

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Запорізька політехніка»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЄФАНОВ ВОЛОДИМИР СЕРГІЙОВИЧ



УДК: 669.046.516

ДИСЕРТАЦІЯ
УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЛИТИХ
КАТОДІВ З НІКЕЛЕВОГО СПЛАВУ ДЛЯ НАНЕСЕННЯ ЖАРОСТІЙКИХ
ПОКРИТТІВ НА ЛОПАТКИ АВІАДВИГУНІВ

Спеціальність 136 — Металургія
Галузь знань 13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD)

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



В. С. Єфанов

Науковий керівник:

Овчинников Олександр Володимирович,
доктор технічних наук, професор

Запоріжжя – 2021

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 принципових питань 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 сплаву 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 сплавом 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 катода 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 склала ~ 95 мкм, а в середній частині профілю лопатки та вихідній кромці ~ 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 катода нової геометрії, що збільшило продуктивність напилення за один робочий цикл. Використання установки КІБ підвищило раціональність використання катодів з жаростійкого сплаву. Так коефіцієнт використання матеріалу катода 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-промислово 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., Ключихин 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. Ефанов 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 металеві 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., 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. 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-32В1. The coating was applied on К1В and АПН-250 units, the control sample was the composition of Ni-Cr-Al-Y applied on the ion-plasma unit АПН-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 μm) 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 CIB 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 Prydniprovsk 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.

ЗМІСТ

Перелік скорочень, умовних позначень.....	22
ВСТУП.....	23
Розділ 1. Проблеми та шляхи вдосконалення зливків катодів для нанесення покриттів лопаток авіадвигунів, стан питання та перспективи його вирішення.....	29
1.1 Аналіз жароміцних сплавів і покриттів на нікелевій основі, що працюють у високотемпературному газовому потоці.....	29
1.2 Методи виготовлення катодів.....	32
1.2.1 Виготовлення катодів методом гранульної металургії.....	32
1.2.2 Виготовлення катодів методом електронно-променевого переплаву.....	34
1.2.3 Виготовлення катодів методом вакуумно-індукційної виплавки.....	39
1.2.4 Виготовлення катодів методом вакуумно-дугового переплаву.....	42
1.3 Види пошкоджень і руйнувань лопаток турбіни.	47
1.4 Характеристика способів підвищення довговічності деталей з нікелевих сплавів при газовій корозії.....	52
1.5 Системи Al-Ni, Al-Cr, Ni-Cr	57
1.6 Постановка проблеми. Обґрунтування мети і формулювання задач наукового дослідження.....	59
1.7 Висновок до розділу 1.....	61
Розділ 2. Методика проведення досліджень.....	63
2.1 Обладнання для виготовлення зливків катодів.....	63
2.2 Визначення хімічного складу і металографічні дослідження.....	64
2.3 Технологічний процес нанесення жаростійких покриттів методом вакуумно-плазмової технології високих енергій.....	66
2.4 Контроль якості покриття.....	71
2.5 Обладнання для нанесення іонно-плазмових покриттів.....	72

2.5.1 Установа для нанесення покриттів у вакуумі АПН-250.....	72
2.5.2 Установа для нанесення покриттів у вакуумі КІБ.....	73
2.5.3 Лабораторна електропіч SNOL 6,7/1300.....	75
2.6 Методика дослідження властивостей нанесених покриттів...	75
2.6.1 Методи дослідження високотемпературного окислення.....	75
2.6.2 Методика дослідження механічних властивостей.....	77
Розділ 3. Дослідження структурни та хімічного складу катодів, виготовлених різними методами.....	78
3.1 Вплив метода виготовлення сплаву на структуру катодів	78
3.1.1 Вимоги до зливків катодів	79
3.1.2 Дослідження катодів, виготовлених методом гранульної металургії.....	80
3.1.3 Дослідження катодів, виготовлених методом вакуумно-індукційної виплавки (ВІВ).....	84
3.1.4 Дослідження катодів, виготовлених методом електронно- променевого переплаву(ЕПП).....	88
3.1.5 Дослідження катодів, виготовлених методом вакуумно-дугового переплаву(ВДП).....	92
3.2 Розробка технології вакуумно-дугового переплаву виготовлення катодів з додаванням різних модифікаторів.....	96
3.2.1 Дослідження катодів ВДП з модифікатором La.....	96
3.2.2 Дослідження катодів ВДП з модифікатором Hf.....	99
3.2.3 Дослідження катодів ВДП з модифікатором La+Y.....	102
3.2.4 Дослідження катодів ВДП з модифікатором Y+Hf+La.....	105
3.3 Висновки до розділу 3.....	108
Розділ 4. Розробка технології нанесення покриттів дослідними катодами різних складів.....	111
4.1 Обґрунтування використання нової іонно-плазмової установки КІБ замість АПН-250.....	111

