

УДК 620.178.16:621.793.621.438

<sup>1</sup>В.Й. Орланов, канд. техн. наук, доц.  
<sup>2</sup>О.І. Чумак, асист.**ІМПУЛЬСНА МІКРОПЛАЗМОВА ТЕХНОЛОГІЯ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ  
ІЗ НІТРИДУ ТИТАНУ НА ТОРЦІ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРІВ**

НАУ, кафедра авіаційних двигунів

<sup>1</sup>E-mail: sadi@nau.edu.ua<sup>2</sup>E-mail: chumak\_o\_i@mail.ru*Розглянуто технологію використання низькотемпературної плазми для реалізації плазмохімічних процесів нанесення захисних покриттів при торцевому напиленні лопаток компресорів.**Technology of use of low-temperature plasma for realization of plasma chemical processes of plating of protective cover in application to end face sputtering of compressor blades is considered.***Вступ**

Технічний прогрес у машинобудуванні пов'язаний зі створенням нових покриттів, здатних забезпечити надійність і довговічність деталей машин, а також підвищити якість і ефективність їх роботи в екстремальних умовах, обумовлених абразивним зносом. Особливо це стосується авіаційного машинобудування на етапі ремонту авіаційних двигунів.

**Постановка проблеми**

Один з ефективних засобів вирішення таких задач – нанесення покриттів на торці лопаток компресорів газотурбінних двигунів (ГТД), які сприяють відновленню експлуатаційних характеристик відбракованих лопаток, одночасно зменшуючи вартість ремонту двигунів у цілому.

Абразивний знос торців лопаток та матеріалу ущільнення є результатом впливу перехідних характеристик двигунів в умовах експлуатації.

Звідси випливає двоцільова задача: нанесення покриттів на торці лопаток компресорів під час ремонту двигунів і одночасно саме покриття повинно бути більш зносостійким, ніж основний матеріал лопаток.

Таку технологію застосовують для захисту лопаток компресорів від газоабразивного зносу [1]. Трансформування її до нанесення нітриду титану Ti-N на торці компресорних лопаток проблематичне в зв'язку з тим, що це вакуумно-плазмова технологія малої продуктивності та значних капітальних і експлуатаційних затрат.

**Аналіз досліджень і публікацій**

Теоретично відомо декілька схем нанесення зносостійких покриттів на поверхню металів [2].

З усіх видів зносостійких технологій розповсюдження отримали технології вакуумно-плазмового фізичного та хімічного нанесення одношарових покриттів із нітридів, карбідів і карбонітридів титану.

Змінення параметрів технологічного процесу при нанесенні покриттів дозволяє в деяких межах міняти їх властивості:

- пластичність;
- адгезійну здатність;
- температуру окиснення;
- пористість;
- коефіцієнт тертя;
- твердість.

Найбільше поширення отримали технології з застосуванням нітриду титану Ti-N, властивості яких описано в працях [3; 4].

**Технологія нанесення покриттів**

У цій роботі розглянуто технологію використання низькотемпературної плазми для реалізації плазмохімічних процесів нанесення захисних покриттів із нітриду титану Ti-N при торцевому напиленні лопаток компресорів.

В основу розробки такої технології покладені результати досліджень, наведених в працях [5; 6; 7], – отримання металевих плазмових струменів шляхом електричного вибуху фольги або проволочки у спеціальному реакторі з подальшим винесенням продуктів на торець лопатки компресора (ГТД).

Теоретично робота такого реактора зумовлена характеристиками енергетичного блока для підризу металу (в нашому випадку – титану), що визначається запасом дії  $n_0$  і енергією  $W_0$ :

$$n_0 = \frac{j_0^2 (Lc)^{0,5}}{2};$$

$$W_0 = \frac{cu_0^2}{2},$$

де  $j_0$  – густина струму короткого замикання;  $L$ ,  $c$ ,  $u_0$  – відповідно індуктивність, ємність і зарядна потужність генератора.

Статистичні дані різних лабораторій [7] за припущеннями, що опором контуру можливо знехтувати, а вибух розраховується в першому півперіоді струму, дають залежності:

$$\frac{W}{W_0} = \left( \frac{n}{n_0} \right)^{0,5}; \quad (1)$$

$$\frac{I_m}{j_0} = 0,75 \left( \frac{n}{n_0} \right)^{0,25},$$

де  $I_m$  – максимальна густина струму в металі під час вибуху.

