

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ КАТОДІВ НА ЯКІСТЬ КОНДЕНСАЦІЙНИХ ЖАРОТРИВКИХ ПОКРИВІВ

*В. С. ЄФАНОВ, В. В. КЛОЧИХИН, А. А. СКРЕБЦОВ,
І. А. ПЕТРИК, О. О. ПЕДАШ*

Акціонерне товариство “МОТОР СІЧ”, Запоріжжя

Подано результати порівняльних досліджень якості трубних катодів сплаву системи Me–Cr–Al–Y, виготовлених методами лиття та металургії гранул. За допомогою рентгеноструктурного мікроаналізу оцінено якість покриттів, нанесених на лопатки турбіни методом іонно-плазмового осадження. Проаналізовано вплив технології виготовлення катодів на шорсткість поверхні покриттів робочих лопаток турбіни. За допомогою сканівної растрової електронної мікроскопії оцінено якість поверхні лопаток зі жаротривким покритвом, нанесеним зі застосуванням досліджуваних катодів, а також кількісно – крапельну фазу, з розбиванням її на фракції.

Ключові слова: *турбіна, робочі лопатки, іонно-плазмові покриття, катод, крапельна фаза, шорсткість, литий катод, гранульна металургія.*

Вступ. У сучасному двигунобудуванні для захисту лопаток турбін від гарячої корозії і підвищення жаротривкості використовують багатокомпонентні покриття на основі сплаву системи Me–Cr–Al–Y, які забезпечують їх роботоздатність у широкому інтервалі температур 700...1100°C [1]. Традиційна технологія нанесення таких покриттів заснована на процесах фізичного випаровування металів у вакуумі (PVD). Під час вакуумно-дугового випаровування матеріал конденсує з плазми за високих температур та керованих енергій частинок, що забезпечує підвищену щільність покриття, високу адгезію та дрібнозернисту структуру [2]. Для нанесення покриттів за технологією PVD використовують спеціальні установки, в яких вакуумна плазмова дуга, мігруючи по поверхні катода (матеріалу покриття), створює “хмару” випарованого матеріалу, яка осідає на поверхню лопаток. Методом можна осаджувати велику кількість різноманітних за складом та призначенням покриттів, які застосовують в авіабудівництві та інших сферах машинобудування [3, 4].

Методи досліджень. Для серійного виробництва АТ “МОТОР СІЧ” використовують установки іонно-плазмового нанесення покриттів типу МАП, в яких застосовують трубні катоди, виконані з матеріалу покриття методом лиття в кокіль. При цьому існує висока ймовірність утворення характерних для цієї технології внутрішніх дефектів (пор та ліквіційних явищ), через що суттєво знижується якість нанесення захисних покриттів. Металургією гранул (МГ) вдається отримувати мікрівилки сферичної форми, які кристалізуються з високою швидкістю та практично без дефектів [5], а також поліпшити якість заготовок, а отже, і покриття [6].

Нижче виконано порівняльні дослідження якості катодів, виготовлених традиційним методом лиття і МГ, а також оцінено якість покриттів, які наносять на лопатки турбіни методом PVD.

Аналіз отриманих результатів. Досліджували катоди зі сплаву системи Ni–Cr–Al–Y (СДП-2), отримані литтям у кокіль і МГ. Катод виплавляли, переплавляючи шихтові компоненти сплаву для отримання заданого хімічного складу, на вакуумно-індукційній плавильній установці. Для усунення внутрішньої пористості литий катод піддавали гарячому ізостатичному пресуванню на пресі QUINTUS.

Гранульний катод отримували шляхом компактування в гарячому ізостатичному пресі гранул фракцією до 0,06 mm за температури $1160 \pm 10^\circ\text{C}$ і робочого тиску 100 МПа впродовж 4 h. Для цього використовували гранули, одержані газоструменевим розпиленням розплаву. Після лиття і компактування катоди механічно обробляли, щоб забезпечити необхідні розміри. Під час виготовлення від них відрізали кільцеві фрагменти товщиною 30 mm та довжиною 150 mm для оцінювання якості матеріалу. Склад сплаву катодів визначали методом хімічного аналізу, користуючись вимогами на литі катоди.

