

УДК 621.452.3.03-226:621.793.74.015

doi: 10.32620/aktt.2021.6.04

В. С. ЄФАНОВ¹, О. О. ПЕДАШ¹, І. А. ПЕТРИК¹, В. В. КЛОЧИХИН¹,
Р. Ю. ФЕТІСОВ¹, Г. М. ЛАПТЄВА²

¹ АТ «МОТОР СІЧ», Запоріжжя, Україна

² Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИПАРОВУЄМИХ КАТОДІВ НА ЯКІСТЬ ІОННО-ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ ЛОПАТОК ТУРБІН

Предметом вивчення в статті є покриття нанесені на лопатки турбін методом іонно-плазмове осадження з використанням трубних катодів сплаву Ni-Cr-Al-Y, виготовленні методами гранульної металургії та за допомогою електронно-променевого переплаву. **Метою** є проаналізувати вплив технології виготовлення катодів на шорсткість поверхні покриттів робочих лопаток турбіни. **Завдання:** визначити мікроструктуру та хімічний склад дослідних катодів; оцінити якість поверхні лопаток з жаростійким покриттям, нанесене із застосуванням дослідних катодів; кількісно оцінити крапельну фазу жаростійкого покриття лопаток, з розбиванням її на фракції за розміром. Використовуваними **методами** є: металографічне дослідження, скануюча растрова електронна мікроскопія. Отримані такі **результати**. В мікроструктурі обох досліджуваних катодів виявлено основний γ-твердий розчин з інтерметалідними Ni-Cr-Al та ітрієвими фазами. При цьому, розподіл ітрієвої фази в гранульному катоді більш рівномірний, ніж у катоді отриманим електронно-променевим переплавленням. Проведене металографічне дослідження показало, що ітрієва фаза в структурі гранульованого катода високодисперсна, з розмірами до 5 мкм, і є наслідком структурної і розмірної спадковості отриманої під час компактування гранульної заготовки катода. Структура катода отриманого електронно-променевим переплавленням являла собою серію розгалужених за об'ємом конгломератів інтерметалідних фаз протяжністю понад 50 мкм. Встановлено відповідність хімічного складу досліджуваних катодів вимогам нормативно-технічних документів. Після нанесення покриттів на лопатки турбін конденсаційним методом із досліджуваних катодів, не було виявлено відшарувань, а за товщиною вони відповідали нормативно-технічній документації. Аналізом розподілу крапельної фази за поверхню лопаток встановлено, що покриття з використанням гранульного катода характеризується повною відсутністю крапельної фази розміром більше 65 мкм, та має вдвічі менше крапельної фази розміром 25...45 мкм у порівнянні з катодом отриманим електронно-променевим переплавленням. **Висновки.** Покриття отримане зі застосуванням гранульного катода має дрібнішу крапельну фазу на поверхні лопаток, що поліпшує їх шорсткість і стан трактових поверхонь. Застосування технології металургії гранул при виготовленні катодів, застосовуваних для нанесення покриття, забезпечує стабільну роботу установки і подовжує термін експлуатації катодів, порівняно з катодами виготовлени електронно-променевим переплавом.

Ключові слова: іонно-плазмові покриття; катод; крапельна фаза; шорсткість; електронно-променевий переплав; гранульна металургія.

Вступ

У сучасному двигунобудуванні для захисту лопаток турбін від гарячої корозії і підвищення жароміцності використовують багатокомпонентні покриття на основі сплаву системи Me-Cr-Al-Y, які забезпечують їх працездатність у широкому інтервалі температур 700...1100°C [1-3]. 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 [4]. Для нанесення покриттів за технологією

PVD використовують спеціальні установки, в яких вакуумна плазмова дуга, мігруючи по поверхні катода (матеріалу покриву), створює «хмару» випарованого матеріалу, яка осідає на поверхню лопаток. Методом можна осаджувати велику кількість різноманітних за складом та призначенням покриттів, які застосовують в авіабудуванні та інших сферах машинобудування [5, 6].

Методи досліджень

Металургією гранул (МГ, ГМ) вдається отримувати мікроставки сферичної форми [7, 8], які кристалізуються з високою швидкістю та практично без дефектів, а також поліпшити якість заготовок, а отже,

і покриття [9, 10]. Для серійного виробництва на АТ «МОТОР СІЧ» використовують установки іонно-плазмового нанесення АПН-250, в яких застосовують трубні катоди. При цьому циліндрична форма катода і його розмір є причиною утворення характерних дефектів (пор та ліквіційних явищ), через що, в подальшому, суттєво знижується якість нанесення захисних покриттів.