Співвідношення (1) дозволяє розраховувати вибуховість металу, та його перегрівання  $n \gg h_0$ . Якщо введenu енергію  $W$  віднести до енергії сублімації даного металу  $W_g$  і побудувати експериментальну функцію

$$\frac{W}{W_g} = f(d),$$

де  $d$  – діаметр частинки для різних металів, отримаємо залежність з двома різними областями за розмірами частинок порошку [8], що відображає різний механізм утворення частинок металу.

У першій області утворення частинок зі збільшенням густини введеної енергії змінюється від крапельного до конденсаційного.

У другій області утворення частинок відбувається переважно на центрах конденсації. А стан металу змінюється від рідкого до плазмового.

Одночасно експеримент показує також залежність розмірів частинок металу від густини струму  $I_{mhd}$ .

Для отримання експлуатаційних характеристик, таких, як розмір генерації частинок металу вказані фактори є визначальними.

Одночасно на розмір і функцію розподілення впливає тиск у реакторі та температура екзотермічних реакцій у потоці струменя плазми, для отримання та транспортування дисперсного плазмового струму на мішень у цій роботі застосовано спосіб введення енергії у квазіізохорну діелектричну камеру з боковим соплом, що дозволяє підвищити тиск у камері до значних величин.

При виведенні струменя плазми з реактора в заповнений повітряний простір відбувається хімічна реакція титану з киснем та азотом повітря, що впливає на кінцевий склад продуктів викиду.

Деякі кількісні характеристики імпульсного плазмотрона наведено в праці [5].

## Теоретичні експлуатаційні характеристики мікроплазмового струменя

Припустимо, що весь матеріал, що вибухає в камері, виноситься через кінцеве сопло в затоплений простір, як це показано на рис. 1.

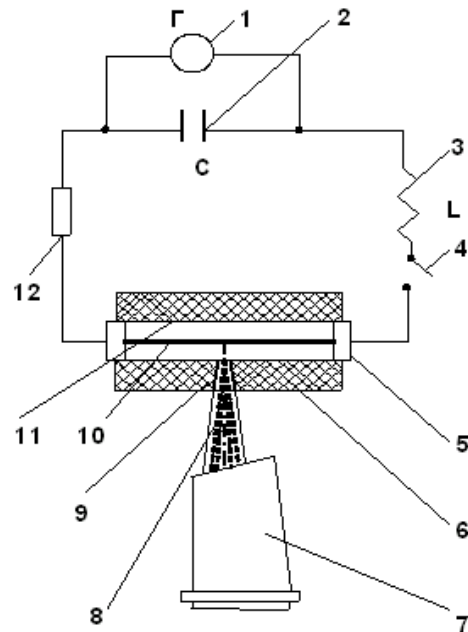


Рис. 1. Схема імпульсного плазмотрона з квазіізохорною вибуховою камерою:

1 – високовольтний генератор; 2 – накопичувальна ємність; 3 – індуктивність; 4 – розрядник; 5 – електроди; 6 – діелектрична вибухова камера; 7 – лопатка компресора; 8 – двофазний плазмовий потік; 9 – сопло; 10 – титанова фольга; 11 – капілярний канал; 12 – опір

Для розрахунку товщини напильника визначимо: – масу напильованого матеріалу

$$m = gV = \rho lhr,$$

де  $V$  – геометричний об'єм фольги:

$$V = lhr; \quad (2)$$

$l, h, r$  – геометричні розміри фольги;  $\rho$  – густина напильованого матеріалу;

– площу плями напильника

$$S_i = \pi R^2;$$

– об'єм циліндра напильника

$$V = h_i S_i;$$

– висоту напильника

$$h_i = \frac{V}{S_i}.$$

Ураховуючи вираз (2), визначимо висоту напильника:

$$h_i = \frac{V}{S_i} = \frac{lhr}{S_i}. \quad (3)$$

Далі розглянемо залежність товщини нанесеного покриття від відстані напилюваної поверхні, розраховуючи площу виходу сопла вибухової камери:

$$S = \pi r_k^2,$$

площа напилення на контрольні поверхні:

$$S_i = \pi k^2. \tag{4}$$

На рис. 2 показано схему конуса напилення із сопла.

