

## ПРОМИСЛОВА ТЕХНОЛОГІЯ НАНЕСЕННЯ ДВОШАРОВИХ ПЛАЗМОВИХ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ НА СОПЛОВІ ЛОПАТКИ ГАЗОВИХ ТУРБІН

**В.А. Акримов<sup>1</sup>, І.М. Гречанюк<sup>2</sup>, Ю.О. Смашнюк<sup>3</sup>, В.Г. Гречанюк<sup>4</sup>, М.П. Любаренко<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект». 54018, м. Миколаїв, пр. Богоявленський, 42-а. E-mail: office@zorya.com.ua

<sup>2</sup>ІПМ ім. І.Н. Францевича НАН України.

03680, м. Київ, вул. Академіка Кржижанівського, 3. E-mail: ipm@nas.gov.ua

<sup>3</sup>НВП «ЕЛТЕХМАШ». 21011, м. Вінниця, вул. Ватутіна, 25. E-mail: vin25ebt@ukr.net

<sup>4</sup>Київський національний університет будівництва та архітектури.

03037, м. Київ, Повітрофлотський просп., 31. E-mail: knuba@knuba.edu.ua

Описано особливості промислової технології осадження плазмових теплозахисних покриттів на лопатки газотурбінних установок з використанням порошків  $\text{CoCrAlYSi}$ , отриманих з відповідних сплавів електронно-променевої плавки. Показано необхідність контрольованої підготовки поверхні лопаток перед нанесенням покриття. Регламентовано час між очищенням поверхні і нанесенням покриття. Вказані оптимальні технологічні параметри нанесення покриття та досліджено їх структурно-хімічний склад. Бібліогр. 5, табл. 1, рис. 3.

*Ключові слова:* плазмові теплозахисні покриття; технологія нанесення; порошки; сплави; лопатки; структура

В державному науково-виробничому комплексі газотурбобудування «Зоря-Машпроект» (м. Миколаїв) широко використовують різні способи (плазмовий, електронно-променевий) для нанесення теплозахисних покриттів на лопатки турбін.

З газотермічних способів напилювання різних матеріалів плазмовий є найбільш прийнятним як з економічної точки зору, так і з можливості напилення покриттів, що відповідають вимогам застосування в газотурбінних двигунах [1, 2].

Плазмовий спосіб нанесення покриттів полягає в формуванні на поверхні деталі (виробу, конструкції) шару з частинок порошку, що володіють певним запасом теплової і кінетичної енергії, отриманої в результаті взаємодії з плазмовим струменем. Температура плазмового струменя досягає 5000...10000 °С, а швидкість витікання — 1000...1500 м/с. У плазмовому струмені частинки порошку нагріваються і набувають швидкість 50...200 м/с. Швидкість польоту частинок порошку залежить від їх розміру, щільності матеріалу, струму дуги, природи і витрати плазмоутворюючого газу.

Перевагами плазмового способу є можливість: отримання покриттів з більшості матеріалів, що плавляться без розпаду та обмеження по температурі плавлення;

використання для утворення плазмового струменя газів різного роду: інертних (аргону, гелію), відновлювальних (водню), окислювальних (повітря, азоту), а також аміаку, природного газу, водяної пари, що в поєднанні із застосуванням камер із захисним середовищем (вакуумом) або захисних насадок доз-

воляє регулювати властивості середовища, в якій нагріваються і рухаються частинки порошку;

гнучкого регулювання електричного і газового режимів роботи плазмотрона, у тому числі в процесі нанесення покриття, що дозволяє управляти енергетичними характеристиками частинок, що напилюють, і умовами формування покриття, а також досить:

висока продуктивність процесу (3...20 кг/год) для плазмотронів з електричною потужністю 30...40 кВт;

високий коефіцієнт використання порошку (0,5...0,7), що залежить в основному від виду матеріалу, що напилюється, і геометричних розмірів деталі.