Нижче наведено результати порівняльного дослідження якості катодів, виготовлених методом ГМ та електронно-променевого переплаву (ЕПП), а також оцінено якість покриттів, які наносять на лопатки турбіни методом PVD.

Аналіз отриманих результатів

Досліджували катоди зі сплаву системи Ni-Cr-Al-Y, отримані методом ГМ і ЕПП.

Гранульний катод отримували шляхом компактування в гарячому ізостатичному пресі гранул фракцією до 60 мкм за температури $1160 \pm 10^\circ\text{C}$ і робочого тиску 100 МПа впродовж 4 год. 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 мм та довжиною 150 мм для оцінювання якості матеріалу. Склад сплаву катодів визначали методом хімічного аналізу, користуючись вимогами на литі катоди [11].

Трубчасту заготовку ЕПП катоду, виготовляють переплавом шихтових компонентів сплаву для отримання заданого хімічного складу, на електронно-променевої установці L-4 [12].

Шорсткість і крапельну фазу на поверхні покриття 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 NiCrAlY

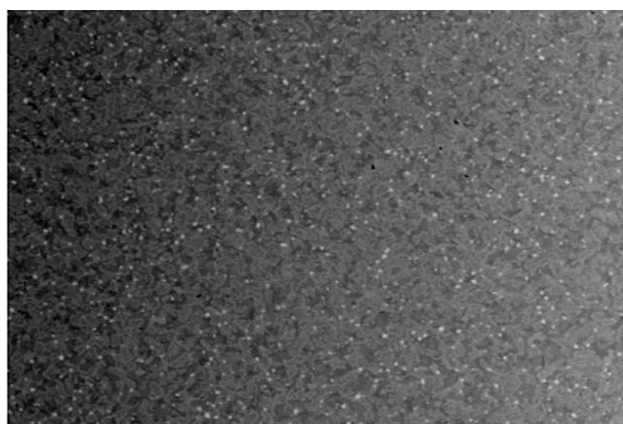
Методи виготовлення	Вміст елементів, %			
	Al	Cr	Ni	Y
ЕПП	12,5	21,8	Осн.	-
ГМ	12,1	19,7	Осн.	-
За вим. НТД	11,0...13,5	19,0...22,0	Осн.	0,3...0,6

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 фіксували. Макроструктура гранульного катода більш дрібнозеренна у порівнянні із катодом виготовленим методом ЕПП (рис. 1).

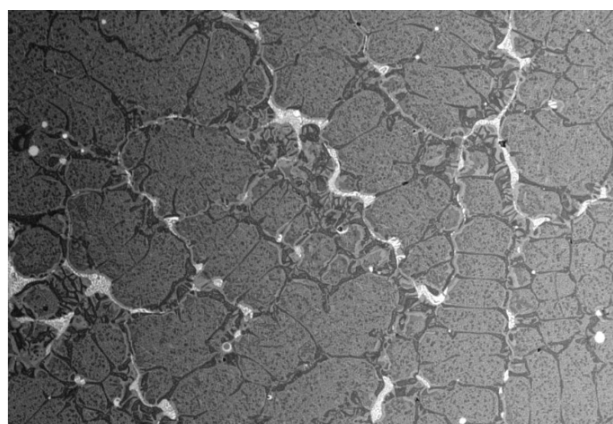
Встановлено, що мікроструктура катодів являє собою γ -твердий розчин з інтерметалідами Ni-Cr-Al та ітрієвими фазами (рис. 1). Рентгено-структурний мікроаналіз виявив фази Ni-Cr-Al з різною концентрацією елементів (рис. 2, 3 та табл. 2). Розподіл ітрієвої в гранульованому катоді більш рівномірний, ніж у ЕПП катоді.

Ітрієва фаза в структурі гранульного катода високодисперсна (її розміри не перевищували 5 мкм), тоді як в структурі литого в деяких випадках – це конгломерати протяжністю понад 50 мкм.

Дисперсність структури гранульного катода обумовлена гранулометриєю сплаву (розмір гранул ≤ 60 мкм) і відповідною спадковістю, яку отримала заготовка катода під час компактування [13].