4.2 Дослідження покриття, нанесеного катодом ВДП, легованим Y.....	115
4.3 Дослідження покриття, нанесеного катодом ВДП, легованим La.....	116
4.4 Дослідження покриття, нанесеного катодом ВДП, легованим Hf.....	117
4.5 Дослідження покриття, нанесеного катодом, легованим La + Y.....	118
4.6 Дослідження покриття, нанесеного катодом, легованим Y + Hf + La.....	118
4.7 Порівняння властивостей отриманих покриттів з СДП-2	119
4.8 Висновки до розділу 4.....	120
Розділ 5. Вдосконалення технології виготовлення лопаток турбіни з жаростійким покриттям при впровадженні катодів, отриманих за новим металургійним процесом.....	
	121
5.1 Технологія нанесення градієнтного покриття; зменшення шорсткості поверхні.....	121
5.2 Випробування модифікованих покриттів на жаростійкість.....	126
5.3 Відпрацювання технології зняття градієнтного покриття методом електронно-плазмового полірування.....	127
5.4 Використання отриманих результатів досліджень у авіадвигунобудуванні для підвищення ресурсу лопаток турбіни газотурбінних двигунів.....	131
5.5 Висновки до розділу 5.....	133
Висновки.....	135
Перелік використаних джерел.....	138
Додаток А.....	151
Додаток Б.....	154
Додаток В.....	157

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

- ВІВ — вакуумно-індукційна виплавка;
ЕПП — електронно-променевий переплав;
ВДП — вакуумно-дуговий переплав;
ГМ — гранульна металургія;
ВПТВЕ — вакуумно-плазмова технологія високих енергій;
КІБ — установка для нанесення покриттів АТ “МОТОР СІЧ”;
АПН-250 — установка для нанесення покриттів ТОВ “Електромеханіка”;
ГТД — газотурбінний двигун;
РСМА — рентгеноспектральний мікроаналіз;
ПЕМ — просвічувальна електронна мікроскопія;
РЕМ — растрова електронна мікроскопія;
КВМ — коефіцієнт використання матеріалу;
СДП — сплав для покриття;
LPPS — low pressure plasma spraing;
PVD — physical vapour deposition;
CVD — chemical vapour deposition.

ВСТУП

Актуальність теми. Проблеми забезпечення надійності, довговічності і ресурсу роботи газових турбін є найбільш складними серед чисельних проблем, що виникають на шляху розвитку сучасних авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД). Найважливішим елементом газової турбіни є лопатки ротора, матеріал і конструкція яких значною мірою визначають ресурс її роботи і допустиму температуру газу перед турбіною, що безпосередньо впливає на питому тягу, економічність й інші характеристики двигунів.

У перших газотурбінних двигунах температура газів перед турбіною становила 600-850 °С, однак в подальшому значно підвищилася, досягнувши в даний час 1200-1400 °С і навіть вище.

Таким чином, застосування для теплонавантажених деталей ГТД нових матеріалів з більш високими характеристиками жароміцності, жаростійкості, втомної міцності, фазової та структурної стабільності стало першочерговим завданням, оскільки жароміцності сучасних сплавів на нікелевій та нікель-кобальтової основі для деталей високотемпературної зони газотурбінних двигунів явно недостатньо.

Для вирішення проблем надійності і ресурсу газових турбін найчастіше застосовують нові жароміцні сплави зі спрямованою стовбчастою і монокристалічною структурою, композиційні та інтерметалідні матеріали.

Якщо застосування нових, жароміцних сплавів, вирішує проблему збільшення опірності деформаціям і руйнуванню лопаток при високих температурах і навантаженнях, то для надійного захисту від хімічного руйнування поверхонь під впливом газової корозії, потрібні жаростійкі захисні покриття.

