

## АНОТАЦІЯ

*Єфанов В.С.* - Удосконалення технології виготовлення литих катодів з нікелевого сплаву для нанесення жаростійких покриттів на лопатки авіадвигунів – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобувача наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 136 - Металургія.

Робота виконана в Національному університеті «Запорізька політехніка» МОН України, Запоріжжя, 2021р.

**Зміст дисертації.** Дисертація присвячена дослідженню принципів впливу металургійних процесів на склад та структуру зливків для виготовлення катодів, вивчення впливу модифікуючих елементів на структуру та властивості жаростійких покриттів, впровадженню нової геометрії та складу катодів у технологію нанесення покриттів на лопатки ГТД (газотурбінних двигунів).

Розглянуто чотири основні металургійні методи виготовлення жаростійкого сплаву Ni-Cr-Al-Y: ВІВ (вакуумно-індукційна виплавка), ЕПП (електронно-променевий переплав), ВДП (вакуумно-дуговий переплав), ГМ (гранульна металургія).

Проведено дослідження впливу металургійних методів виготовлення сплаву Ni-Cr-Al-Y на якісні показники катодів, а саме: хімічна однорідність, дисперсність структури, гомогенність, наявність дефектів.

Кожен з отриманих катодів підлягав перевірці та оцінці як експлуатаційних характеристик роботи на установці (стабільність параметрів нанесення, наявність дефектів та ін.), так і якості отриманого покриття (однорідність хімічного складу, наявність дефектів, розмір крапельної фази та ін.).

Серед багатьох факторів прослідковується залежність крапельної фази не тільки від параметрів нанесення, а й від початкового стану структури матеріалу, що наноситься. Так, найкращі результати за параметром величини крапельної фази показали методи ГМ та ВДП. Оцінку проводили за результатами підрахунку

кількості та розміру крапель на поверхні покриття.

На основі отриманих результатів розподілу структури, хімічних елементів та крапельної фази було обрано оптимальний метод виготовлення. Встановлено, що метод ВДП дозволив зменшити дисперсність сплаву майже в чотири рази порівняно з похідним, при цьому структура сплаву стала більш гомогенною.

Визначившись з методом виготовлення катодів (ВДП) та базовим складом сплаву (Ni-Cr-Al-Y), проводили дослідження з підбору модифікаторів для поліпшення його властивостей та отриманого з нього покриття.

Серед багатьох відомих елементів модифікаторів були обрані ітрій, лантан, гафній та їх сполуки. Всі ці елементи добре поєднуються з базовим складом (нікель, алюміній, хром).

На початку проводили відпрацювання процесів таких як режими плавлення, розрахунок шихтових матеріалів, оцінку впливу металургійних факторів на склад, структуру та геометрію зливків для заготовок катодів. Основна відмінність нової геометрії катодів полягає у виготовленні їх у формі зрізаного конуса з базою багаторазового використання.

Виготовляли сплави з кожним модифікатором окремо та визначали його вплив на структуру сплаву в цілому.

Виходячи з отриманих результатів встановлено, що найбільш ефективним є застосування гафнію та лантану для отримання дрібнішої структури та рівномірного розподілу елементів у складі катода.

Ці елементи активно взаємодіють з домішками - елементами впровадження (переважно з киснем і вуглецем) - і можуть утворювати стабільні карбіди і оксиди на границях розділу в структурі (міжфазні границі, скупчення дислокацій та ін.). Також формують нанорозмірні виділення фаз, які стабілізують структуру сплаву і підвищують його властивості.

Однак, крім отримання якісних зливків, метою є підвищення показників покриття, тож з кожного запропонованого сплава було нанесено покриття на зразок лопатки зі сплаву ЖС32-ВІ. Покриття наносили на установках КІБ та АПН-250, контрольним був зразок зі складом Ni-Cr-Al-Y, нанесений на іонно-плазмовій

установці АПН-250. На отриманих зразках провели металографічні та фізичні дослідження покриттів та порівняння з властивостями існуючих.

Всі отримані покриття мали однакову товщину (30...50 мкм) та бездефектну структуру з рівномірним розподілом елементів, що підтверджено металографічними та металофізичними дослідженнями.