а



б

Рис. 1. Мікроструктура досліджуваних катодів:
а – гранульний катод; б – ЕПП катод

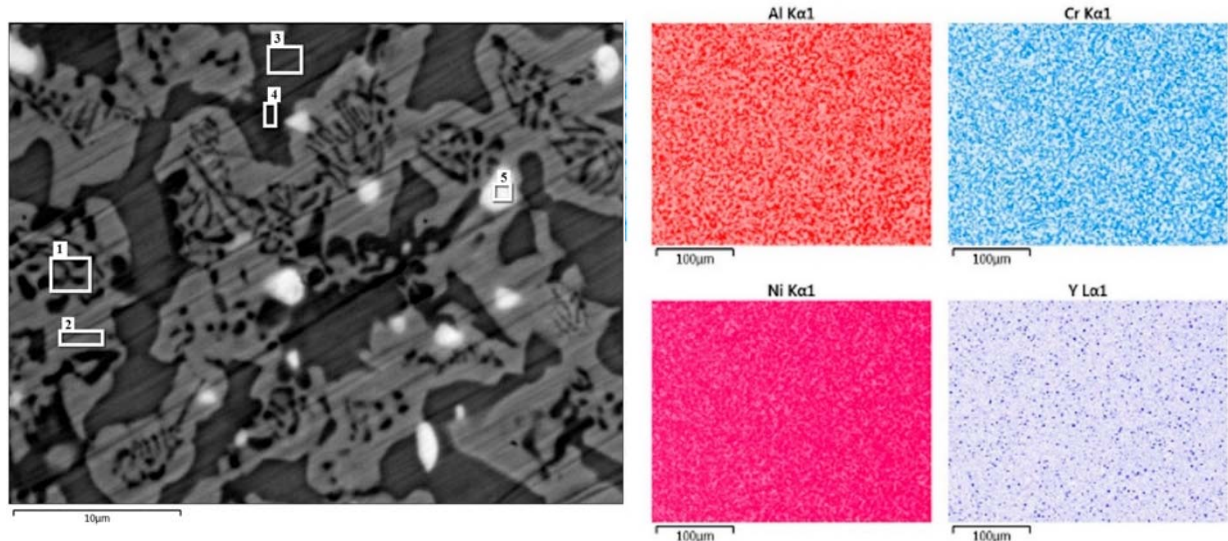


Рис. 2. Результати рентгеноструктурного мікроаналізу та структурного картування гранульного катоду.
Цифрами позначено зони вимірювання хімічного складу

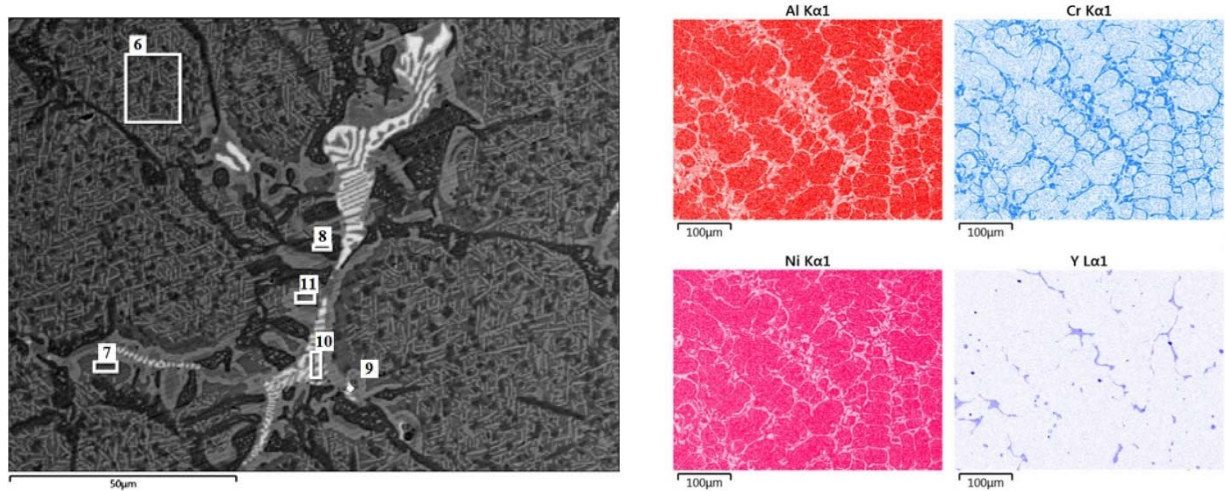


Рис. 3. Результати рентгеноструктурного мікроаналізу та структурного картування ЕПП катоду.
Цифрами позначено зони вимірювання хімічного складу

Таблиця 2

Хімічний склад та кількісний вміст елементів у зонах згідно з рис. 2 та рис. 3

№ зони	Вміст елементів, %			
	Al	Cr	Ni	Y
Гранульний катод				
1	7,79	33,93	58,14	0,14
2	12,17	8,21	79,62	0,00
3	20,56	5,62	73,82	0,00
4	8,91	3,83	34,11	0,52
5	5,68	44,00	66,71	23,79
ЕПП катод				
6	15,56	15,77	68,67	0,00
7	19,05	9,60	71,35	0,00
8	1,82	78,67	19,51	0,00
9	6,98	21,71	48,99	22,32
10	6,15	15,56	63,42	14,87
11	11,07	14,67	74,05	0,21

Далі на лопатки турбіни, виготовлені з нікелевого жароміцного сплаву ЖС32-ВІ, наносили покриття Ni-Cr-Al-Y, використовуючи досліджувані катоди для порівняльного аналізу та оцінки їх якості. Покриття наносили на серійній установці МАП, параметри технологічного процесу ідентичні для кожного з катодів, товщина покриття 30...50 мкм.