Шорсткість і крапельну фазу на поверхні вивчали під бінокулярним мікроскопом STEMI 2000-C. Мікроструктуру катодів – на мікрошліфах, використовуючи мікроскоп “Axio Observer. Dlm” і сканівний електронний “JEOL JSM 6360LA”. Виявили, що склад всіх досліджуваних катодів відповідає вимогам нормативно-технічних документів (НТД) і приблизно однаковий (табл. 1).

Таблиця 1. Хімічний склад катодів зі сплаву системи Ni–Cr–Al–Y (СДП-2)

Методи виготовлення	Вміст елементів, %				
	Al	Cr	Fe	Ni	Y
Лиття	11,5	22,0	0,3	Осн.	–
МГ	12,1	19,7	0,17	Осн.	–
За вимогами НТД	11,0...13,5	18,0...22,0	$\leq 0,3$	Осн.	0,3...0,6

За технічними умовами на литі трубні катоди вміст ітрію розрахунковим і хімічним аналізом складу не встановили. Макроструктурним аналізом у матеріалі обох заготовок катодів пор та тріщин, кількість і розміри яких перевищують вимоги НТД, не зафіксували. Макроструктура гранульного катода дрібнозернистіша проти литого (рис. 1).

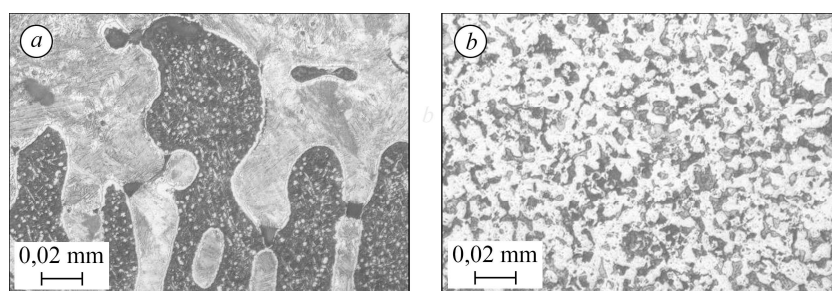


Рис. 1. Мікроструктура досліджуваних катодів: *a* – литий; *b* – гранульний.

Fig. 1. Microstructure of test cathodes:
a – moulded; *b* – isostatic powder compacting (IPC) cathode.

Встановили, що мікроструктура – це γ -твердий розчин з інтерметалідними Ni–Cr–Al та ітрієвими фазами (рис. 1). Рентгеноструктурний мікроаналіз виявив фази Ni–Cr–Al з різною концентрацією елементів (рис. 2 та табл. 2.). Розподіл ітрієвої в гранульному катоді рівномірніший, ніж у литому.

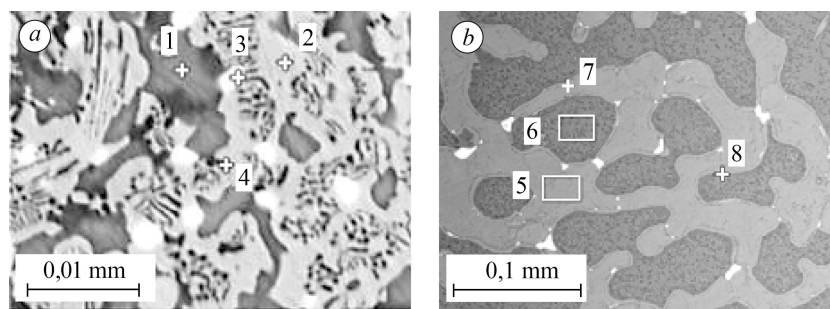


Рис. 2. Результати рентгеноструктурного мікроаналізу гранульного (а) та литого (b) катодів. Цифри – зони вимірювання хімічного складу

Fig. 2. Results of X-Ray crystal microanalysis of IPC (a) and moulded (b) cathodes. Numbers – zones of chemical composition measurements.

Ітрієва фаза в структурі гранульного катода високодисперсна (її розміри не перевищували 0,005 mm), тоді як в структурі литого в деяких випадках – це конгломерати протяжністю понад 0,05 mm.