Пересвідчившись у тому, що кожен з модифікаторів не шкодить формуванню якісного шару покриття, розроблені комплексні два сплави з комплексним модифікуванням: Ni-Cr-Al-Y-La та Ni-Cr-Al-Y-Hf-La. Аналогічно до попередніх складів проведені дослідження металографічних, фізичних та механічних властивостей отриманих сплавів.

Встановлено, що зменшення кількості лантану до 0,3% та додавання 0,3% ітрію дозволяє поліпшити дисперсність та стабілізувати параметри нанесення покриття, зменшити швидкість відшарування оксидної плівки алюмінію з поверхні покриття в процесі експлуатації.

Доведено, що додавання 0,2% гафнію дозволяє поліпшити формування жаростійких оксидів хрому та прискорити формування оксиду алюмінію в процесі експлуатації покриття.

Обидва склади покриття за результатами металографічного дослідження мають однорідну бездефектну структуру та рівномірний розподіл елементів. Однак, за фізичними властивостями вони відрізняються.

Наступним етапом роботи було випробування отриманих покриттів на жаростійкість, для чого використовували лабораторну електропіч SNOL 6,7/1300. Кожен із варіантів покриття наносили на зразок зі сплаву ЖС-32ВІ, нагрівали до температури 1150 °С та витримували впродовж 100...400 годин.

За результатами вимірювань втрати маси зразків в процесі випробувань зроблено висновок, що найліпшого результату вдалося досягти додаванням гафнію у склад сплаву. Обидва сплави з гафнієм показали зменшення втрати маси у процесі жаростійких випробувань.

Покриття з комплексом модифікування Y+Hf+La має переваги в жаростійкості та стабільності параметрів випаровування катода, що є більш

перспективним для впровадження в серійне виробництво.

Використовуючи катоди розробленого складу нової геометрії, виготовлені методом ВДП, та режими для промислової установки КІБ, було реалізовано нанесення градієнтного покриття на лопатки турбіни з підвищенням товщини з 50 мкм до 95 мкм на вхідній кромці. Цього неможливо було раніше досягти через технологічні обмеження обладнання та якість катодів.

Так, на вхідній кромці товщина покриття складала  $\sim 95$  мкм, а в середній частині профілю лопатки та вихідній кромці  $\sim 43$  мкм. Використання такого градієнтного нанесення зі збільшеною товщиною забезпечує підвищення ресурсу робочої лопатки турбіни мінімум у два рази. Представлені результати механічної обробки отриманого покриття. Ця робота реалізована в промислових умовах АТ «МОТОР СІЧ» та підтверджена актами впровадження (Додаток А, Додаток Б).

В роботі наведені результати застосування серійної установки КІБ замість установки АПН-250. Це дозволило реалізувати градієнтну схему нанесення покриття та застосувати катоди нової геометрії, що збільшило продуктивність напилення за один робочий цикл. Використання установки КІБ підвищило раціональність використання катодів з жаростійкого сплаву. Так коефіцієнт використання матеріалу катоду на установці АПН-250 складає 35... 0%, на установках КІБ – 70... 0%, що майже у два рази ефективніше.

Показано, що установка КІБ дозволяє розмістити в середині камери у 4 рази більше деталей за рахунок стаціонарного закріплення та розташування катодів по різні сторони камери.

Саме ця конструктивна особливість установки в поєднанні з новою геометрією катодів та оптимізованим складом дозволяє реалізувати принцип градієнтного нанесення шарів покриття. Використовуючи дані, отримані після експлуатації лопаток турбін, розроблена нова схема нанесення покриття. Підраховані максимальні товщини покриття, відпрацьовані режими нанесення та розташування лопаток у камері відносно катодів.

На підставі проведених досліджень на АТ «МОТОР СІЧ» - розроблена комплексна технологія нанесення покриття на трактову поверхню робочих

лопаток турбіни авіаційних двигунів, запропоновані модифіковані склади покриття. Технологія дозволяє збільшити ресурс роботи турбінних лопаток в умовах значних механічних та температурних навантажень. Технологія нанесення здійснена на установках КІБ розробки АТ «МОТОР СІЧ» та підтверджена актом випробувань. Згідно з актом та висновком очікуються такі технологічні та економічні ефекти:

- можливість нанесення градієнтних покриттів за один цикл обробки;
- збільшення втричі завантаження установки лопатками на один цикл нанесення покриття;
- збільшення раціонального використання матеріалу катоду на 35 ... 40 %, що складає економічний ефект більше 3 млн. грн за рік на 2,5 т сплаву.