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

В обох випадках тріщин та відшарувань пок-

риття не виявлено. Зчеплення шару з поверхнею лопатки досить міцне (рис. 4 та табл. 4).

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 [11, 13-15].

Таблиця 3

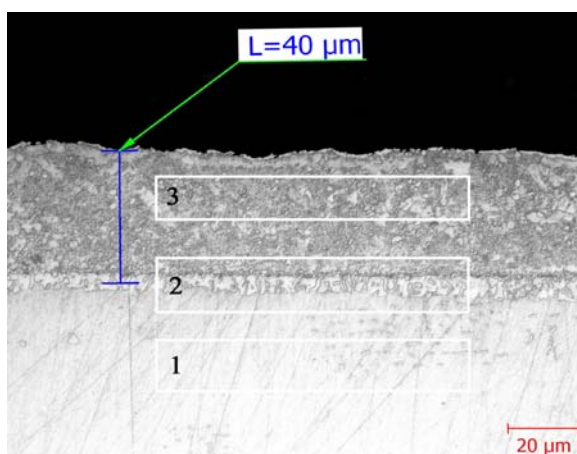
Товщина шару покриття на поверхні лопатки

Метод виготовлення катодів	Товщина покриття, мкм				
	Вхідна кромка	Вихідна кромка	Спинка пера	Корито пера	Полиця хвостовика
МГ	38...42	37...41	41...45	36...44	27...35
ЕПП	40...42	38...42	41...43	36...41	26...32

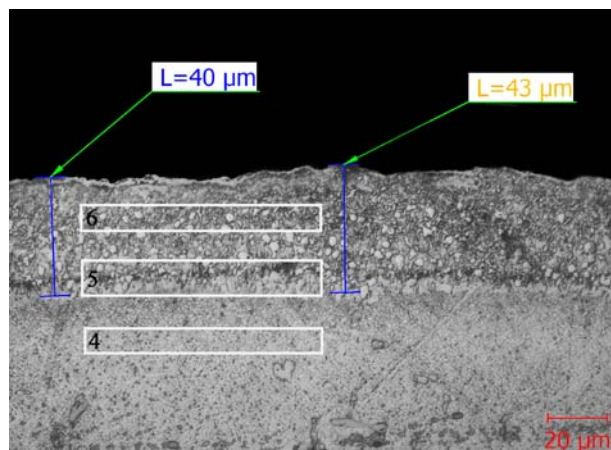
Таблиця 4

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

№ зони	Вміст елементів, %					
	Al	Cr	Ni	Y	W	Co
1	6,22	5,12	62,89	-	11,34	9,38
2	7,84	18,3	64,39	0,29	4,32	2,01
3	8,95	20,65	69,26	0,47	-	-
4	5,93	5,27	61,4	-	13,41	9,31
5	8,46	18,16	63,3	0,2	5,16	1,98
6	9,71	19,72	68,4	0,35	-	-



а



б

Рис. 4. Хімічний аналіз складу покриття Ni-Cr-Al-Y, отриманого з використанням:
а – гранульованих катодів; б – ЕПП катодів

За допомогою сканівної растрової електронної мікроскопії аналізували якість поверхні лопаток з покриттям 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).

Покриття, отримане з допомогою гранульованого катода, має вдвічі менше крапельної фази розміром 25...45 мкм і повністю відсутня крапельна фаза розміром більше 65 мкм (рис. 6), що забезпечує нижчу шорсткість поверхні лопатки порівняно з покриттям отриманим ЕПП катодом (табл. 5).