Недоліками плазмового способу нанесення покриттів у відкритій атмосфері є:

низька для ряду умов експлуатації міцність зчеплення покриттів з підкладкою (10...50 МПа при випробуваннях на нормальний відрив);

висока пористість одержуваних покриттів (2...15 %), що перешкоджає їх застосуванню в корозійних середовищах без додаткової обробки;

невисокий коефіцієнт корисного використання енергії плазмового струменя на нагрів порошку (2...8 %);

високий рівень шуму (110...130 дБ) і світлового випромінювання;

відносно висока вартість обладнання і його стаціонарність.

**Технологія експерименту.** Технологічна схема процесу нанесення теплозахисного плазмового покриття (рис. 1) в залежності від конкретних

І.М. Гречанюк — <https://orcid.org/0000-0002-2609-6018>

умов і типу виробництва, особливостей використовуваного обладнання в реальних технологічних процесах може містити різну кількість операцій і технологічних прийомів.

**Підготовка лопаток для нанесення покриттів.** Перед нанесенням покриття необхідно здійснити спеціальну підготовку, яка очищує поверхню і виводить зі стану термодинамічної рівноваги з середовищем, звільнюючи міжатомні зв'язки поверхневих атомів, тобто хімічно активізує поверхню деталі. Однак активність підкладки швидко знижується через хімічну адсорбцію газів із середовища і окислення. Тому час між операціями підготовки поверхонь і нанесення покриттів максимально скорочують. Крім того попередня обробка поверхні збільшує її шорсткість, що призводить до підвищення температури в контактній під напилюваними частинками на виступах, і сумарну площу ділянок приварювання частинок до підкладки. Шорстка поверхня лопатки має велику площу контактів з покриттям, що також збільшує міцність їх зчеплення.

З метою видалення різних забруднень поверхні лопаток перед нанесенням покриттів ретельно очищають — знежирюють органічними розчинами або миючими препаратами. ГЦП видалається механічною обробкою. Для більш повного видалення масел, які залишаються у внутрішніх порожнинах лопаток, застосовується термічне знежирення, тобто нагрів в муфельних або шахтних печах до температури вигорання масла (260...320 °С).

Для захисту ділянок поверхонь лопатки, що не підлягають покриттю, встановлюються спеціальні екрани і пристосування.

Струменево-абразивна обробка — обов'язкова операція в підготовці лопаток до напилювання.

Струменево-абразивній обробці піддають поверхні, що напилюються з метою додання їм шорсткості і активації в стаціонарних камерах, в яких не допускається обробка лиття або інших деталей для зняття будь-яких забруднень.

Розрив у часі між підготовкою поверхні і напиленням не повинен перевищувати 4-х год.

Після обробки поверхню лопатки обдувають стисненим повітрям для видалення частинок абразиву.

Контроль якості підготовки лопатки проводиться візуальним оглядом. На поверхні після струменево-абразивної обробки не допускається наявність блискучих ділянок. Ознакою добре підготовленої поверхні є рівномірний сірувато-матовий відтінок металу.

Необхідно оберегти підготовлену поверхню від контакту з маслами, жирами, водою, не чіпати руками, при обробці і нанесенні покриттів використовувати чистий знежирений інструмент або рукавиці.

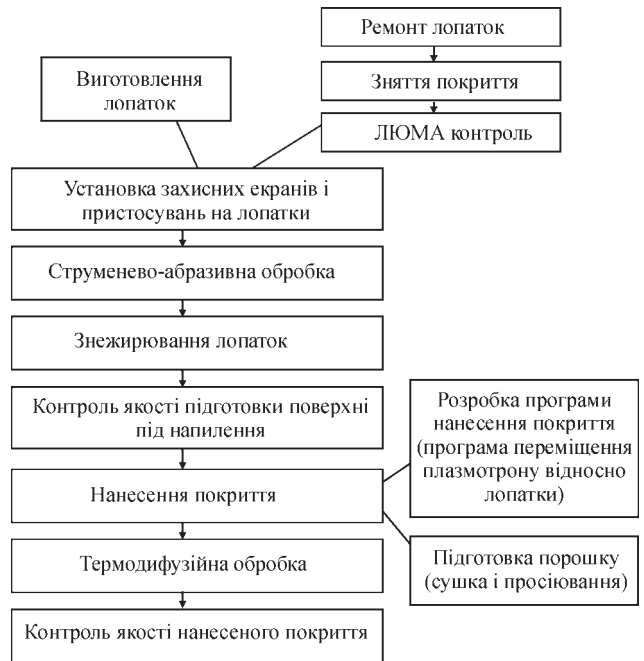


Рис. 1. Технологічна схема процесу нанесення теплозахисного покриття плазмовим напиленням