До найбільш ефективних і поширених жаростійких покриттів належать покриття на основі алюмінідів нікелю, високі захисні властивості яких забезпечуються їх здатністю окислюватися з утворенням плівки Al_2O_3 . Довговічність таких покриттів лімітується вмістом алюмінію в поверхневому

шарі, а також наявністю стабілізуючих модифікаторів, що забезпечують стабілізацію його вмісту на рівні, необхідному для формування плівки Al_2O_3 .

Розробці методів отримання таких покриттів, технологій нанесення і дослідженню їх властивостей присвячені роботи С.А. Мубояджяна, Є.Н. Каблова, К. І. Кравця, В.С. Синельникової, П.Т. Коломицева, В.І. Калити, С.В. Косіцина, В.В. Кудінова, Н.Б. Пугачової, К.Б. Поварова, F. Wang, Z.D. Xiang, D.F. Susan, K. Morsi і багатьох інших відомих світових дослідників. В їх роботах широко представлені технології нанесення жаростійких покриттів методами іонно-плазмового (PVD) і хімічного осадження покриттів (CVD).

Незважаючи на досягнуті успіхи в цій галузі, питання, що стосуються впливу металургійних факторів виробництва та хімічного складу початкових сплавів на їх фізико-механічні, теплофізичні та службові властивості при нанесенні покриттів, залишаються недостатньо вивченими. Дослідження цих та інших питань є актуальним як для науки, так і для практики будівництва перспективних авіадвигунів.

У зв'язку з цим актуальним є підвищення характеристик литих зливків катодів з новою геометрією, що використовуються для нанесення жаростійких покриттів лопаток авіадвигунів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні етапи дисертаційної роботи виконані відповідно до планів науково-дослідної роботи (НДР) Національного університету «Запорізька політехніка» та АТ «МОТОР СІЧ» за темами: «Оптимізація технології вакуумно-дугових процесів для виробництва жароміцних сплавів», «Розробка нового жароміцного матеріалу й технології його отримання на основі алюмінідів титану для перспективних конструкцій деталей ГТД», а також за темою «Оптимізація технології вакуумно-дугових процесів для виробництва жароміцних сплавів» (№ 0121U1111988) у рамках науково-технічного співробітництва з ТОВ "ТІ ТЕКНОЛОДЖІ".

Мета та задачі досліджень. Мета роботи — удосконалення металургійних процесів отримання катодів нової геометрії та складу, шляхом підвищення комплексу якісних та технологічних характеристик зливків.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Дослідити вплив технологічних чинників виготовлення катодів на процес осадження та формування жаростійких покриттів.
2. Дослідити вплив технологічних чинників на процес осадження та формування жаростійких покриттів на деталях ГТД.
3. Дослідити вплив модифікуючих елементів на характеристики жаростійкості.
4. Дослідити структуру і властивості покриттів, отриманих на серійному і новому обладнанні із застосуванням катодів із модифікованих нікелевих сплавів.
5. Розробити технологію зняття градієнтного жаротривкого покриття з поверхні лопаток без пошкодження їх геометрії.
6. Виготовити дослідні зразки деталей газотурбінних двигунів, з нанесеним на них модифікованим покриттям.

Об'єкт досліджень - Процеси структуроутворення в Ni-Cr-Al зливках.

Предмет досліджень - Закономірності формування структури злиwkів і її вплив на властивості жаростійких покриттів, отриманих методом осадження з парової фази у вакуумі.

Методи дослідження. Хімічні склади сплавів і покриттів визначали рентгеноспектральним і хімічним методами, а структурних складових енергодисперсійним рентгеноспектральним методом. Металографічні дослідження проводили з використанням оптичного, растрового і просвічуючого електронного мікроскопів.

Механічні властивості визначали за стандартними методиками при статичному і динамічному навантаженні, також визначали жаростійкість серійного і модифікованого покриття. Дослідження виконувалися на приладах і обладнанні, які пройшли відповідний метрологічний контроль. Жаростійкість покриття досліджували за допомогою вагового методу. Обробка статистичних даних виконувалася за загальноприйнятими методами математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Розширене уявлення про вплив металургійних процесів виготовлення

катодів на їх якісні та технологічні властивості. Визначено, що при використанні методу ВДП в структурі катода формується дрібнодисперсна структура розміром 25...90 мкм, а також відсутні ліквіції розміром більше 150 мкм, характерні при методі ВІВ.