Таблиця 5
Результати виміру шорсткості лопаток після нанесення покриття

Метод виготовлення	Шорсткість лопатки R_a	
	спинка	корито
ГМ	1,56	1,31
ЕПП	2,35	2,2

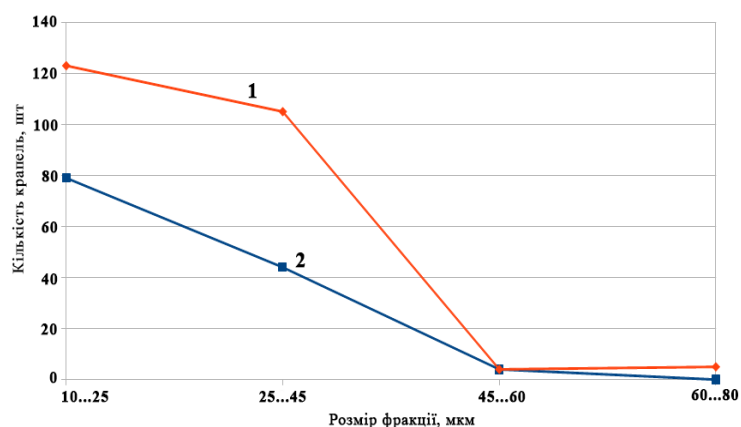
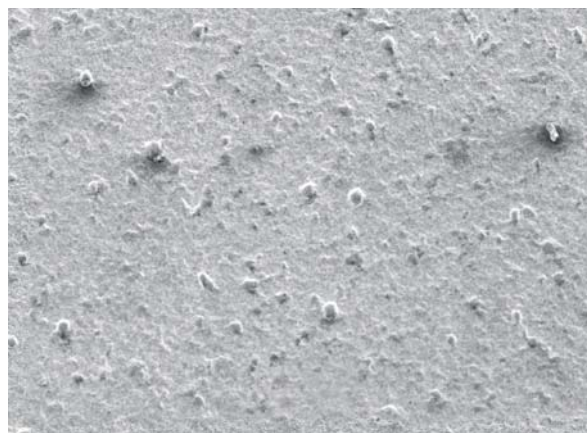


Рис. 5. Розподіл крапельної фази на поверхні лопаток за фракціями:
1 – покриття, нанесене з катодів, виготовлених методом ЕПП;
2 – покриття, нанесене з катодів, виготовлених металургією гранул



а



б

Рис. 6. Зовнішній вигляд крапельної фази на поверхні лопатки після нанесення покриття з використанням:
а – гранульних катодів; б – ЕПП катодів

Під час експлуатації катода, 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, отримане зі застосуванням гранульного катода, має дрібнішу крапельну фазу на поверхні лопаток, що поліпшує їх шорсткість і стан трактових поверхонь. Катоди, виготовлені за технологією металургії гранул, порівняно з електронно-променевим переплавом, забезпечують стабільну роботу установки і подовжують термін експлуатації катодів.

Література

1. Ионно-плазменные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей [Текст] / Е. Н. Каблов, С. А. Мубояджян, С. А. Будиновский, А. М. Луценко // *Металлы*. – 2007. – № 5. – С. 23–34.
2. Каблов, Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей [Текст] / Е. Н. Каблов. – М. : Моск. ин-т стали и сплавов, 2001. – 632 с.
3. Мовчан, Б. А. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме [Текст] / Б. А. Мовчан, И. С. Малащенко ; под ред. Б. Е. Патона. – К. : Наук. думка, 1983. – 232 с.
4. Tamarin, Y. *Protective Coatings for Turbine Blades* [Text] / Y. Tamarin. – ASM International, 2002. – 217 p.
5. Абраимов, Н. В. Высокотемпературные материалы и покрытия для газовых турбин [Текст] / Н. В. Абраимов. – М. : Машиностроение, 1993. – 336 с.
6. Аксёнов, И. И. Техника осаждения вакуумно-дуговых покрытий [Текст] / И. И. Аксёнов, Д. С. Аксёнов, В. А. Белоус. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2014. – 280 с.
7. Гарибов, Г. С. Металлургия гранул жаропрочных никелевых сплавов [Текст] / Г. С. Гарибов, Н. М. Гриц, В. И. Добаткин. // *Технология легких сплавов*. – 2015. – № 2. – С. 34–39.
8. Manufacturing of Ti6Al4V powder for SLM via super-speed plasma rotating electrode process [Text] / L. Yang, Z. Xiaohao, W. Qingxiang, L. Shujin // *2018 World Congress on Powder Metallurgy*. – 2018. – P. 1, 63–70 p.
9. Логунов, А. В. Современные жаропрочные никелевые сплавы для дисков газовых турбин [Текст] / А. В. Логунов, Ю. Н. Шмотин. – М. : Наука и технологии, 2013. – 264 с.
10. Получение мишеней для высококачественных покрытий из интерметаллидов никеля методом металлургии гранул [Текст] / А. Г. Береснев, А. В. Логунов, А. И. Логачева, С. Г. Кравцов // *Поет*. – 2008. – № 11. – С. 49–51.
11. Дослідження впливу технології виготовлення катодів на якість конденсаційних жаротривких покриттів [Текст] / В. С. Єфанов, В. В. Ключихин, А. А. Скребцов, І. А. Петрик, О. О. Педаш // *Фіз.-хім механіка матеріалів*. – 2019. – № 4. – С. 136–141.
12. Электронно-лучевая выплавка трубчатых заготовок из сплавов NiCrAlY, используемых в качестве катодов для ионно-плазменного нанесения покрытий [Текст] / Н. И. Гречанюк, Ю. А. Смаилюк, Е. В. Хоменко, В. В. Ключихин, И. Н. Гречанюк // *Современная электрометаллургия*. – 2019. – № 1. – С. 17–22. DOI: 10.15407/sem2019.01.02.
13. Quality assurance of the GTE cast blades protective coating [Text] / P. Zhemanyuk, V. Klochikhin, V. Shilo, A. Pedash, V. Naumyk // *Material Science and Technology* – 2018. – MS and T 2018. – P. 1536–1541. DOI: 10.7449/2018/MST_2018_1536_1541.
14. Влияние технологии изготовления катодов на качество покрытий лопаток турбины [Текст] / В. С. Ефанов, В. В. Ключихин, А. А. Педаш, В. Г. Шило // *Вестник двигателестроения*. – 2018. – № 1. – С. 132–137. DOI: 10.15588/1727-0219-2018-1-18.
15. A magnetron sputtered microcrystalline B-NiAl coating for SC superalloys. Part I. Characterization and comparison of isothermal oxidation behavior at 1100 °C with a NiCrAlY coating [Text] / S. Hou, S. Zhu, T. Zhang, F. Wang // *Applied Surface Science* – 2015. – Vol. 324. – P. 1–12. DOI: 10.1016/J.APSUSC.2014.10.106.