**Нанесення плазмових теплозахисних покриттів.** Схема установки для нанесення покриттів приведена на рис. 2.

До складу установки для нанесення покриттів також входить роботизована система, що забезпечує рівномірне переміщення плазмотрона відносно трактової поверхні лопаток.

Для нанесення внутрішнього жаростійкого шару двошарового теплозахисного покриття використовуються полікристалічні порошки марок МЗП-10 і МЗП-11. Їх хімічний склад наведено в таблиці [3].

В якості матеріалу зовнішнього керамічного шару використовують порошок ЦрОІ-9 ТУ У 24.1-00201081-049:2005 (стабілізований 9 мас. % оксидом ітрію діоксид цирконію чистотою не нижче 99,5 мас. %) українського виробництва.

Для формування внутрішнього і зовнішнього шарів теплозахисного покриття використовують порошок фракції 40...100 мкм.

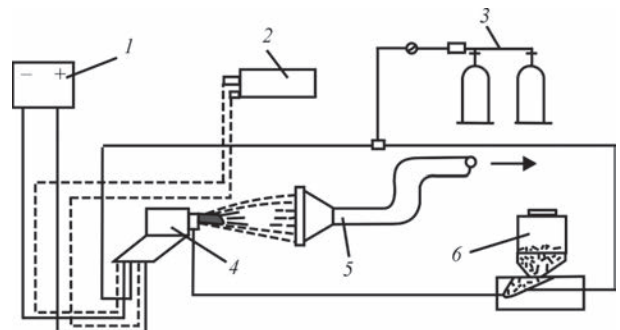


Рис. 2. Схема установки плазмового напилення: 1 — джерело живлення; 2 — ємність з охолоджувальною водою; 3 — плазмотворюючий газ; 4 — плазмотрон; 5 — вентиляція; 6 — порошковий дозатор

Хімічний склад порошків марок МЗП-10 та МЗП-11, мас. %

Порошок	Компоненти, %						Домішки				
	Co	Ni	Cr	Al	Y	Si	Hf	Zr	Fe	Cu	C
МЗП-10	Основа	0...2	26...30	6...9	0,8...1,2	1,5...4,0	до 0,2	до 0,4	до 0,6	до 0,06	до 0,1
МЗП-11	—	—	20...25	10...13	0,4...1,0	—	—	—	—	—	—

*Примітка.* В полікристалічних порошках зі сплавів МЗП-10 і МЗП-11 допускається сумарний вміст Nb + Mo + W + Ti в кількості не більше 1 мас. %.

Нижче приведені технологічні режими нанесення плазмового теплозахисного покриття (ТЗП). При формуванні як металевого, так і керамічного шарів ТЗП використовують порошки фракції 40...100 мкм.

**Режими напилювання  
плазмового теплозахисного шару**

	Металевого	Керамічного
Плазмотрон .....	БГ-5	БГ-5
Напруга дуги, В .....	110±15	110±15
Струм дуги, А .....	200±10	250±10
Плазмоутворюючий газ: .....	Аргон	Аргон
витрата, В/л/хв .....	1,1±0,1/35±2,0	1,1±0,1/35±2,0
Дистанція напилення, мм .....	140±10	120±10
Транспортуючий газ: .....	Аргон	Аргон
витрата, В/л/хв .....	0,4±0,1/3,4±0,5	0,5±0,1/4,7±0,5
витрата порошку, г/хв .....	120±15	50±5
Тиск газу на виході з редуктора балону, МПа .....	0,49±0,0098	0,49±0,0098

Попереднє напилення металевого підшару забезпечує крім жаростійких властивостей покриття високу міцність зчеплення керамічного шару з основою.