Випущені розпорядчі документи, згідно з якими з 2024 року на двигунах АИ-450, АИ-450М, АИ-450М1, АИ-450М-П, АИ-450М1-П, АИ-450М-Б, АИ-450М2 серійне покриття робочих лопаток ТК буде замінено на градієнтне.

Спираючись на літературні джерела та власні результати досліджень, встановлено, що чим більша товщина нанесеного шару покриття, тим нижчий клас шорсткості поверхні. Відповідно виникає необхідність проведення обробки поверхні градієнтного покриття. Початкові значення шорсткості градієнтного покриття складають Ra 2,5 ... 3,5.

За допомогою обладнання для спрямованої обробки вібротілами виконано полірування поверхні покриття. Клас чистоти поверхні збільшився у 4 рази і склав Ra 0,6 ... 0,8.

Спираючись на результати механічної обробки, зроблено висновок, що велика і середня за розмірами крапельна фаза повністю відсутні. Кратери на поверхні покриття - це сліди ударів вібротіл та місця відриву крапель. Розроблено дослідно-промислому технологію механічної обробки поверхневого шару градієнтного покриття віброполіруванням із забезпеченням рівномірності знімання покриття, що дозволяє значно знизити шорсткість з Ra 3,2 до Ra 0,4.

Для збільшення ремонтпридатності лопаток розроблена та запатентована технологія зняття жаротривкого покриття методом електролітно-плазмової

обробки.

Отримані висновки з АТ «МОТОР СІЧ», в яких зазначені положення дисертаційної роботи, впроваджені у серійне виробництво лопаток робочих турбін з високим температурно-ерозійним навантаженням на малогабаритних авіаційних двигунах.

Основні положення роботи використовуються при викладанні навчальних дисциплін на кафедрі ОТЗВ в НУ «Запорізька політехніка». Вид та об'єм впровадження: Класифікація жароміцних покриттів та матеріали для катодів, дослідні дані фізико-механічних властивостей іонно-плазмових покриттів у лекційному курсі: «Матеріали для наплавлення та напилення»; способи виробництва витратних електродів для іонно-плазмових покриттів у курсі «Виробництво матеріалів для зварювання наплавлення та напилення»; способи нанесення покриттів на деталі ГТД впроваджені в лекційний курс «Наплавлення та напилення»; методи контролю якості іонно-плазмових покриттів у курсі «Контроль якості покриттів»; залежність якості іонно-плазмових покриттів від параметрів режиму напилення в лабораторні роботи дисципліни «Контроль якості покриттів»; процеси на межі контакту метал-покриття в лекційний курс «Поверхневі фізико-хімічні процеси» (Додаток В).

**Ключові слова:** металургія, зливки, катода, покриття, структура, ресурс, лопатки.

## **ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### **Статті у наукових фахових виданнях України**

1. Yefanov V., Ovchynnykov O., Dzhuhan O., Petrik I. Developing the modification of nickel cathodes for applying the ion-plasma coatings on the parts of aircraft engines. *Eastern-european journal of enterprise technologies*. 2020. №4, P. 6-13. [*Scopus; Google Scholar*].

2. Yefanov V.S., Klochykhyn V.V., Skrebtsov A.A., Petryk I.A., Pedash O.O.

Investigation of the Influence of Technology of Production of Cathodes on the Quality of Condensation Heat-Resistant Coatings. *Materials Science*. 2020. №55 (4), P. 609 – 615. [*Scopus; Web of Science Science; Citation Index Expanded; Google Scholar*].

3. Yefanov V.S, Ovchinnikov A.V., Petrik I.A., Mylenko A.A. Electrolyte-plasma processing of turbine blades for heat-resistant coating removal. *Технологические системы*. 2018. №2. С. 59-65. [*IndexCopernicus; Google Scholar*].

4. Ефанов В.С., Клочихин В.В., Педаш А.А., Шило В.Г. Влияние технологии изготовления катодов на качество покрытий лопаток турбины. *Вестник двигателестроения*. 2018. №1. С. 132-137. [*INSPEC; Index Copernicus; CrossRef; Google Scholar*].