2. Розширене уявлення про закономірності впливу вихідних типів структури катодів на якість іонно-плазмового покриття. Встановлено, що за рахунок подрібнення структури катодів, виготовлених методом ВДП, вдалося повністю позбавитись в покритті крапельної фази розміром більше 60 мкм. Це дозволило зменшити шорсткість поверхні лопатки з Ra 2,02...2,21 до Ra 1,85...1,90.

3. Вперше встановлено, що застосування різних рідкісноземельних елементів та їх комплексів для модифікування катодів суттєво впливає на структуру, параметри випаровування матеріалу при осадженні та забезпечення властивості покриття. У поєднанні вони сприяють створенню однорідної структури фазового стану, та поліпшують технологічні властивості процесу, а саме стабільність горіння дуги та процесу випаровування завдяки зменшенню розміру структурних складових та підвищення їх гомогенності за хімічним складом.

4. Вперше встановлені закономірності впливу геометричних характеристик катодів на технологію нанесення градієнтного покриття. Доведено, що застосування методу ВДП дає можливість отримання катодів у формі циліндра з оптимальною структурою та хімічним складом. Це забезпечило можливість його використання для нової технології нанесення градієнтного покриття в діапазоні товщин 43 ... 95 мкм.

Практичне значення отриманих результатів.

Розроблено технологію комплексного легування зливків жаростійкого сплаву системи Ni-Cr-Al для методу ВДП, з оптимізованим модифікуючим комплексом Y+Hf+La.

За зазначеною технологією отримані циліндричні зливки Ø120 мм та висотою 45 мм з гарантованим рівномірним розподілом легувальних і модифікуючих елементів за об'ємом зливка. Саме така геометрія зливка та його

фазовий та структурний стан забезпечив введення в експлуатацію високопродуктивної установки іонно-плазмового нанесення КІБ. Це збільшило кількість оброблених за один цикл деталей з 72 шт. до 288 шт. та забезпечило підвищення якості покриттів за рахунок впровадження градієнтної технології нанесення.

Практична цінність впровадження металургійного процесу отримання катодів нової геометрії підтверджено висновками з АТ «МОТОР СІЧ» (Додаток А, Додаток Б)

Розроблено технологію отримання комплексного градієнтного жаростійкого покриття на трактових поверхнях робочих лопаток турбіни.

Розроблено в умовах діючого підприємства технологію механічної обробки верхнього шару градієнтного покриття методом віброполірування із забезпеченням рівномірності зняття відпрацьованого покриття, що дозволяє знизити шорсткість з Ra 3,2 до Ra 0,4.

Емпірично визначено ефективні режими випаровування матеріалу катода, що дозволяє отримати рівномірнішу структуру покриття та забезпечити однорідність хімічного складу.

Основні положення роботи впроваджені в навчальний процес в НУ «Запорізька політехніка». Вид та об'єм впровадження: класифікація жароміцних покриттів та дослідні дані фізико-механічних і службових 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 - «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».

Особистий внесок здобувача. У дисертаційній роботі основні положення,

наукові результати та висновки отримані автором самостійно. Дослідження впливу різних металургійних методів виготовлення катодів зі сплава системи Ni-Cr-Al модифікованого Y, Hf, La та їх поєднанням, а також схеми нанесення покриттів виконані автором і підтверджені публікаціями [18,90,92,97,109]. Здобувачем сформульована і обґрунтована методологія проведення експериментів, а також практична реалізація експериментальних методик, весь комплекс вимірювальних, аналітичних і числових розрахунків був виконан за його участю. Досліджено вплив методів виготовлення катодів та режимів осадження на структуру і механічні властивості покриттів [74,91,93]. Автором роботи проведено експериментальні дослідження особливостей застосування методів віброполірування та електролітно-плазмової обробки при ремонті деталей авіаційних двигунів [118,130], та отримані патенти на розроблену технологію [121,122]. Також автором отриман патент на винахід складу жаростійкого сплаву Ni-Cr-Al-La [110].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на X-XII Міжнародних молодіжних науково-технічних читаннях ім. О.Ф. Можайського (Україна, м.Приморськ, 2017-2019р.р.), Міжнародних науково-технічних читаннях ім. Старобудова (Україна, м. Дніпро, 2019), World Congress on Powder Metallurgy. Beijing (Китай, Пекін, 2018).