Необхідну товщину покриття отримують багаторазовим переміщенням плазмотрону і лопатки відносно один одного. Товщина покриття, отримувана за один прохід — 0,04...0,06 мм.

Товщина покриття оговорюється технічною документацією на лопатки і зазвичай становить, мкм: металевий шар — 135...225; керамічний — 90...120.

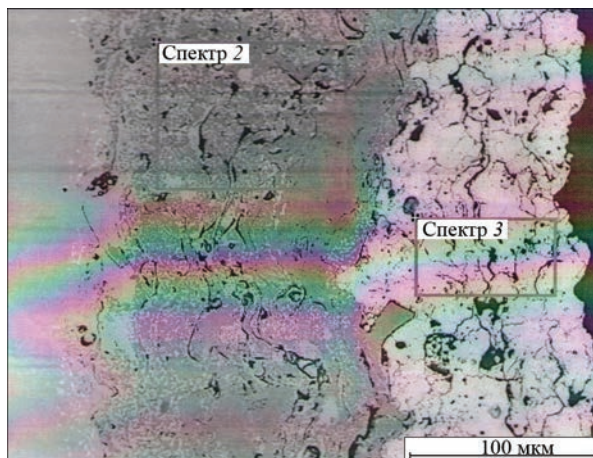
Після закінчення процесу напилення лопатку знімають з оснастки, не допускаючи пошкодження покриття. Захисні ізолюючі пристрої знімають після охолодження деталі до температури повітря в приміщенні.

Для покращення механічних властивостей покриття застосовується термодифузійний відпал. Режими відпалу вибирають у відповідності з матеріалом деталі і покриття.

Типова структура теплозахисного покриття і хімічний склад в окремих точках металевого і керамічного шарів приведені на рис. 3.

В складі внутрішнього жаростійкого шару крім основних компонентів виявлені кисень, вольфрам і молібден, що допускається технічними умовами [3].

Завдяки розробці нової технології отримання металевих порошків CoCrAlYSi [4, 5] вдалось збільшити вміст алюмінію в сплаві з 6...9 мас. %



Спектр	O	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Co	Ni	Y	Zr	Mo	W	Всього
Спектр2	2,32	11,96	1,45		21,79	0,59	59,66	1,01	0,43		0,41	0,37	100
Спектр3	30,61								4,96	64,44			100
Max	30,61	11,96	1,45	0	21,79	0,59	59,66	1,01	4,96	64,44	0,41	0,37	
Min	2,32	0	0	0	0	0	0	0	0,43	0	0	0	

Рис. 3. Типова структура теплозахисного покриття та хімічний склад (мас. %) металевого і керамічного шарів



(МЗП-10) до 10...13 мас. % (МЗП-11) без суттєвого окислення останнього.

В складі зовнішнього керамічного шару крім цирконію, ітрію і кисню інших елементів не виявлено, що свідчить про високу якість вихідного порошку, що використовується для осадження покриття.

Застосування вихідних порошків — металевого з вмістом Al 10...13 % і керамічного без домішок (в першу чергу Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), дозволило в цілому підвищити ресурс роботи лопаток з плазмовим покриттям метал/кераміка в 1,5...1,8 рази.

Підприємство використовувало порошки російського виробництва, які отримували методом атомізації. Якість порошків була надзвичайно низькою. Ресурс лопаток з подібними покриттями складав 15...20 тис. год. На сьогодні при використанні порошків, отриманих по новій технології, він досягає 28...32 тис. год.

## Висновки

1. Покриття, отримані плазмовим напилюванням, відповідають вимогам, що висуваються до теплозахисних покриттів соплових лопаток і сформульовані в технічних умовах підприємства.

2. Плазмові покриття знаходять широке застосування в сучасному виробництві як для надання поверхням деталей спеціальних властивостей, так і для відновлення їх і продовження ресурсу роботи деталей і виробу в цілому.