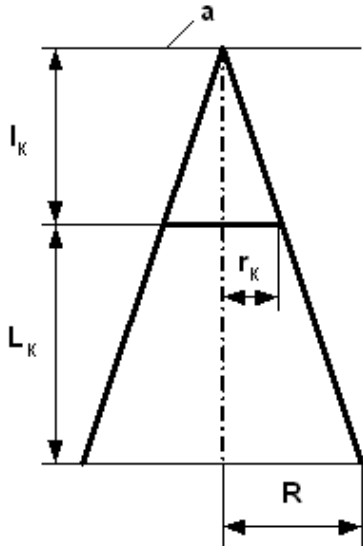


Рис. 2. Схема траєкторії продуктів вибуху із сопла плазмотрона: *a* – вісь капіляра

Складемо співвідношення трикутників:

$$\frac{R}{r_k} = \frac{L_k + l_k}{l_k}. \tag{5}$$

Розв'язавши рівняння (4), (5) відносно відстані  $L_k$ , отримаємо

$$L_k = \frac{l_k R}{r_k} = l_k;$$

$$L_k = l_k \left( \frac{R}{r_k} - 1 \right). \tag{6}$$

З формули (4) отримаємо радіус  $R$

$$R = \sqrt{\frac{S_i}{\pi}}, \tag{7}$$

а з формули (3) – площу плями напилення

$$S_i = \frac{lhr}{h_i},$$

або з умовою (1)

$$S_i = \frac{V}{n_i}.$$

Після підстановки  $S_i$  у формулу (7) отримаємо

$$R = \sqrt{\frac{V}{\pi h_i}},$$

підставимо  $R$  у формулу (6)

$$L_k = l_k \left\{ \sqrt{\frac{lhr}{\pi h_i}} \frac{1}{r_k} - 1 \right\}. \tag{8}$$

Підставимо у вираз (8) дані конкретної вибухової камери:

$$L_k(h_i) = 20 \cdot 10^{-3} \left\{ \sqrt{\frac{20 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3 \cdot 10^{-3}}{3,14 h_i}} \frac{1}{1,66 \cdot 10^{-3}} - 1 \right\}$$

та побудуємо графік отриманої залежності (рис. 3).

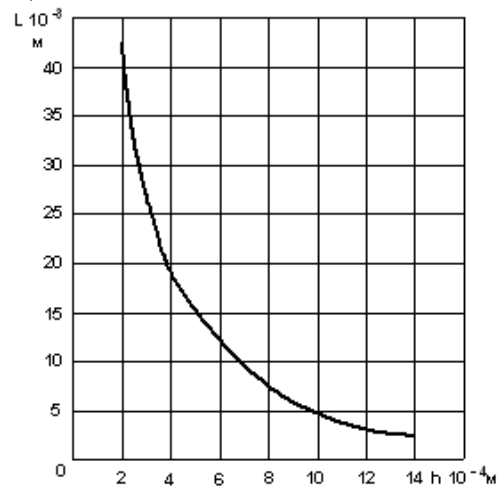


Рис. 3. Залежність товщини напилення від контрольної відстані до осі капіляра плазмотрона

Площу напилення  $S_i$  (рис. 4) від зрізу вибухової камери до напилювальної поверхні визначають за формулою

$$S_i = \frac{lhr}{h_i} = \frac{20 \cdot 2 \cdot 0,3 \cdot 10^{-9}}{h_i}.$$

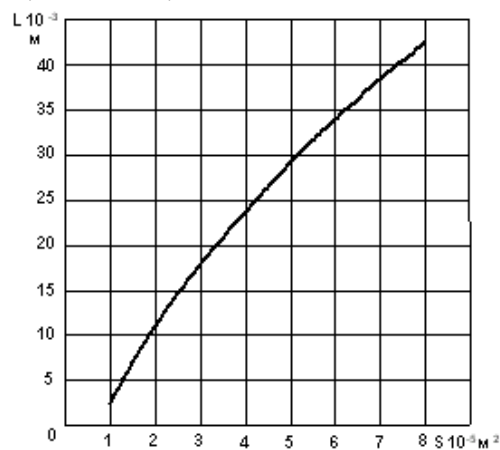


Рис. 4. Залежність площі напилення  $S_i$  від відстані вибухової камери до напилюваної поверхні  $L$

Далі розглянемо технологію напилення покриттів на торець робочих лопаток компресорів низького і високого тиску двигуна Д-36 з урахуванням отриманих теоретичних експлуатаційних характеристик мікросопла імпульсного плазмотрона, характеристики якого описано в праці [6]. Таке сопло апробоване в експерименті для нанесення покриттів на поверхню лопаток турбіни двигуна Д-36. На рис. 5 показано зовнішній вигляд лопаток компресорів, а в табл. 1, 2 наведено геометричні розміри компресорних робочих лопаток двигуна Д-36 для аналізу напилення їх торців.

