

УДК 621.74

- Ефанов В. С.** ведущий инженер УГМет АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: vsyefanov@gmail.com
- Клочихин В. В.** главный металлург АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com
- Педаш А. А.** канд. техн. наук, начальник бюро ГИПиГМ УГМет АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com
- Шило В. Г.** начальник ОСМ УГМет АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КАТОДОВ НА КАЧЕСТВО ПОКРЫТИЙ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ

**Цель работы.** Проведение сравнительных исследований качества трубных катодов, изготовленных методом литья и металлургией гранул (МГ), а также выполнить оценку качества покрытий, нанесенных на лопатки турбины методом ионно-плазменного осаждения с их применением.

**Методы исследования.** Проведены металлографические исследования влияния технологии изготовления катодов системы Me-Cr-Al-Y на состояние и качество покрытия. С помощью растровой электронной микроскопии проведена оценка влияния метода изготовления катодов на степень шероховатости поверхности покрытия. Проведен рентгеноструктурный микроанализ покрытия Me-Cr-Al-Y, полученного из катодов, изготовленных методами литья и металлургией гранул.

**Полученные результаты.** Уменьшена общая шероховатость поверхности лопаток с ионно-плазменным покрытием за счет использования технологии металлургии гранул. Сформировано плотную, дисперсную макро- и микроструктуру катода, отличающуюся однородным фазовым составом и равномерным распределением структурных составляющих, что обеспечило отсутствие присущих литой структуре рыхлот, пор, трещин. Снижено количество крупной фракции капельной фазы более чем в два раза.

**Научная новизна.** В процессе исследования определено влияние технологии изготовления катодов на качество получаемого покрытия, а также снижена шероховатость поверхности рабочих лопаток турбины. Проведена количественная оценка распределения капельной фазы на поверхности пера лопатки по фракциям.

**Практическая ценность.** Повышен класс чистоты поверхности лопаток турбины с ионно-плазменным покрытием, что способствует улучшению параметров работы двигателя. Повышение стабильности работы оборудования и увеличено количество циклов работы катода за счет уменьшения дефектов литья проявляющихся в процессе нанесения покрытия.

**Ключевые слова:** турбина; лопатка рабочая; ионно-плазменные покрытия; катод; капельная фаза; шероховатость; гранульная металлургия.

### ВВЕДЕНИЕ

В современном двигателестроении для защиты лопаток турбин от горячей коррозии и повышения жаростойкости используют многокомпонентные покрытия на основе системы Me-Cr-Al-Y, обеспечивающие их работоспособность в широком интервале температур 700–1100 °С. Традиционная технология нанесения такого рода покрытий базируется на процессах физического испарения металлов в вакууме. При вакуумно-дуговом испарении конденсация осуществляется из плазмы испаряемого материала покрытия при высоких и управляемых энергиях частиц, что обеспечивает повышенную плотность покрытия, хорошую адгезию, мелкозернистую структуру [1]. Для нанесения покрытий технологией PVD (Physical Vapor Deposition) используются специальные установки, в которых вакуумная плаз-

менная дуга, мигрируя по поверхности трубного катода (материала покрытия) создает «облако» испаренного ионизированного материала, осаждающегося на поверхность лопаток.

### 1 АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В серийном производстве АО «Мотор Сич» применяются установки ионно-плазменного нанесения покрытия типа МАП. Для данных установок используются трубные катоды выполненные из материала покрытия методом литья в кокиль. При этом существует высокая вероятность образования характерных для данной технологии внутренних дефектов, таких как поры, рыхлоты, ликвационные явления, и как следствие, существенно снижающих качество нанесения защитных покрытий. Металлургия гранул (МГ) позволяет получать кристаллизирующиеся с вы-

сокой скоростью микрослитки сферической формы с практически бездефектной структурой [2], а также позволяет улучшить качество получаемых заготовок в целом и соответственно качество наносимого впоследствии покрытия на лопатках [3].