Дисперсність структури гранульного катода обумовлена застосуванням гранульметричного сплаву (розмір гранул $\leq 0,06$ mm) і відповідною спадковістю, яку отримала заготовка катода під час компактування.

У катодах зафіксували неметалічні включення, граничні розміри яких у гранульному становили до 0,13 mm, а в литому 0,01 mm. При цьому в литому вони мали множинний характер, тоді як в гранульному – одиничний (рис. 3).

Далі на лопатки турбіни, виготовлені з нікелевого жароміцного сплаву ЖС32-ВИ, наносили покриття Ni-Cr-Al-Y, використовуючи досліджувані катооди для порівняльного аналізу та оцінки їх якості. Покриття наносили на серійній установці МАП, параметри технологічного процесу ідентичні для кожного з катодів, товщина покриття 0,03...0,05 mm.

Таблиця 2. Хімічний склад та кількісний вміст елементів у зонах згідно з рис. 2

№ зони	Вміст елементів, %				
	Al	Cr	Fe	Ni	Y
Гранульний катод					
1	20,78	6,54	–	72,68	–
2	12,28	9,14	0,21	78,37	–
3	5,78	12,17	–	61,55	20,5
4	5,12	56,12	–	38,76	–
Литий катод					
5	5,99	32,42	–	61,59	–
6	16,80	15,28	–	67,92	–
7	5,36	4,52	–	66,92	23,21
8	12,89	5,37	–	81,74	–

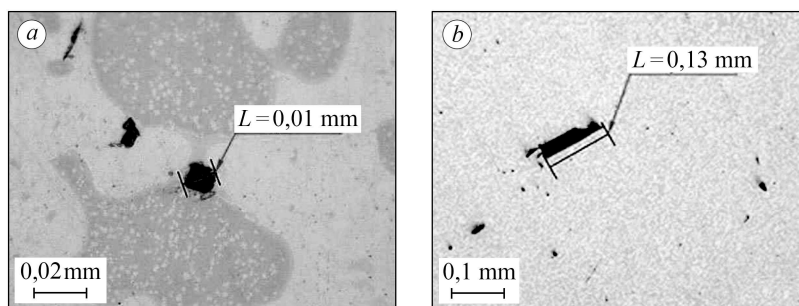


Рис. 3. Неметалічні включення в литому (а) та гранульному (b) катодах.

Fig. 3. Non-metallic inclusions in moulded (a) and IPC (b) cathodes.

Одержано покриття за хімічним складом і товщиною відповідають вимогам НТД. Товщина покриття, нанесеного на трактові поверхні лопаток з допомогою гранульного катода, така ж, як і з використанням литого (табл. 3).

Таблиця 3. Товщина шару покриття на поверхні лопатки

Метод виготовлення катодів	Товщина покриття, mm				
	вхідна кромка	вихідна кромка	спинка пера	корито пера	полиця хвостовика
Лиття	0,037...0,04	0,036...0,04	0,04...0,045	0,035...0,042	0,025...0,035
МГ	0,038...0,042	0,037...0,041	0,041...0,045	0,036...0,044	0,027...0,035

В обох випадках тріщин та відшарувань покриття не виявили. Зчеплення шару з поверхнею лопаток досить міцне (рис. 4 та табл. 4).

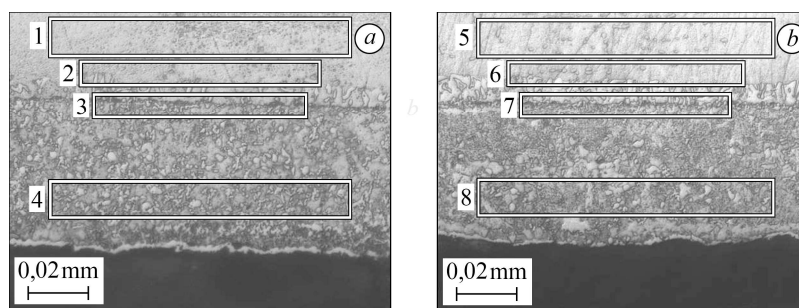


Рис. 4. Знімок мікрошліфа покриття СДП-2 з використанням гранульного (а) та литого (b) катодів. Прямокутниками виділено зони, де вимірювали хімічний склад: 1, 5 – основний матеріал лопатки; 2, 6 – дифузійна зона покриття; 3, 7 – перехідна; 4, 8 – покриття СДП-2.