References

1. Kablov, E. N., Muboyadzhyan, S. A., Budynovskiy, S. A., Lutsenko, A. M. Ionno-plazmennyye pokrytiya dlya lopatok gazoturbinnnykh dvigateley [Ion-plasma coatings for the blades of gas-turbine engines], *Metals*, 2007, no. 5, pp. 23–34.
2. Kablov, E. N. *Lityye lopatki gazoturbinnnykh dvigateley* [Cast Blades of Gas-Turbine Engines], Moscow, Moscow Institute of Steel and Alloys Publ., 2001. 632 p.
3. Movchan, B. A., Malashenko, I. S. *Zharostoykiye pokrytiya, osazhdayemykh v vakuume* [Heat-resistant coatings deposited in vacuum], Kyiv, Scientific opinion Publ., 1983. 232 p.
4. Tamarin, Y. *Protective Coatings for Turbine Blades*. ASM International Publ., 2002. 217 p.
5. Aбраимов, N. V. *Vysokotemperaturnyye materialy i pokrytiya dlya gazovykh turbin* [High-Temperature Materials and Coatings for Gas Turbines], Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993. 336 p.
6. Aksyonov, I. I., Aksyonov, D. S., Belous V. A. *Tekhnika osazhdeniya vakuumno-dugovykh pokrytiy* [Technique of deposition of vacuum arc coatings]. Kharkov, National Scientific Center “Kharkov Institute of Physics and Technology” Publ., 2014. 280 p.
7. Garibov, G.S., Grits, N. M., Dobatkin, V. I. *Metallurgiya granul zharoprochnykh nikelovykh splavov* [Metallurgy of high-temperature nickel alloy pellets]. *Light alloy technology*, 2015, no. 2, pp. 34–39.
8. Yang, L., Xiaohao, Z., Qingxiang, W., Shujin, L. Manufacturing of Ti6Al4V powder for SLM via super-speed plasma rotating electrode process. *World Congress on Powder Metallurgy*, 2018, pp.1, pp. 63–70.
9. Logunov, A. V., Shmotin, Yu. N. *Sovremennyye zharoprochnyye nikelovyye splavy dlya diskov gazovykh turbin* [Contemporary Heat-Resistant Nickel Alloys for the Disks of Gas Turbines]. Moscow, Nauka i Tekhnologii Publ., 2013. 264 p.
10. Beresnev, A. G., Logunov, A. V., Logacheva, A. I., Kravtsov, S. G. *Polucheniye mishani dlya vysokokachestvennykh pokrytiy iz intermetallidov niketya metodom metallurgii granul* [Production of targets for high-quality coatings made of nickel intermetallic compounds by the method of granule metallurgy], *Поет*, 2008, no. 11, pp. 49–51.
11. Yefanov, V. S., Klochykhyn, V. V., Skrebtsov, A. A., Petryk, I. A., Pedash, O. O. *Doslidzhennya vplyvu*

tehnologii vivotovlennya katodiv na yakist kondensatsiynikh zharotrivkikh pokryviv [Investigation of the influence of technology of production of cathodes on the quality of condensation heat-resistant coatings]. *Fiz.-Khim. Mekh. Mater.*, 2019, no. 4, pp. 136-141.