## 2 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Проведение сравнительных исследований качества катодов, изготовленных традиционным литьем и металлургией гранул, а также выполнить оценку качества покрытий, наносимых на лопатки турбины методом PVD.

## 3 ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В качестве материала для исследования использовали катоды из сплава системы Ni-Cr-Al-Y (СДП-2), полученные литьем в кокиль и гранульной металлургией. Выплавку литого катода осуществляли переплавом шихтовых компонентов сплава для получения заданного химического состава на вакуумно-индукционной плавильной установке. Для устранения внутренней пористости литой катод подвергали горячему изостатическому прессованию на прессе фирмы QUINTUS.

Гранульный катод получали путем компактирования в горячем изостатическом прессе гранул фракцией до 0,06 мм при температуре  $1160 \pm 10$  °С и рабочем давлении 100 МПа в течение 4 часов. При компактировании использовали гранулы, полученные газоструйным распылением расплава.

После литья и компактирования катоды подвергали механической обработке для обеспечения требуемых размеров. В процессе изготовления от катодов были отрезаны кольцевые фрагменты толщиной 30 мм для оценки качества материала.

Химический состав сплава катода определяли методом химического анализа. В связи с отсутствием нормативно-технической документации (НТД) на гранульные катоды сравнение химического состава проводили исходя из требований НТД на литые катоды.

Оценку шероховатости и капельной фазы на поверхности покрытия проводили под бинокулярным микроскопом STEMI 2000-C.

Исследование микроструктуры катодов проводили на микрошлифах с использованием микроскопа «Axio Observer. Dlm» и сканирующего электронного микроскопа «JEOL JSM 6360LA».

По результатам химического анализа установлено, что химический состав всех исследуемых катодов, соответствует требованиям НТД и находится примерно на одном уровне (таблица 1).

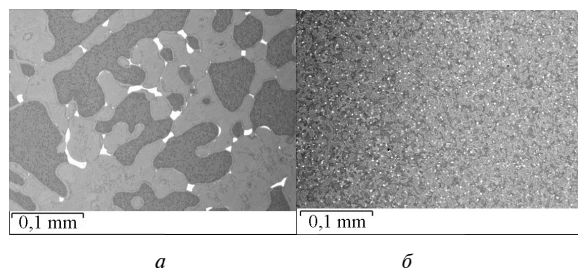
**Таблица 1.** Химический состав исследуемых катодов из сплава Ni-Cr-Al-Y (СДП-2)

Метод изготовления	Содержание элементов, %				
	Al	Cr	Fe	Ni	Y
Литье	11,5	22,0	0,3	Осн.	-
МГ	12,1	19,7	0,17	Осн.	-
Требования НТД	11,0...13,5	18,0...22,0	≤0,3	Осн.	0,3...0,6

Согласно техническим условиям на литые трубные катоды содержание иттрия расчетное и химическим анализом состава не устанавливается.

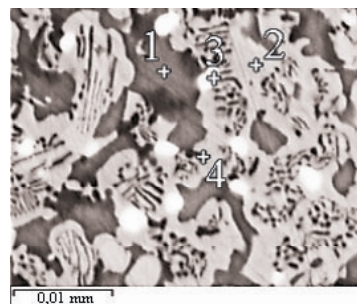
При макроструктурном анализе установлено, что материал обоих заготовок катодов плотный, рыхлот, трещин, по количеству и размерам превышающих требования НТД не обнаружено. Следует отметить, что макроструктура гранульного катода характеризуется более мелкозернистой структурой по сравнению с литым катодом.

При дальнейшем изучении микроструктуры установлено, что она представляет собой  $\gamma$ -твердый раствор с наличием интерметаллидных Ni-Cr-Al и иттриевых фаз (рис. 1).



**Рисунок 1.** Микроструктура исследуемых катодов: а – литой; б – гранульный

По результатам рентгеноструктурного микроанализа установлено наличие Ni-Cr-Al фаз с различной концентрацией элементов (рис. 2, 3, а также табл. 2, 3). Распределения иттриевой фазы имеет более равномерный характер в гранульном катоде, чем в литом.