Публікації. Основні результати роботи знайшли відображення в 20 публікаціях, з них: 10 статей в наукових журналах, з яких 2 статті входять в наукометричну базу даних Scopus, а також в 7 матеріалах тез конференцій та 3 патентах.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, містить список використаних джерел та додатки. Загальний обсяг дисертації становить 159 сторінки, з них 109 сторінок основного тексту, 30 таблиць, 50 рисунків, 130 використаних літературних джерел на 13 сторінках і 3 додатки на 9 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ПРОБЛЕМИ ТА ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ЗЛИВКІВ КАТОДІВ ДЛЯ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ ЛОПАТОК АВІАДВИГУНІВ, СТАН ПИТАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЙОГО ВИРІШЕННЯ

1.1 Аналіз жароміцних сплавів і покриттів на нікелевій основі, що працюють у високотемпературному газовому потоці

Проблема довговічності деталей газотурбінних двигунів, що працюють в умовах впливу високотемпературного газового потоку, є однією з найважливіших в машинобудуванні. Особливої гостроти ця проблема набуває при створенні сучасних авіаційних двигунів, для яких основними ознаками є збільшення температури газів перед турбіною. Якщо в перших газотурбінних двигунах (ГТД) робочі температури матеріалу становили 600-900 °С, то в подальшому значно підвищилися, досягнувши на даний час 1400 °С і більше, при одночасному зменшенні маси конструкції і збільшенні стиснення повітря в компресорі (табл. 1.1) [1]. Збільшення параметрів двигуна неминує веде до зростання навантажень на деталі і вузли, ускладнення конструкцій і пошуку нових технологій забезпечення тривалої працездатності ГТД [2].

З літературних джерел відомо, що обмеження ресурсів високотемпературних двигунів пов'язане зі зростанням напруженості в деталях турбіни, сопла та камери згоряння. Тому розробка покращених жароміцних, жаростійких сплавів, надійних методів захисту від газової корозії, зменшення маси конструкції є однією з провідних завдань машинобудування.

Конструктивні рішення, які закладаються в авіадвигуни нових поколінь, як правило, знаходяться за межами можливостей відомих матеріалів. Тому особливої гостроти набуває необхідність розробки нових матеріалів і технологічних процесів, які повинні забезпечити деталям мати підвищені характеристики жароміцності, жаростійкості, опірності термічній втомі [3-6].

Таблиця 1.1 - Покоління літакових газотурбінних двигунів [1].

Покоління	Роки	Призначення літаків	Основні схеми двигунів	Компресор	Турбіна
I	з 1943 – 1945 рр. по 1949 – 1952 рр.	Військові	ТРД, ТРДФ, ТГД	одновальний осьовий або відцентровий $\pi_k = 3 \dots 5,5$	неохолоджувана $T_T = 725 \dots 875 \text{ }^\circ\text{C}$
II	з 1950 – 1953 рр. по 1958 – 1960 рр.	Військові	ТРДФ, ТРД, ТГД	Осьові одновальні з регульованими направляючими апаратами або двовальні $\pi_k = 7 \dots 13$	неохолоджувана (охолоджувані лопатки першого соплового апарату) $T_T = 875 \dots 975 \text{ }^\circ\text{C}$
		Цивільні	ТВД, ТРД		
III	з 1958 – 1960 рр. по 1967 – 1970 рр.	Цивільні	ТРДД, ТРД (Ф), ТРДДФ (СПС)	Осьовий двовальний або одновальний $\pi_k = 10 \dots 15$ (ТРД) $\pi_k = 16 \dots 20$ (ТРДД)	З внутрішнім конвективним охолодженням лопаток $T_T = 1025 \dots 1175 \text{ }^\circ\text{C}$
		Військові	ТРДФ, ТРДД, ТРДДФ		
IV	з 1967 – 1970 рр. до початку 1980 рр.	Військові	ТРДДФ, ТРДД	осьовий двовальний або тривальний $\pi_k = 20 \dots 30$	З конвективно-плівковим охолодженням лопаток $T_T = 1175 \dots 1375 \text{ }^\circ\text{C}$
		Цивільні	ТРДД		
IV+	з кінця 1970-х рр. до середини 1990 рр.	Військові	ТРДДФ	$\pi_k = 27 \dots 34$	$T_T = 1375 \dots 1475 \text{ }^\circ\text{C}$
		Цивільні	ТРДД	$\pi_k = 30 \dots 38$	$T_T = 1275 \dots 1365 \text{ }^\circ\text{C}$
V	З початку 1980 рр.	Військові	ТРДДФ	осьовий двовальний $\pi_k = 24 \dots 35$	З конвективно-плівковим охолодженням лопаток $T_T = 1475 \dots 1575 \text{ }^\circ\text{C}$
		Цивільні	ТРДД	осьовий дво- (три-) вальний $\pi_k = 32 \dots 55$	$T_T = 1335 \dots 1500 \text{ }^\circ\text{C}$
VI	пізніше 2003 року	Військові	ТРДДФ	$\pi_k = 25 \dots 40$	$T_T = 1825 \dots 2075 \text{ }^\circ\text{C}$
		Цивільні	ТРДД	$\pi_k = 50 \dots 60$	$T_T = 1625 \dots 1725 \text{ }^\circ\text{C}$