5. Ефанов В.С., Овчинников А.В., Джуган А.А., Ткаченко С.Н., Ждан В.С. Усовершенствование технологии выплавки слитков из никелевого сплава методом вакуумно-дугового переплава. *Металловедение и термическая обработка металлов*. Днепр. 2019. №3(86). С. 45-51. [*Google Scholar*].

6. Овчинников А.В., Теслевич С.М., Тизенберг Д.Л., Ефанов В.С. Технология выплавки слитков для получения катодов из кобальтового сплава способом дугового переплава. *Современная электрометаллургия*. 2019. №1. С. 23-27. [*Google Scholar*].

7. Ефанов В.С., Петрик И.А., Овчинников А.В., Прокопенко А.Н. Нанесение многослойных жаростойких покрытий на лопатки турбины, подверженных эрозионно-коррозионному воздействию. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2017. №8(143). С. 85-89. [*Index Copernicus; CiteFactor; Academic Keys; Infobase Index; WordCat; Google Scholar*].

8. Ефанов В.С., Прокопенко А.Н., Овчинников А.В., Внуков Ю.Н. Эрозионная стойкость лопаток компрессора вертолетных ГТД с различным типами покрытий. *Вестник двигателестроения*. 2017. №1. С. 120-123. [*INSPEC; Index Copernicus; Google*].

9. Єфанов В.С., Шалева Н.В., Омельченко О.С., Омельченко В.А. Розробка складу робочої суміші газів для підвищення якості катодів на основі нікелю для іонно-плазмового напилення. *Вісник Придніпровської державної академії*

*будівництва та архітектури*. 2020. №4(267-268). С. 52-59. [*InfoBase Index; Universal Impact Factor; Open Academic Journal Index; Directory; Indexing of International Research Journals (CiteFactor); Google Scholar*].

#### **Патенти на корисну модель**

10. Електроліт для полірування виробів з титанових сплавів: пат. №135255, МПК (2006.01) С25F 3/04. - № u201900204; заявл. - 08.01.2019; опубл. 25.06.2019.- Бюл. №12.

11. Спосіб видалення жаростійкого покриття з металевої підкладки: пат. № 139936, МПК (2006) С25F 5/00- № u201908195; заявл. - 15.07.2019; опубл. 27.01.2020.- Бюл. №2.

#### **Заявка на патент на винахід**

12. Склад сплаву для нанесення покриття : заява на винахід № u2020 05296 МПК (2020) С23С 30/00, С23С 14/14, С22С 19/05; заявл.17.08.2020.

#### **Тези в матеріалах вітчизняних і міжнародних конференцій**

13. Ефанов В.С., Прокопенко А.Н., Жеманюк П.Д. Эрозионная стойкость лопаток компрессора вертолетных ГТД с различными типами покрытий. *VIII Международные молодежные научно-технические чтения им. А.Ф. Можайского: тезисы докладов* (г. Запорожье, 19-20 мая 2015г.). Запорожье: АО «МОТОР СИЧ», 2015. С. 20-22.

14. Ефанов В.С., Безденежный Б.В., Прокопенко А.Н., Клочихин В.В. Исследование влияния двухступенчатого вакуумно-дугового разряда (ДВДР) на качество обрабатываемой поверхности. *IX Международные молодежные научно-технические чтения им. А.Ф. Можайского: тезисы докладов* (г. Запорожье, 16-18 мая 2016г.). Запорожье: АО «МОТОР СИЧ», 2016. С.106-107.

15. Ефанов В.С., Мыленко А.А., Прокопенко А.Н., Овчинников А.В. Снижение шероховатости ионно-плазменных покрытий. *X Международные молодежные научно-технические чтения им. А.Ф. Можайского: тезисы докладов* (г. Запорожье, 15-17 мая 2017г.). Запорожье: АО «МОТОР СИЧ», 2017. С.107-109.

16. Ефанов В.С., Клочихин В.В., Шило В.Г. Зависимость качества ионно-плазменных покрытий от способа получения катодов. *XI Международные*



*молодежные научно-технические чтения им. А.Ф. Можайского: тезисы докладов* (г. Запорожье, 14-17 мая 2018г.). Запорожье: АО «МОТОР СИЧ», 2018. С.130-132.