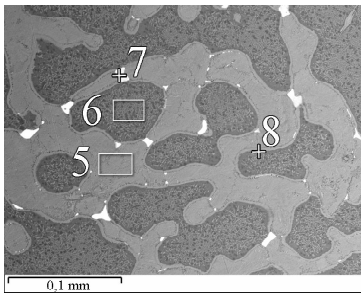
**Рисунок 2.** Результаты рентгеноструктурного микроанализа гранульного катода

**Таблица 2.** Химический состав и количественное содержание элементов в зонах согласно рис. 2

№ зоны	Содержание элементов, %				
	Al	Cr	Fe	Ni	Y
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	-

Следует отметить высокую дисперсность иттриевой фазы в структуре гранульного катода, в частности ее размеры не превышали 0,005 мм, тогда как в структуре литого катода в некоторых случаях она представляла собой конгломераты протяженностью более 0,05 мм.

Дисперсность структуры гранульного катода обусловлена применяемой гранулометрией сплава (размер гранул -  $\leq 0,06$  мм) и соответствующей наследственностью, приобретенной заготовкой катода при компактировании.



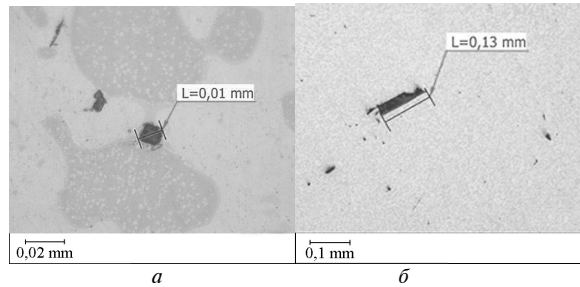
**Рисунок 3.** Результаты рентгеноструктурного микроанализа литого катода

**Таблица 3.** Химический состав и количественное содержание элементов в зонах согласно рис. 3

№ зоны	Содержание элементов, %			
	Al	Cr	Ni	Y
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	-

Отмечено наличие в катодах неметаллических включений. Предельные размеры включений составляли до 0,13 мм в гранульном катоде и 0,01 мм в литом. При этом в литом катоде они имели множественный характер, тогда как в гранульном – единичный (рис. 4).

На лопатки турбины, изготовленные из применяемого никелевого жаропрочного сплава ЖС32-ВИ, было нанесено покрытие Ni-Cr-Al-Y с использованием исследуемых катодов для сравнительного анализа и оценки его качества.



**Рисунок 4.** Неметаллические включения в катодах: а – литом, б – гранульном

Покрытие наносилось на серийной установке АПН-250, параметры технологического процесса идентичны для каждого из катодов, толщина покрытия при этом составляла 0,03...0,05 мм.

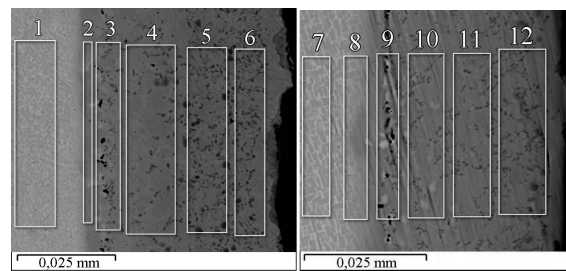
Установлено, что покрытия системы Ni-Cr-Al-Y, полученные с применением исследуемых катодов, по химическому составу и толщине покрытия, соответствуют требованиям НТД.

Результаты измерений толщины покрытия по контрольным поверхностям показывают (таблица 4), что покрытие, нанесенное на трактовые поверхности лопаток с использованием гранульного катода, аналогично по толщине покрытию, полученному с использованием литого катода.