ТРД – турбореактивний двигун, ТРДФ - турбореактивний двигун форсований,

ТГД – турбогвинтовий двигун, ТРДДФ - двокамерний турбореактивний двигун форсований, ТРДД - двокамерний турбореактивний двигун, π_k - ступінь стиснення, T_r - температура газів перед турбіною.

На початкових етапах авіадвигунобудування провідну роль мала розробка конструктивних вдосконалень. Згодом, як видно з аналізу, для 4-го покоління авіадвигунів ролі конструкції і технологій зрівнялися, а для 5-го і 6-го поколінь внесок нових матеріалів і технологій в забезпечення параметрів авіадвигунів вже складає більше 70% [1-5].

Необхідність довготривалої експлуатації деталей авіадвигунів при температурах до 1100 °С і короткочасно до 1150 °С обумовило застосування жароміцних і жаростійких нікелевих сплавів. При більш високих температурах використовуються сплави на основі інтерметалідів Ni_3Al і $NiAl$ [6, 7].

Частка нікелевих сплавів в авіадвигунобудуванні складає не менше 70% маси конструкцій ГТД. Властивості цих сплавів забезпечуються наявністю легувальних елементів, технологією лиття деталей, штампуванням і оптимізацією режимів термічної обробки. Легування здійснюється з метою як безпосереднього зміцнення γ -твердого розчину, так і виділення зміцнюючої γ' -фази, під час твердіння. Сучасні нікелеві сплави легують хромом, кобальтом, алюмінієм, титаном, ніобієм, гафнієм, вольфрамом, танталом, а також додають рідкісноземельні метали (таблиця 1.2) [8].

Титан і алюміній входять в зміцнюючу γ' -фазу $Ni_3(Al, Ti)$, яка підвищує міцність ефективніше, ніж Ni_3Al . Титан зменшує коагуляцію γ' -фази, підвищує термостабільність сплавів, частково входить у з'єднання з вуглецем і утворює карбід TiC , так само, як і ніобій, гафній.

Ванадій, ніобій, титан мають несприятливий вплив на жаростійкість сплавів, тому в ряді сплавів їх кількість мінімізують або виключають.

Хром вводять, перш за все, для підвищення жаростійкості. Однак в сучасних сплавах вміст хрому знижують до 4-6% для підвищення температури

солідусу. У сплаві ВЖ98 вміст алюмінію і титану незначний і γ' - фаза не утворюється. В основному структура сплаву являє однорідний γ - твердий розчин, зміцнений хромом і вольфрамом. Це забезпечує високу технологічність, але недостатню жароміцність, тж незначна кількість карбідів α -W в структурі сплаву помітно впливає на механічні і технологічні властивості деталей [7,9].

Таким чином, застосування нових, більш жароміцних сплавів, вирішує проблему підвищення опору деформаціям і руйнуванню лопаток при дії високих температур і напруг. Але не менш важлива проблема - підвищення надійності захисту поверхонь деталей від високотемпературної газової корозії, що вирішується застосуванням надійних і довговічних жаростійких захисних покриттів.