17. Ефанов В.С., Клочихин В.В., Шило В.Г. Нанесение жаростойких покрытий ионно-плазменным методом на установках КИБ разработки АО «МОТОР СИЧ». *XI Международные молодежные научно-технические чтения им. А.Ф. Можайского: тезисы докладов* (г. Запорожье, 20-23 мая 2019г.). Запорожье: АО «МОТОР СИЧ», 2019. С.91-94.

18. Ефанов В.С., Петрик И.А., Баландин В.Н., Мыленко А.А., Марченко Ю.А. Повышение ремонтпригодности лопаток компрессора с эрозионностойким покрытием TiN. *Титан 2018. Производство и применение в Украине: сборник трудов межд. конф.* (г. Киев, 11-13 июня 2018г.). Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2018. С.51-53.

19. Pedash O., Yefanov V., Klochikhin V., Prokopenko O., ShyloV. Application of the Powder Metallurgy Process in Production of Cathodes for Deposition of High-temperature Thermal-barrier Coatings (TBCs) on Gas Turbine Blades. *World Congress on Powder Metallurgy*. (Beijing, China, 16-20 Sept. 2018). 2018. 1888-1892 pp.

## SUMMARY

*Yefanov V.S.* - Improvement of manufacturing process of nickel alloy cast cathodes for heat resistant coating deposition on aircraft blades - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in specialty 136 - Metallurgy.

The work was performed at the National University "Zaporizhzhya Polytechnic" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Zaporizhia, 2021.

Dissertation content. The dissertation is devoted to research of fundamental questions of influence of metallurgical processes on structure and structure of ingots for production of cathodes, studying of influence of modifying elements on structure and properties of heat - resistant coverings, introduction of new geometry and composition

of cathodes in GTE (gas turbine engine) coating technology.

Four main metallurgical methods of manufacturing heat-resistant Ni-Cr-Al-Y alloy are considered: VIV (vacuum-induction smelting), EPV (electron beam remelting), VDP (vacuum-arc remelting), GM (granular metallurgy).

The influence of metallurgical methods of alloy production is estimated

Ni-Cr-Al-Y on the quality of the cathodes, namely: chemical homogeneity, dispersion of the structure, homogeneity, the presence of defects.

Each of the obtained cathodes was subject to inspection and evaluation of both the operational characteristics of the installation (stability of application parameters, the presence of defects, etc.) and the quality of the coating (homogeneity of chemical composition, the presence of defects, the size of the droplet phase, etc.).

Among many factors there is a direct dependence of the drip phase not only on the application parameters but also on the initial state of the structure of the applied material, so the best results on the parameter of the drip phase showed the method of GM and VDP. The evaluation was performed based on the results of counting the number and size of drops on the surface of the coating.

Based on the obtained results of the distribution of the structure, chemical elements and drip phase, the optimal manufacturing method was chosen. It was found that the FDP method reduced the dispersion of the alloy by almost four times, while the structure of the alloy became more homogeneous.

Having determined the method of manufacturing cathodes (VDP) and the basic composition of the alloy (Ni-Cr-Al-Y) as the starting point, we began work on the selection of modifiers to improve its properties and the coating obtained from it.

Among the many known rare earth elements, yttrium, lanthanum, hafnium and their combinations were selected. All these elements are well combined with the base composition (nickel, aluminum, chrome).

At the beginning, metallurgical processes such as smelting regimes, calculation of charge materials, evaluation of the influence of metallurgical factors on the composition, structure and geometry of ingots for cathode blanks were tested. The main difference of the new geometry of the cathodes is to make them in the form of a

truncated cone using a reusable base.

Alloys with each modifier were made separately and its effect on the structure of the alloy as a whole was determined.

Based on the results, it was found that: the most effective is the use of hafnium and lanthanum to obtain a finer structure and uniform distribution of elements in the cathode.

These elements actively interact with impurities - elements of introduction (mainly oxygen and carbon) — and can form stable carbides and oxides at the interface (interfacial boundaries, clusters of dislocations, etc.). Also form nanoscale phase releases that stabilize the structure of the alloy and increase its properties.

However, in addition to obtaining high-quality ingots, the goal is to improve the quality of the coating, so each obtained alloy was applied like a blade made of alloy ЖС-32ВІ. The coating was applied on КІВ and АІІН-250 units, the control sample was the composition of Ni-Cr-Al-Y applied on the ion-plasma unit АІІН-250. The obtained samples were subjected to metallographic and metallophysical studies of the obtained coatings by analyzing and comparison with existing coatings.