**Таблица 4.** Толщина измерения слоя покрытия на поверхности лопатки

Метод изготовления катодов	Толщина покрытия, мкм				
	вх. кромка	вых. кромка	спинка	корыто	Полка хвостовика
Литье	37...40	36...40	40...45	35...42	25...35
МГ	38...42	37...41	41...45	36...44	27...35

Анализ полученных результатов показывает, что в обоих случаях трещин и отслоений покрытия не обнаружено. Сцепление слоя с поверхностью лопаток достаточно прочное (рис. 5 и табл. 5).



**Рисунок 5.** Результаты рентгеноструктурного микроанализа покрытия СДП-2 с использованием:

а – гранульного катода; б – литого катода

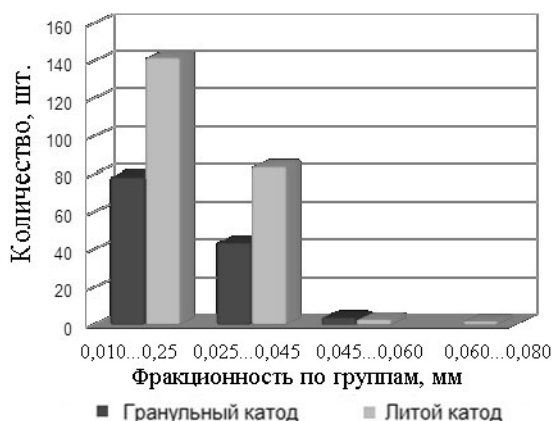
Следует отметить, что шероховатость поверхности лопаток с покрытием Ni-Cr-Al-Y обуславливается наличием капельной фазы, которая является неотъемлемой частью плазменного потока при электродуговом распылении материала

катода. Величина и размеры капельной фазы зависят от многих параметров процесса (материала катода, тока дуги, расстояния до обрабатываемой поверхности, остаточного давления в объеме камеры и т.д.). В данном случае, при аналогичных параметрах процесса нанесения, размер и количество капельной фазы на поверхности лопатки зависит только от состояния испаряемого материала катодов, т. е. в конечном итоге от технологии их получения.

**Таблица 5.** Химический состав и количественное содержание элементов в зонах согласно рис. 5 а, б

№ зоны	Элемент, %						
	Гранульный			№ зоны	Литой		
	Al	Cr	Ni		Al	Cr	Ni
1	6,40	5,38	63,32	7	6,13	5,39	62,58
2	8,68	11,11	69,47	8	7,62	9,44	67,67
3	7,19	24,98	59,31	9	8,65	22,62	60,67
4	7,75	19,05	68,28	10	7,54	19,98	67,05
5	8,14	23,8	65,49	11	8,14	20,58	67,32
6	8,95	20,65	69,26	12	8,9	20,63	67,01

С помощью сканирующей растровой электронной микроскопии оценивали качество поверхности лопаток с покрытием Ni-Cr-Al-Y, нанесенным с применением исследуемых катодов и проводили количественную оценку капельной фазы с разбивкой по фракциям на фиксированной площади каждой из сравниваемых образцов-лопаток (рис. 6).

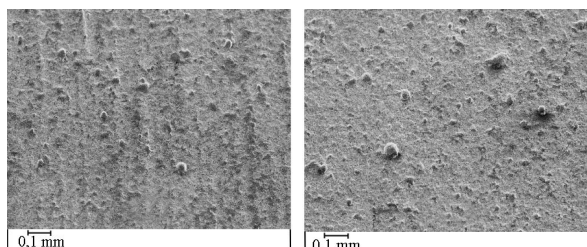


**Рисунок 6.** Распределение капельной фазы на поверхности лопаток по фракциям

Из рис. 6 следует, что покрытие, полученное с применением гранульного катода, имеет в два раза меньше капельной фазы размером 0,01...0,045 мм и полное отсутствие капельной фазы размером более 0,065 мм, что обеспечивает более низкую, шероховатость поверхности лопаток по сравнению с вариантом, в котором использовался литой катод (табл. 6) и соответственно – лучшее качество поверхности лопатки в целом (рис. 7).