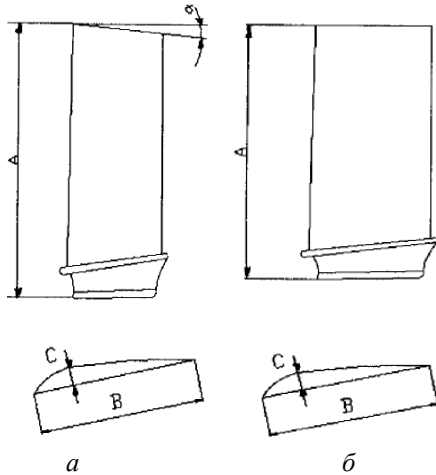


Рис. 5. Зовнішній вигляд та характерні геометричні розміри компресорних робочих лопаток двигуна Д-36:  
 а – лопатка компресора низького тиску;  
 б – лопатка компресора високого тиску

Таблиця 1

**Робочі лопатки компресора низького тиску**

Ступінь	Матеріал	$\alpha$	A, мм	B, мм	C, мм
1	BT3-1	9°50'	124	51	1,76
2	BT3-1	9°50'	98	39	1,68
3	BT3-1	7°30'	79	31	1,66
4	BT3-1	6°08'	66	26	1,31
5	BT3-1	6°08'	55	22	1,32
6	BT3-1	6°08'	48	19	1,12

Таблиця 2

**Робочі лопатки компресора високого тиску**

Ступінь	Матеріал	A, мм	B, мм	C, мм
1	BT-8	49,2	19,5	1,1
2	BT-8	41	18	1,1
3	BT-8	35,3	17,5	1,15
4	BT-8	30	17	1,13
5	BT-8	26,6	16,5	1,1
6	ЭИ438Б-ВД	23,7	16	1,3
7	ЭИ438Б-ВД	22,2	15,5	1,4

Результати аналізу табл. 2 показують:

- Максимальна ширина лопаток, м..... $51 \cdot 10^{-3}$
- Мінімальна ширина лопаток, м..... $16 \cdot 10^{-3}$
- Максимальна товщина лопаток, м..... $1,76 \cdot 10^{-3}$
- Мінімальна товщина лопаток, м..... $1,1 \cdot 10^{-3}$

Ця інформація потрібна для розрахунків напилення в дискретному режимі переміщення лопатки компресора. Беремо одноразову величину напилення  $0,45 \cdot 10^{-3}$  м і знаходимо на рис. 4 площу напилення  $2,64 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>, що відповідає приблизно діаметру плями  $\sim 4 \cdot 10^{-3}$  мм. Перевірка закону збереження маси повністю збігається з вибраними розрахунками.

Загальні оцінки застосування вказаної технології дають таку кількість вибухів для однієї лопатки компресора:

- для максимальної ширини лопатки 13 вибухів;
- для мінімальної ширини лопатки 4 вибухи.

**Висновки**

1. Розроблено методологію застосування імпульсного плазмотрона для напилення торців лопаток компресорів ГТД покриттям.
2. Указана технологія може бути використана в умовах ремонтного підприємства, де є значне відбраковування лопаток компресорів за величиною зносу.

**Література**

1. *Стяжкин В.А., Копылов А.А., Палева С.Я.* Вакумно-плазменные покрытия системы  $T_1-N$  для компрессорных лопаток турбины // Защита металлов. – 2000. – Т. 36, №3. – С. 328–329.
2. *Балков В.П., Башков В.М.* Износостойкие покрытия режущего инструмента: состояние и тенденции развития // Вестн. машиностроения. – 1999. – №1. – С. 35–37.
3. *Самсонов Г.В.* Нитриды. – К.: Наук. думка, 1969. – 378 с.
4. *Ушаков А.В.* Физико-химические свойства электродугового порошка нитрида титана // Изв. вузов. Физика. – 2002. – №11. – С. 61–65.
5. *Орланов В.И.* Получение металлических пленок в технологической установке на апилярном плазмотроне // Вестн. двигателестроения. – 2002. – №1. – С. 132–154.
6. *Игнатович С.Р., Орланов В.И., Чулак О.И.* Розробка технології нанесення нітридних покриттів на лопатки газотурбінних двигунів // Вісн. НАУ. – 2004. – №2(20). – С. 55–59.
7. *Орешкин В.В., Седой В.С., Чемезова Л.И.* Применение электрического взрыва проволочек для получения наноразмерных порошков // Прикл. физика. – 2001. – №3. – С. 94–102.
8. *Котов Ю.А., Яровский Н.А.* Получение порошков металлов // Физика и химия обработки материалов. – 1978. – №4. – С. 24–29.

Стаття надійшла до редакції 23.10.06.