12. Grechanyuk, N. I., Smashnyuk, Yu. A., Khomenko, E. V., Klochikhin, V. V., Grechanyuk, I. N. *Elektronno-luchevaya vyplavka trubchatykh zagotovok iz splavov NiCrAlY, ispolzuemykh v kachestve katodov dlya ionno-plazmennogo nanoseniya pokrytiy* [Electron beam melting of tubular billets from NiCrAlY alloys used as cathodes for ion-plasma coatings]. *Electrometallurgy Today*, 2019, no. 1, pp. 17-22. DOI: 10.15407/sem2019.01.02.

13. Zhemanyuk, P., Klochikhin, V., Shilo, V., Pedash, A., Naumyk, V. Quality assurance of the GTE cast blades protective coating. *Material Science and*

Technology, 2018, MS and T 2018, pp. 1536-1541. DOI: 10.7449/2018/MST_2018_1536_1541.

14. Yefanov, V. S., Klochykhyn, V. V., Pedash, A. A., Shilo, V. G. Vliyaniye tekhnologii izgotovleniya katodov na kachestvo pokrytiy lopatok turbiny [The effect of cathode manufacturing technology on the quality of turbine blade coatings]. *Herald of Aeroenginebuilding*, 2018, no. 1, pp. 132-137. DOI: 10.15588/1727-0219-2018-1-18.

15. Hou, S., Zhu, S., Zhang, T., Wang, F. A magnetron sputtered microcrystalline B-NiAl coating for SC superalloys. Part I. Characterization and comparison of isothermal oxidation behavior at 1100 °C with a NiCrAlY coating. *Applied Surface Science*, 2015, vol. 324, pp. 1-12. DOI: 10.1016/J.APSUSC.2014.10.106.

Надійшла до редакції 10.09.2021, розглянута на редколегії 26.11.2021

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИСПАРЯЕМЫХ КАТОДОВ НА КАЧЕСТВО ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ЛОПАТОК ТУРБИН

*В. С. Ефанов, А. А. Педаш, И. А. Петрик, В. В. Ключихин,
Р. Ю. Фетисов, А. Н. Лаптева*

Предметом изучения в статье являются покрытия, нанесенные на лопатки турбин методом ионно-плазменного осаждения с использованием трубных катодов Ni-Cr-Al-Y, изготовленные методами гранульной металлургии и с помощью электронно-лучевого переплава. **Целью** есть проанализировать влияние технологии изготовления катодов на шероховатость поверхности покрытий рабочих лопаток турбины. **Задание:** определить микроструктуру и химический состав исследуемых катодов; количественно оценить капельную фазу жаростойкого покрытия лопаток, с разделением её на фракции по размеру. **Используемые методы:** металлографические исследования, сканирующая растровая электронная микроскопия. Получено такие **результаты**. В микроструктуре двух исследуемых катодов обнаружено γ -твердый раствор с интерметаллидными Ni-Cr-Al и иттриевыми фазами. При этом, распределение иттриевой фазы в гранульном катоде более равномерное, чем в катоде полученным электронно-лучевым переплавом. Проведенное металлографическое исследование показало, что иттриевая фаза в структуре гранульного катода высокодисперсная, с размерами до 5 мкм, и является следствием структурной и размерной наследственности, полученной вовремя компактирования гранульной заготовки катода. Структура катода, полученного электронно-лучевым переплавом, представляет собой серию разветвлённых по объёму конгломератов интерметаллидных фаз протяженностью более 50 мкм. Установлено соответствие химического состава исследуемых катодов требованиям нормативно-технической документации. После нанесения покрытия на лопатки турбин конденсационным методом из исследуемых катодов, не было обнаружено отслоений, а по толщине они соответствовали нормативно-технической документации. Анализом распределения капельной фазы на поверхности лопаток установлено, что покрытия с использованием гранульного катода характеризуется полным отсутствием капельной фазы размером более 65 мкм, и имеет вдвое меньше капельной фазы размером 25...45 мкм в сравнении с катодом полученным электронно-лучевым переплавом. **Выводы.** Покрытие, полученное с использованием гранульного катода, имеет более мелкую капельную фазу на поверхности лопаток, что улучшает их шероховатость и состояние трактовых поверхностей. Использование технологии металлургии гранул при изготовлении катодов, используемых для нанесения покрытия, обеспечиваем стабильную работу установки и продлевает срок эксплуатации катодов, в сравнении с катодами изготовленными электронно-лучевым переплавом.