**Таблица 6.** Результаты замера шероховатости лопаток после нанесения покрытий

Метод изготовления катодов	Шероховатость пера лопатки Ra, мкм	
	Спинка	Корыто
Литье	2,21	2,02
МГ	1,56	1,31



**Рисунок 7.** Внешний вид капельной фазы на поверхности лопатки после нанесения покрытия с использованием: а – гранульного катода; б – литого катода

Следует отметить, что в процессе эксплуатации, катоды изготовленные МГ, показали более равномерную выработку поверхности, что увеличило количество циклов работы катода.

### ВЫВОДЫ

Применение технологии металлургии гранул при изготовлении катодов позволяет сформировать плотную, дисперсную макро- и микроструктуру, отличающуюся однородным фазовым составом и равномерными распределением структурных составляющих. При этом, в структуре отсутствуют присущие литой структуре рыхлоты, поры, трещины.

Покрытие, полученное с применением гранульного катода, характеризуется более мелкой капельной фазой на поверхности лопаток, что улучшает их шероховатость и состояние трактовых поверхностей лопатки в целом. Применение катодов, изготовленных по технологии металлургии гранул, по сравнению с литыми катодами, обеспечивает стабильную работу установки и увеличивает срок эксплуатации катодов.

В качестве продолжения исследовательских работ в данном направлении авторы планируют провести испытания лопаток с нанесенными покрытиями непосредственно в реальных условиях эксплуатации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей / Е. Н. Каблов– М. : МИСИС, 2001. – 632 с.
- [2]. Логунов А. В. Современные жаропрочные никелевые сплавы для дисков газовых турбин / А. В. Логунов, Ю.Н. Шмотин. – М. : Наука и технологии, 2013. – 264 с.

[3]. Береснев А. Г. Получение мишеней для высококачественных покрытий из интерметаллидов никеля методом металлургии гранул /

А. Г. Береснев, А.В. Логунов [и др.] // Полет. — 2008. — № 11. — С. 49–51.

Статья поступила в редакцию 23.05.2018

- Єфанов В. С.** провідний інженер УГМет АТ «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна, e-mail: [vsyefanov@gmail.com](mailto:vsyefanov@gmail.com)
- Клочихин В. В.** головний металург АТ «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна, e-mail: [tb.ugmet@motorsich.com](mailto:tb.ugmet@motorsich.com)
- Педаш О. О.** канд. техн. наук, начальник бюро ГПіГМ УГМет АТ «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна, e-mail: [tb.ugmet@motorsich.com](mailto:tb.ugmet@motorsich.com)
- Шило В. Г.** начальник ВСМ УГМет АТ «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна, e-mail: [tb.ugmet@motorsich.com](mailto:tb.ugmet@motorsich.com)

## ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ КАТОДІВ НА ЯКІСТЬ ПОКРИТТІВ ЛОПАТОК ТУРБІНИ

**Мета роботи.** Проведення порівняльних досліджень якості трубних катодів, виготовлених методами лиття та металургії гранул (МГ), а також виконати оцінку якості покриттів, нанесених на лопатки турбіни методом іонно-плазмового осадження з їх застосуванням.

**Методи дослідження.** Проведено металографічні дослідження впливу технології виготовлення катодів системи Me-Cr-Al-Y на стан і якість покриття. За допомогою растрової електронної мікроскопії проведено оцінку впливу методу виготовлення катодів на ступінь шорсткості поверхні покриття. Проведено рентгеноструктурний мікроаналіз покриття Me-Cr-Al-Y, отриманого з катодів виготовлених методами лиття і металургією гранул.

**Отримані результати.** Зменшена загальна шорсткість поверхні лопатки з іонно-плазмовим покриттям за рахунок використання технології гранульної металургії. Сформовано щільну, дисперсну макро- і мікроструктуру катода, яка відрізняється однорідним фазовим складом і рівномірним розподілом структурних складових, що забезпечило відсутність властивих литий структурі рихлот, пор, тріщин. Знижена кількість великої фракції «крапельної фази» більш ніж у два рази.

