420^{\circ}\text{C} < T < 550^{\circ}\text{C}$ по закінченню встановленого часу напилення другий етап технологічного процесу закінчується й проходить перехід до третього етапу – охолодження.

У другому випадку $T < 420^{\circ}\text{C}$ через кожну хвилину осадження покриття передбачено підвищення робочої напруги на 30...40 В до досягнення підложкою температури, що перевищує 420°C . Якщо рівень робочої напруги 280 В недостатній для досягнення оптимальних температурних умов підложки, то починається збільшення сили струму дуги з кроком 5...10 А до значення 130 А. У цьому випадку передбачається корекція часу конденсації покриття, так як із збільшенням сили струму збільшується швидкість осадження покриття. Якщо інтенсифікація технологічних параметрів у заданих межах недостатня, то у схемі передбачено необхідність підключення джерела додаткового підігрівання.

При $T > 550^{\circ}\text{C}$ (третій варіант) порядок вибору оптимальних технологічних параметрів аналогічний другому варіанту, різниця тільки у тому, що робоча напруга та сила струму зменшуються до 245 В і відповідно до 95 А. До того ж, при досягненні на поверхні деталі оптимальної товщини покриття, що регламентовано часом, процес осадження закінчується. Охолодження деталі регламентується температурою підложки при розгерметизації вакуумної камери, що зумовлює утворення на покритті оксидних плівок. Рекомендується охолоджувати підложку до температури 50°C .

Отримані багатофункціональні градієнтні PVD-покриття піддавалися комплексним випробуванням на опір багатоциклової втоми, ізотермічну та термоциклічну повзучість, ерозійну стійкість, короточасну статичну міцність та пластичність. На основі отриманих результатів експериментальних досліджень проведено багатопараметричну оптимізацію технологічного процесу нанесення вакуум-плазмових покриттів за допомогою методу випадкового пошуку з використанням ЛП_т – послідовностей та визначено узагальнений критерій оптимальності для кожного об'єкта оптимізації (16 модифікацій), який одержано шляхом використання принципу компромісу за Парето. В результаті встановлено, що найбільше значення ефективності критерію якості $y_{\text{ефект.}}=0,68$ має покриття (TiAl)N при товщині $6,5 \cdot 10^{-6}$ м, а технологічні параметри його нанесення і є оптимальними: час іонної обробки – 405 с., тиск реакційного газу – 0,3602 Па.

Аналіз одержаних результатів дозволяє зробити висновок, що шляхом оптимізації технологічного процесу нанесення вакуум-плазмових покриттів на титановий сплав VT20 за критеріями міцності, можна знизити значення ізотермічної і термоциклічної повзучості у 2...4 рази, підвищити опір багатоциклової втоми на 20...40%, збільшити ерозійну стійкість у 5...10 разів.

Таким чином, можна зробити висновки, що:

1. На підставі теоретичних і експериментальних досліджень розроблено технологічний процес нанесення багатофункціональних градієнтних вакуум-плазмових покриттів на лопатки компресора авіаційних газотурбінних двигунів.

2. Застосування вакуум-плазмових покриттів дозволить підвищити ресурс лопаток компресора АГТД, що виготовлені з титанових сплавів і працюють в інтервалі температур 350...640°C, а також прогнозувати їх довговічність. Це надасть можливість підвищити ефективність ремонту силових установок літальних апаратів при зниженні матеріальних витрат і часу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Петухов А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД. – М: Машиностроение, 1993. – 240 с.
2. Елисеев Ю.С., Абраимов Н.В., Крымов В.В. Химико-термическая обработка и защитные покрытия в авиадвигателестроении. – М.: Высшая школа, 1999. – 450 с.
3. Рекламный проспект: Открытое акционерное общество «Уральский завод гражданской авиации» (ПРАД). – Екатеринбург. – 2001.
4. Prokopenko A.N. Increase in strength of helicopter gas-turbine engine compressor blades under gas-abrasive wear conditions // Weld. World. – 1994. – 33, №6. – P.413-414.
5. Гецов Л.Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. – М: Недра, 1996. – 591 с.
6. Скажутин Ю.А. Функциональные покрытия для восстановления эксплуатационных свойств деталей вертолетных ГТД вакуумным ионно-плазменным напылением. - Автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.22.14 / Риж. краснознам. ин-т. инж. гражд. авиации. – 1991. – 47 с.
7. Горынин И.В., Чечулин Б.Б. Титан в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.

Надійшла до редакції 29.10.2009