All the obtained coatings had the same thickness (30 ... 50  $\mu\text{m}$ ) and a defect-free structure with a uniform distribution of elements, which was confirmed by metallographic and metallophysical studies.

After making sure that each of the modifiers has the right to exist independently and does not harm the formation of a quality coating layer, complex modifiers of the alloy composition have been developed.

Two alloys with complex modification have been developed: Ni-Cr-Al-Y-La and Ni-Cr-Al-Y-Hf-La. Similar to the previous compositions, metallographic and metallophysical experiments of the obtained alloys were performed.

From the obtained results it is established that reducing the amount of lanthanum to 0.3% and adding 0.3% of yttrium allows to improve the dispersion and stabilize the coating parameters, reduce the rate of detachment of aluminum oxide film from the coating surface during operation.

The addition of 0.2% hafnium allows to improve the formation of heat-resistant

chromium oxides and accelerate the formation of alumina during operation of the coating.

According to the results of metallographic research, both coating compositions have a homogeneous defect-free structure and uniform distribution of elements. However, they differ in physical properties.

The next stage of the work was to test the obtained coatings for heat resistance, for which we used a laboratory electric furnace SNOL 6,7/1300. Each of the coating variants was applied on a sample of ЖС-32BI alloy and heated to a temperature of 1150 °C and kept for 100 ... 400 hours.

According to the results of measurements of the weight loss of the samples, in the process of tests it was concluded that the best result was achieved by adding hafnium to the alloy. Both alloys with hafnium showed a decrease in weight loss during heat-resistant tests.

The coating with the Y+Hf+La modification complex has advantages in heat resistance and stability of evaporation parameters, which is more promising for introduction into serial production.

Using cathodes of the developed composition and new geometry, made by the method of VDP, and modes for industrial installation of KIB, gradient coating was applied to the turbine blades with increasing thickness from 50 μm to 95 μm at the inlet edge. This could not be achieved earlier due to technological limitations of the equipment used and the quality of the cathodes.

Thus, at the inlet edge, the coating thickness was ~ 95 μm, and in the middle part of the blade profile and the outlet edge was ~ 43 μm. The use of such a gradient application with increased thickness provides an increase in the service life of the turbine blade at least twice. The results of machining of the obtained coating are presented (Application A, Application B).

The paper presents the results of using a serial «KIB» installation instead of the APN-250 installation. This installation allowed to implement a gradient coating scheme and apply cathodes of new geometry, which increased the productivity of spraying in one operating cycle. The use of the CIB installation allowed to increase the rational use

of heat-resistant alloy cathodes. Thus, the utilization factor of the cathode material on the АПН-250 installation is 35 ... 40%, on the КІВ installations this coefficient is 70 ... 80%, which is almost twice as effective.

It is shown that the installation of the СІВ allows you to place in the middle of the camera in 4 times more details due to the stationary mounting in the middle of the installation, and the location of the cathodes on different sides of the chamber.

This design feature of installation allows to realize the principle of gradient drawing of layers of a covering. Using the data obtained after the operation of the turbine blades, a new coating scheme was developed. The maximum coating thicknesses are calculated, the application modes and the location of the blades in the chamber relative to the cathodes are worked out.

On the basis of the conducted researches at JSC Motor Sich - the complex technology of drawing a covering on a tract surface of working blades of the turbine of aircraft engines is developed, the modified structures of a covering are offered. The technology allows to increase the service life of turbine blades in conditions of significant mechanical and temperature loads. The application technology was tested on the «КІВ» units developed by Motor Sich JSC and confirmed by a test report. According to the act and conclusion, the following technological and economic effects are expected:

- the possibility of applying gradient coatings in one treatment cycle;
- increasing the load of the installation for one cycle of coating with blades three times;
- increase of rational use of cathode material by 35 ... 40%, which is an economic effect of more than UAH 3 million per year per 2.5 tons of alloy.

Administrative documents have been issued according to which from 2024 on engines AI-450, AI-450M, AI-450M1, AI-450M-P, AI-450M1-P, AI-450M-B, AI-450M2, serial coating of TC blades has been replaced by gradient.