Таблиця 1.2 - Хімічний склад сплавів на нікелевій основі, мас. % [10,11].

Марка сплаву	C	Cr	Co	W	Mo	Ti	Al	Nb	Hf	Re	Ta	B	Zr	V
ЖС26	0,15	5	9	10	2,5	3	5,5	1,6	-	-	-	0,02	-	1,0
ЖС26У	0,15	5	9	12	1,5	2	1,4	0,1	-	-	0,02	-	-	
ЖС32	0,15	5	9,3	10	3,0	-	5,0	1,5	-	4,0	4,0	0,02	-	-
ВЖЛ12У	0,18	10	14	1,5	3,1	4,5	6,2	0,8	-	-	-	0,02	0,02	0,8

Застосування сучасних технологій дозволяє підвищувати експлуатаційні характеристики жароміцних сплавів та покриттів, а один із основних шляхів їх вдосконалення полягає у покращенні кожного етапу виплавки зливків заготовок катодів та реалізації процесу осадження покриттів на поверхні лопаток.

1.2 Методи виготовлення зливків катодів

1.2.1 Виготовлення катодів методом гранульної металургії

Диспергування розплавів газовим потоком є одним із способів отримання металічних гранул, який відрізняється незначними витратами енергії, високою

продуктивністю та технологічністю процесу і можливістю його автоматизації. Він дозволяє застосовувати різні енергоносії (повітря, аргон, азот, гелій, діоксид вуглецю та ін.) і отримувати гранули практично будь-якого складу при високій ступені однорідності [12].

Високолеговані гранули використовуються для отримання деталей на основі нікелю, алюмінію та титану відповідального призначення у різних галузях: авіаційній, космічній, а саме для дисків газотурбінних двигунів, елементів енергетичних установок тощо [13,14]. Деталі, отримані з таких порошоків, відрізняються підвищеною міцністю і пластичністю, що обумовлено високою швидкістю охолодження частинок в процесі розпилення рідкого металу [15].

Процес отримання гранул включає: приготування розплаву, розпорошення рідкого сплаву або його диспергування; отримання та обробку гранул, тобто сепарацію і очищення від металевих і неметалевих включень, а також дегазацію; компактування гранул в заготовки, яке може доповнюватися пресуванням, куванням або штампуванням [16].

Головні способи одержання гранул:

- газострумне розпилення рідкого металу;
- відцентрове плазмове розпилення.

Газострумне розпилення є розпиленням рідкого металу в керамічному тиглі, що призводить до попадання помітної кількості неметалевих частинок, які обумовлюють зниження характеристик міцності матеріалу. За другою технологією одержання гранул виконують шляхом розпилення електроду заданого сплаву, що обертається із значною швидкістю, за дії високоенергетичної плазми [17].

У даній роботі компактування гранул в заготовки здійснювалося методом гарячого ізостатичного пресування зі застосуванням пресу фірми QUINTUS. Було отримано гранульний катод з розміром гранул до 0,06 мм при температурі 1160 ± 10 °C і робочому тиску 100 МПа протягом 4 годин. В таких установках гарячого ізостатичного пресування робочим тілом, що передає всебічний тиск, зазвичай, є інертний газ, який рівномірно ущільнює заготовку при забезпеченні стабільності її хімічного складу [18].

Технологія гранульної металургії (ГМ) дозволяє одержувати матеріали з унікальними властивостями, що забезпечується рядом суттєвих переваг [19]:

- високий рівень рівномірності механічних характеристик в об'ємі деталей завдяки мінімальній дендритній та зональній ліквіаціям;
- можливість одержувати складні вузли та вироби, які раніше виготовляли з окремих деталей, а потім з'єднували зварюванням або іншими способами;
- можливість одержання деталей з остаточними розмірами складної форми із-за підвищення деформованості матеріалів.
- висока оброблюваність одержаних виробів механічним інструментом, що суттєво знижує витрати на виготовлення та собівартість.

Та є і недоліки, пов'язані з обмеженістю товщини матеріалу при газостатуванні в 40 ... 50 мм, що для великогабаритних деталей недопустимо.