**Наукова новизна.** У процесі дослідження визначено вплив технології виготовлення катодів на якість одержуваного покриття, а також знижена шорсткість поверхні робочих лопаток турбіни. Проведена кількісна оцінка розподілу крапельної фази на поверхні пера лопатки по фракціям.

**Практична цінність.** Підвищено клас чистоти поверхні лопаток турбіни з іонно-плазмовим покриттям, що сприяло поліпшенню параметрів роботи двигуна. Підвищення стабільності роботи обладнання і збільшена кількість циклів роботи катода за рахунок зменшення дефектів лиття, що виявляються в процесі нанесення покриття.

**Ключові слова:** турбіна; лопатка робоча; іонно-плазмові покриття; катод; крапельна фаза; шорсткість; гранульна металургія.

- Yefanov V. S.** Senior Engineer of Chief Metallurgical Engineer Department, MOTOR SICH JSC, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: [vsyefanov@gmail.com](mailto:vsyefanov@gmail.com)
- Klochikhin V. V.** Chief Metallurgical Engineer, MOTOR SICH JSC, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: [tb.ugmet@motorsich.com](mailto:tb.ugmet@motorsich.com)
- Pedash A. A.** Ph.D, Head of HIP&GM Bureau of Chief Metallurgical Engineer Department, MOTOR SICH JSC, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: [tb.ugmet@motorsich.com](mailto:tb.ugmet@motorsich.com)
- Shylo V. G.** Head of Special Metallurgy Division of Chief Metallurgical Engineer Department, MOTOR SICH JSC, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: [tb.ugmet@motorsich.com](mailto:tb.ugmet@motorsich.com)

## THE EFFECT OF CATHODE MANUFACTURING TECHNOLOGY ON THE QUALITY OF TURBINE BLADE COATINGS

**Purpose.** Conducting comparative studies of the quality of pipe cathodes made by casting and granule metallurgy (GM), and assessing the quality of coating applied to blades by ion-plasma deposition with their application.

**Methodology.** Metallographic studies effect of the Me-Cr-Al-Y cathode manufacturing technology on the condition and quality of the coating have been carried out. With the help of scanning electron microscopy, the effect of the cathode manufacturing method on the degree of roughness of the coating surface was evaluated. X-ray diffraction microanalyses of the Me-Cr-Al-Y coating of the cathodes produced by casting and granule metallurgy was carried out.

**Findings.** The overall roughness of ion-plasma coatings is reduced due to the use of granule metallurgy. A dense, dispersed macro- and microstructure of the cathode is formed, differing by a homogeneous phase composition and a uniform distribution of the structural components, which ensured the absence of weaknesses, pores, and cracks inherent in the cast structure. The amount of a large fraction of the «droplet phase» is more than halved.

**Scientific novelty.** In the course of investigation, the influence of cathode manufacturing technology on the quality of the obtained coating was determined, and the surface roughness of the blades was reduced. A quantitative evaluation of the distribution of the droplet phase on the blade airfoil surface by fractions was carried out.

**Practical effect.** The grade of surface cleanliness of ion-plasma coatings is improved, which contributes to the improvement of engine performance. The equipment stability is increased and the number of cathode operation cycles is extended due to the reduction of casting defects appearing during the coating process.

**Key words:** turbine; rotor blade; ion-plasma coatings; cathode; droplet phase; roughness; granule metallurgy.

#### REFERENCES

- [1]. Kablov Y. N. (2006). *Litii lopatki gazoturbinyh dvigatelei*. Moscow : MISIS Publ., 632.
- [2]. Logunov A. V. (2013). *Sovremennyye zharoprochnye splavi dlya diskov gazovyih turbin*. Moscow : Science and technology Publ., 264.
- [3]. Beresnev A. G. (2008). *Poluchenie misheney dlya vyisokokachestvennyih pokrytiy iz intermetallidov nikelya metodom metalurgii granul*. Poliot Publ., 11, 49–51.