Based on literature sources and own observations, it was found that the greater the thickness of the applied coating layer, the lower the surface roughness class. Accordingly, there is a need for surface treatment of the gradient coating. The initial

values of the roughness of the gradient coating are Ra 2.5 ... 3.5.

The surface of the coating was polished with the help of equipment for directional treatment with vibrating bodies. The class of surface purity increased 4 times and amounted to Ra 0.6 ... 0.8.

Based on the results of machining, it is concluded that the large and medium-sized droplet phase is completely absent. Craters on the surface of the coating are traces of vibration and impact of droplets. The experimental-industrial technology of mechanical processing of a surface layer of a gradient covering by vibropolishing with maintenance of uniformity of removal of a covering that allows to increase roughness considerably is developed from Ra 3,2 to Ra 0,4.

To increase the maintainability of the blades - developed and patented technology for removing heat-resistant coating by electrolytic-plasma treatment.

Conclusions are obtained from JSC "Motor Sich" in which the provisions of the dissertation are introduced in the serial production of blades of working turbines with high temperature-erosion load on small aircraft engines.

The main provisions of the work are introduced into the educational process when teaching at the National University "Zaporizhzhya Polytechnic". Type and scope of implementation: Classification of heat-resistant coatings and materials for cathodes, experimental data of physical and mechanical properties of ion-plasma coatings introduced into the lecture course "Materials for surfacing and spraying"; methods of production of consumable electrodes for ion-plasma coatings introduced into production of materials for welding surfacing and spraying "; methods of coating parts of the gas turbine engine introduced in the lecture course" Surfacing and spraying "; methods of quality control of ion-plasma coatings introduced in the lecture course" Quality control of coatings"; the dependence of ion-plasma coatings on mode parameters spraying in laboratory works of discipline "Quality control of coverings"; processes on the border of contact of a metal covering in a lecture course "Surface physical and chemical processes" (Application B).

**Key words:** metallurgy, ingots, cathodes, coatings, structure, resource, blades.

**PUBLICATIONS BY THE SUBJECT OF DISSERTATION****Articles in scientific professional editions of Ukraine**

1. Yefanov V., Ovchynnykov O., Dzhuhan O., Petrik I. Developing the modification of nickel cathodes for applying the ion-plasma coatings on the parts of aircraft engines. *Eastern-european journal of enterprise technologies*. 2020. №4, P. 6 – 13. [*Scopus; Google Scholar*].
2. Yefanov V.S., Klochykhyn V.V., Skrebtsov A.A., Petryk I.A., Pedash O.O. Investigation of the Influence of Technology of Production of Cathodes on the Quality of Condensation Heat-Resistant Coatings. *Materials Science*. 2020. №55 (4), P. 609 – 615. [*Scopus; Web of Science Science Citation Index Expanded, Google Scholar*].
3. Yefanov V.S, Ovchinnikov A.N., Petrik I.A., Mylenko A.A. Electrolyte-plasma processing of turbine blades for heat-resistant coating removal. *Technological systems*. 2018. №2. P. 59 – 65. [*IndexCopernicus; Google Scholar*].
4. Yefanov V.S, Klochykhyn V.V., Pedash A.A., Shilo V.G. The effect of cathode manufacturing technology on the quality of turbine blade coatings. *Herald of aeroenginebuilding*. 2018. №1. P. 132 – 137. [*INSPEC, Index Copernicus, CrossRef; Google Scholar*].
5. Yefanov V.S., Ovchinnikov A.V., Dzhuhan O.A., Tkachenko S.M., Zhdan V.S. Improvement of the technology of melting ingots of nickel based alloys by vacuum arc remelting (VAR). Metal science and heat treatment of metals. *Dnipro*. 2019. №3 (86). P. 45-51. [*Google Scholar*].
6. Ovchinnikov A.V., Teslevich S.M., Tizenberg D.L., Efanov V.S. Technology of melting ingots of cobalt alloy by the arc remelting method. *Today electrometallurgy*. 2019. №1. P. 23-27. [*Google Scholar*].
7. Yefanov V.S., Petrik I.A., Prokopenko A.N., Ovchinnikov A.V., Multi-layer heat-resistant coating deposition on turbine blades exposed to erosion-corrosion. *Aerospace technic and technology*. 2017. №8(143). P. 85-89. [*Index Copernicus, CiteFactor; Academic Keys; Infobase Index; WordCat; Google Scholar*].