Fig. 4. Microsection of СДП-2coating, using IPC (a) and moulded (b) cathodes. Rectangles indicate the regions, where chemical composition was measured: 1, 5 – basic material of the blade; 2, 6 – diffusion region of coating; 3, 7 – transient; 4, 8 – СДП-2 coating.

Таблиця 4. Хімічний склад та вміст елементів у зонах згідно з рис. 4

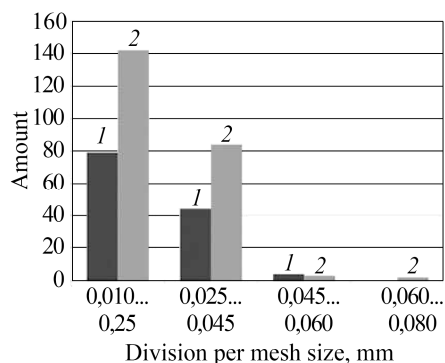
№ зони	Елемент, %						
	Покриття, отриманий з гранульного катода			№ зони	Покриття, отриманий з литого катода		
	Al	Cr	Ni		Al	Cr	Ni
1	6,40	5,38	63,32	5	6,13	5,39	62,58
2	8,68	11,11	69,47	6	7,62	9,44	67,67
3	7,19	24,98	59,31	7	8,65	22,62	60,67
4	7,75	19,05	68,28	8	7,54	19,98	67,05

Слід зауважити, що шорсткість поверхні лопаток з покриттям Ni–Cr–Al–Y залежить від вмісту крапельної фази, яка є невід'ємною частиною плазмового потоку, під час електродугового розпилення матеріалу катода. Її кількість і розміри залежать від багатьох параметрів процесу (матеріалу катода, струму дуги, відстані до оброблюваної поверхні тощо). В цьому випадку, за аналогічних параметрів нанесення, ці характеристики на поверхні лопатки залежать тільки від стану матеріалу, який випаровується з катодів, тобто від технології їх отримання.

За допомогою сканівної растрової електронної мікроскопії аналізували якість поверхні лопаток з покритвом Ni–Cr–Al–Y, нанесеним зі застосуванням досліджуваних катодів, і кількісно оцінювали крапельну фазу з розбиванням на фракції, на фіксованій площі кожного з порівнюваних зразків-лопаток (рис. 5).

Рис. 5. Розподіл крапельної фази на поверхні лопаток за фракціями.
 1 – покриття, отриманий з катодів, виготовлених металургією гранул;
 2 – покриття, сформований з катодів, виготовлених литтям.

Fig. 5. Division per mesh size of condensation phase on the blade surface.
 1 – IPC cathode; 2 – moulded cathode.



Покриття (рис. 4), отриманий з допомогою гранульного катода, має вдвічі менше крапельної фази розміром 0,01...0,045 mm і нема крапельної фази розміром більше 0,065 mm, що забезпечує нижчу шорсткість поверхні лопатки проти варіанта, де використовували литий катод (табл. 5), а отже, кращу якість поверхні лопатки (рис. 6).

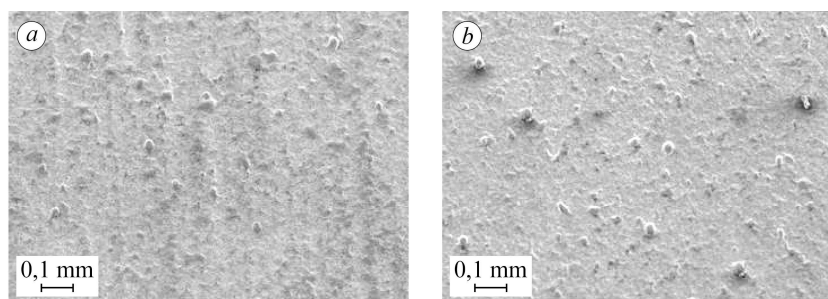


Рис. 6. Зовнішній вигляд крапельної фази на поверхні лопатки після нанесення покриття з використанням гранульного (а) та литого (б) катодів.