Ключевые слова: ионно-плазменные покрытия; катод; капельная фаза; шероховатость; электронно-лучевой переплав; гранульная металлургия.

EFFECT OF EVAPORATED CATHODE MANUFACTURING TECHNIQUE ON QUALITY OF TURBINE BLADES PVD-COATINGS

*V. Yefanov, A. Pedash, I. Petrik, V. Klochikhin,
R. Fetisov, H. Lapteva*

The article considers coatings deposited on turbine blades via plasma vapor deposition (PVD) method with Ni-Cr-Al-Y cathodes obtained using powder metallurgy (PM) and electron beam remelting process (EBMR). The study

analyzes the effect of cathodes manufacturing techniques on surface roughness of rotor turbine blades. Task: to examine a microstructure and chemical composition of the considered cathodes; to quantify a droplet phase of a heat-resistant coating of turbine blades subdivided into size-fractions. Methods used optical microscopy, SEM-analysis. Next results were obtained. In the microstructure of two cathodes under study, it is revealed γ -solid solution with intermetallic Ni-Cr-Al and yttrium-based phases. Simultaneously, distribution of the yttrium phase in the PM-cathode more uniform in compare with EBMR-cathode. Metallographic studies showed that yttrium phase in the structure of the PM-cathode is highly-dispersed, with sizes up to 5 microns, and due to structural and dimensional heredity received during cathode hot isostatic pressing compaction. The structure of the cathode obtained using EBMR-process is a series of the conglomerates of intermetallic phases, with more than 50 microns long, which are branched out on volume. The compliance of the chemical composition of the cathodes under study to requirements of the specifications is established. After the coating deposition on turbine blades by a PVD-method with cathodes under study, were not observed any coating delamination, and their thickness corresponded to the specifications. With a distribution analysis of droplet phase on the turbine blade surface were established that coatings with PM-cathode have been characterized by complete absence of a 65 microns droplet phase, and has half less 25...45 microns droplet phase compared with the EBMR-cathode. Conclusions. The coating with PM-cathode has smaller droplet phase on the turbine blade surface and as a result improved their roughness and gas path surface state. The use of PM in the production of the cathodes for protective coatings provides stable performance of installation and provides long-term operation time of cathodes, compared with the EBMR-cathodes

Keywords: ion plasma coatings; cathode; droplet phase; roughness; electron beam remelting; powder metallurgy.

Сфанов Володимир Сергійович – керівник бюро АТ “МОТОР СІЧ”, Запоріжжя, Україна.

Педаш Олексій Олександрович – канд. техн. наук, керівник бюро АТ “МОТОР СІЧ”, Запоріжжя, Україна.

Петрик Ігор Андрійович – канд. техн. наук, головний зварювальник АТ “МОТОР СІЧ”, Запоріжжя, Україна.

Ключихин Володимир Валерійович – канд. техн. наук, головний металург АТ “МОТОР СІЧ”, Запоріжжя, Україна.

Фетісов Руслан Юрійович – інженер бюро АТ “МОТОР СІЧ”, Запоріжжя, Україна.

Лаптева Ганна Миколаївна – канд. техн. наук, доц. каф. обладнання та технології зварювального виробництва, Національний університет “Запорізька Політехніка”, Запоріжжя, Україна.

Vladimir Yefanov – Chief of bureau “MOTOR SICH” ISC, Zaporozhye, Ukraine,
e-mail: vsyefanov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6363-4081.

Aleksey Pedash – candidate of science, Chief of bureau “MOTOR SICH” JSC, Zaporozhye, Ukraine,
e-mail: tb.ugmet@motorsich.com, ORCID: 0000-0003-1231-9951.

Igor Petrik – candidate of science, Chief Welding Engineer “MOTOR SICH” JSC, Zaporozhye, Ukraine,
e-mail: tb.ugmet@motorsich.com, ORCID: 0000-0001-6600-1661.

Vladimir Klochikhin – candidate of science, Chief Metallurgist Engineer “MOTOR SICH” JSC, Zaporozhye, Ukraine,
e-mail: tb.ugmet@motorsich.com, ORCID: 0000-0002-0754-5543.

Ruslan Fetisov – engineer of bureau “MOTOR SICH” ISC, Zaporozhye, Ukraine,
e-mail: ryufetisov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8398-779X.

Hanna Laptieva – candidate of science, assistant professor of the department of Welding, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporozhye, Ukraine,
e-mail: kafedra_otzv@zntu.edu.ua, ORCID: 0000-0003-4475-2354.