8. Yefanov V.S., Prokopenko A.N., Ovchinnikov A.V., Vnukov Yu.N. Erosion resistance of helicopter GTE compressor blades protected by various types of coatings. *Herald of aeroenginebuilding*. 2017. №1. P. 120-123. [*INSPEC, Index Copernicus; Google*].

9. Yefanov V.S., Shevchenko V.G., Shaleva N.V., Omelcheko O.S., Omelcheko V.A. Development of gas mixture composition for the improvement of nickel-based cathodes for the ionic-plasma coating. *Bulletin of Prydniprovskaya state academy of civil engineering and architecture*. 2020. №4 (267-268). P. 52-59. [*InfoBase Index, Universal Impact Factor, Open Academic Journal Index, Directory, Indexing of International Research Journals (CiteFactor); Google Scholar*].

#### **Patent for utility model**

10. Electrolyte for polishing products made of titanium alloys: patent №135255, IPC (2006.01) C25F 3/04. - № u201900204; application - 08.01.2019; published 25.06.2019.- Bulletin №12.

11. The method of removing heat-resistant coating from a metal substrate: patent № 139936, IPC (2006) C25F 5/00- № u201908195; application - 15.07.2019; published 27.01.2020.- Bulletin №2.

#### **Application for the invention**

12. The composition of the alloy for coating : application for an invention № u2020 05296 IPC (2020) C23C 30/00, C23C 14/14, C22C 19/05; application - 17.08.2020.

#### **Abstracts in the materials of domestic and international conferences**

13. Yefanov V.S., Prokopenko A.N., Zhemanuk P.D. Erosion resistance of helicopter GTE compressor blades protected by various types of coatings. *VIII International youth scientific and technical readings named after A.F. Mozhaisky: abstracts* (Zaporozhye, 19-20 may 2015). Zaporozhye: MOTOR SICH JSC, 2015. P. 20-22.

14. Yefanov V.S., Bezdenezhnyi B.V., Prokopenko A.N., Klochykhyn V.V. Investigation of the influence of a two-stage vacuum-arc discharge on the quality of the treated surface. *IX International youth scientific and technical readings named after A.F.*



*Mozhaisky: abstracts* (Zaporozhye, 16-18 may 2016). Zaporozhye: MOTOR SICH JSC, 2016. P.106-107.

15. Yefanov V.S., Mylenko A.A., Prokopenko A.N, Ovchinnikov A.V. Reduction of the roughness of ion-plasma coatings. *X International youth scientific and technical readings named after A.F. Mozhaisky: abstracts* (Zaporozhye, 15-17 may 2017). Zaporozhye: MOTOR SICH JSC, 2017. P. 107-109.

16. Yefanov V.S., Klochykhyn V.V., Shilo V.G. Dependence of the quality of ion-plasma coatings on the method of obtaining cathodes. *XI International youth scientific and technical readings named after A.F. Mozhaisky: abstracts* (Zaporozhye, 14-17 may 2018). Zaporozhye: MOTOR SICH JSC, 2018. P. 130-132.

17. Yefanov V.S., Ovchinnikov A.V., Petrik I.A., Balandin V.N. Ion-plasma deposition of heat resistant coatings, using KIB equipment designed by MOTOR SICH JSC. *XI International youth scientific and technical readings named after A.F. Mozhaisky: abstracts* (Zaporozhye, 20-23 may 2019). Zaporozhye: MOTOR SICH JSC, 2019. P. 91-94.

18. Yefanov V.S., Petrik I.A., Balandin V.N., Mylenko A.A., Marchenko Yu.A. Improving repairability of compressor rotor blades with TiN erosion-resistant coating. *Titanium 2018. Production and application in Ukraine: a collection of works int. conf.* (Kiev, 11-13 june 2018). Kiev: International Association «Welding», 2018. P. 51-53.

19. Pedash O., Yefanov V., Klochikhin V., Prokopenko O., Shylo V. Application of the Powder Metallurgy Process in Production of Cathodes for Deposition of High-temperature Thermal-barrier Coatings (TBCs) on Gas Turbine Blades. *World Congress on Powder Metallurgy*. (Beijing, China, 16-20 Sept. 2018). 2018. P. 1888-1892.