3. Розроблена промислова технологія нанесення теплозахисних покриттів на лопатки турбін, які виготовляються на ДП НВКГ «Зоря-Машпро-

ект» (м. Миколаїв) з використанням порошків CoCrAlYSi з підвищеним вмістом алюмінію, отриманих за принципово новою технологією.

## Список літератури

1. Beele, W., Marijnissen, G., Van Lieshout, A. (1999) The evolution of thermal barrier coatings — status and upcoming solutions for today's key issues. *Surface and Coatings Technology*, **120–121**, 61–67.
2. Lakiza, S.M., Grechanyuk, M.I., Ruban, O.K. et al. (2018) Thermal barrier coatings: Current status, search and analysis. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **57(1–2)**, 82–113.
3. (2015) ТУ У 27.4-20113410.002–2001: *Материали в слитках и порошках для защитных покрытий*.
4. Гогаєв К.О., Гречанюк М.І., Грибков В.К. та ін. (2012) *Спосіб одержання складнолегованих порошків на основі кобальту*. Україна, Пат. 99557.
5. Гречанюк Н.И., Гогаев К.А., Затовский В.Г. (2012) Особенности получения порошкового сплава Co–Cr–Al–Y–Si. *Порошковая металлургия*, **11–12**, 18–25.

## References

1. Beele, W., Marijnissen, G., Van Lieshout, A. (1999) The evolution of thermal barrier coatings — status and upcoming solutions for today's key issues. *Surface and Coatings Technology*, **120–121**, 61–67.
2. Lakiza, S.M., Grechanyuk, M.I., Ruban, O.K. et al. (2018) Thermal barrier coatings: Current status, search and analysis. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **57(1–2)**, 82–113.
3. (2015) TU U 27.4-20113410.002–2001: *Materials in ingots and powders for protective coatings* [in Russian].
4. Gogaev, K.O., Grechanyuk, M.I., Gribkov, V.K. et al. (2012) *Method for producing of complexly-alloyed powders based on cobalt*. Ukraine, Pat. 99557 [in Russian].
5. Grechanyuk, N.I., Gogaev, K.A., Zatovsky, V.G. (2012) Peculiarities of producing of powder alloy Co–Cr–Al–Y–Si. *Poroush. Metallurgiya*, **11–12**, 18–25 [in Russian].

## INDUSTRIAL TECHNOLOGY OF DEPOSITION OF TWO-LAYER PLASMA HEAT-PROTECTIVE COATINGS ON GAS TURBINE BLADES

V.A. Akrimov<sup>1</sup>, I.M. Grechanyuk<sup>2</sup>, Yu.O. Smashnyuk<sup>3</sup>, V.G. Grechanyuk<sup>4</sup>, M.P. Lyubarenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup>SC GTRDC «Zorya-Mashproekt».

42-a Bogoyavlenskiy Prosp., 54018, Mykolayiv, Ukraine. E-mail: office@zorya.com.ua

<sup>2</sup>Frantsevich IPM NAS of Ukraine. 3 Acad. Krzhynhanovskiy str., 03680, Kyiv, Ukraine. E-mail: ipm@nas.gov.ua

<sup>3</sup>NVP «ELTEKHMASH». 25 Vatutin Str., 21011, Vinnytsia, Ukraine. E-mail: vin25ebt@ukr.net

<sup>4</sup>Kyiv National University of Construction and Architecture.

31 Povitroflotskiy Prosp., 03037, Kyiv, Ukraine. E-mail: knuba@knuba.edu.ua

The peculiarities of the industrial technology of deposition of plasma heat-protective coatings on the blades of gas turbine units using CoCrAlYSi powders obtained from the corresponding alloys of electron-beam melting are described. The necessity of controlled surface preparation of the blades before coating is shown. The time between surface cleaning and coating is regulated. The optimal technological parameters of the coating are indicated and their structural and chemical composition is investigated. Ref. 5, Tabl. 1, Fig. 3.

*Key words: plasma heat-protective coatings; application technology; powders; alloys; blades; structure*

Надійшла до редакції 14.10.2020