Fig. 6. View of condensation phase on the blade surface after coating deposition using IPC (a) and moulded (b) cathodes.

Таблиця 5. Результати виміру шорсткості лопаток після нанесення покриттів

Метод виготовлення катодів	Шорсткість лопатки R_a , μm	
	спинка	корито
Лиття	2,21	2,02
МГ	1,56	1,31

Під час експлуатації катоди, виготовлені МГ, рівномірніше випаровуються з поверхні, через що збільшується кількість їх робочих циклів.

ВИСНОВКИ

Застосовуючи технологію металургії гранул під час виготовлення катодів, можна сформувати щільну дисперсну макро- і мікроструктуру, що відрізняється однорідним фазовим складом і рівномірним розподілом структурних складників. При цьому в ній відсутні властиві методу лиття пори та тріщини. Покриття, отриманий зі застосуванням гранульного катода, має дрібнішу крапельну фазу на по-

верхні лопаток, що поліпшує їх шорсткість і стан трактових поверхонь. Катоди, виготовлені за технологією металургії гранул, порівняно з литими, забезпечують стабільну роботу установки і подовжують термін експлуатації катодів.

РЕЗЮМЕ. Представлены результаты сравнительных исследований качества трубных катодов сплава системы Me–Cr–Al–Y, изготовленных методами литья и металлургии гранул. С помощью структурного микроанализа оценено качество покрытий, нанесенных на лопатки турбины методом ионно-плазменного осаждения. Проанализировано влияние технологии изготовления катодов на шероховатость поверхности покрытий рабочих лопаток турбины. С помощью сканирующей растровой электронной микроскопии оценены качество поверхности лопаток с жароупорным покрытием, нанесенным с помощью исследуемых катодов, а также капельная фаза, с разбивкой на фракции.

Ключевые слова: турбина, рабочие лопатки, ионно-плазменные покрытия, катод, капельная фаза, шероховатость, литой катод, гранульная металлургия.

SUMMARY. The results of comparative study of the quality of Me–Cr–Al–Y tube cathodes obtained by moulding and isostatic powder compacting are presented. The quality of coatings ion-plasma deposited on turbine blades with these cathodes is evaluated using the X-Ray crystal microanalysis. Cathode manufacturing impact on the surface roughness of turbine rotor blade coatings is discussed. The quality of blades surface with heat-resistant coatings deposited with test cathodes is SEM-evaluated, and quantitative evaluation of condensation phase is made with a division per mesh size.

Keywords: turbine, working blade, ion-plasma coatings, cathode, drop phase, roughness, moulded cathode, granulated metallurgy.

1. *Ионно-плазменні покриття для лопаток газотурбінних двигунів* / Е. Н. Каблов, С. А. Мубояджян, С. А. Будиновський, А. М. Луценко / *Метали*. – 2007. – № 5. – С. 23–34.
2. *Каблов Е. Н.* Литые лопатки газотурбинных двигателей. – М.: Московск. ин-т стали и сплавов, 2001. – 632 с.
3. *Абраимов Н. В.* Высокотемпературные материалы и покрытия для газовых турбин. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
4. *Вплив термодифузійних покривів на механічні властивості титанового сплаву VT14* / А. Т. Пічугін, О. І. Яськів, О. Г. Лук'яненко, І. М. Погрелюк // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2012. – 48, № 4. – С. 111–117.
(*Influence of thermodiffusion coatings on the mechanical properties of VT14 titanium alloy* / А. Т. Pichuhin, О. І. Yas'kiv, О. Н. Luk'yanenko, І. М. Pohrelyuk // *Materials Science*. – 2013. – 48, № 4. – P. 538–545.)
5. *Логунов А. В., Шмотін Ю. Н.* Сучасні жароміцні нікелеві сплави для дисків газових турбін. – М.: Наука і технології, 2013. – 264 с.
6. *Отримання мішеней для високоякісних покриттів з інтерметалідів нікелю методом металургії гранул* / А. Г. Береснев, А. В. Логунов, А. І. Логачева, С. Г. Кравцов / *Політ*. – 2008. – № 11. – С. 49–51.

Одержано 17.04.2018