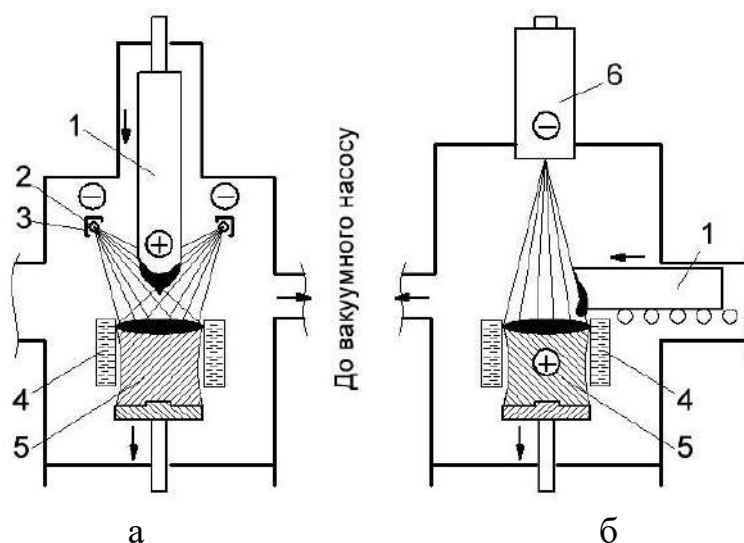
1.2.2 Виготовлення катодів методом електронно-променевого переплаву

Одним з перспективних способів отримання особливо чистих і однорідних тугоплавких металів є електронно-променевий переплав (ЕПП). Цей спосіб вважають найбільш економічним при отриманні Та, Мо, W, а також сталей і сплавів на основі нікелю, кобальту та ін. Зіставлення всіх рафінуючих переплавок показує, що при ЕПП найкраще видаляються гази, елементи з високою пружністю пару і включення високої та низької щільності завдяки високому вакууму, температурі і спрямованій кристалізації [20].

Процес ЕПП заснований на використанні теплової енергії, що виділяється в розплавленому металі при бомбардуванні його швидкими електронами. Стикаючись з поверхнею нагрітого металу, електрони значну частину своєї кінетичної енергії передають металу, підвищуючи його температуру. Отримати щільний, що не розсіюється в просторі, потік електронів можна тільки в глибокому вакуумі, при тиску меншому, ніж 10^{-2} Па. Тому всі установки ЕПП

забезпечені системами спеціальних насосів для отримання глибокого вакууму в робочому просторі [21].

Схема установок ЕПП приведена на рисунку 1.1 [20]. Джерелом електронів може служити розігрітий до високої температури кільцевий катод (рисунок 1.1 а), або, так звані, електронно-променеві гармати (рисунок 1.1 б). В установках ЕПП такої конструкції висока напруга (до 30000 В) створюється між розігрітим катодом, електродом, що розплавляється, і поверхнею зливка, що наплавляється, який служить анодом.



а - з кільцевим катодом; б - з електронною гарматою.

1 – електрод, що розплавляється; 2 - кільцевий катод; 3 - екран; 4 - кристалізатор;
5 – зливоч, що наплавляється; 6 - електронна гармата

Рисунок 1.1 – Схема установок електронно-променевого переплаву [20]

Електрони, що випромінюються катодом, розганяються електричним полем до високих швидкостей і при ударі о поверхню металу придбана ними кінетична енергія перетворюється на теплову. Це дозволяє концентрувати тепло біля поверхні розплаву в кристалізаторі і на поверхні електрода, що розплавляється.

У результаті електронно-променевого переплаву в металі значно зменшується вміст газів, досягається високий ступінь чистоти по неметалевим включенням, задана макроструктура зливків і висока однорідність металу. ЕПП забезпечує глибоке очищення металу від шкідливих домішок, кольорових металів

і дозволяє отримувати в литому вигляді високореакційні та тугоплавкі метали, що вимагають для свого розплавлення дуже високу температуру. Крім того, електронно-променеві установки застосовують для нанесення покриттів на метал і неметалеві матеріали, для пайки, зварювання, отримання монокристалічних металів. Електронно-променеве плавлення знайшло широке застосування як метод отримання особливо чистих металів і сплавів у вакуумі. Порівняно з традиційними способами вакуумної металургії (вакуумне індукційне плавлення), ЕПП дозволяє отримувати метали і сплави з більш низьким вмістом шкідливих домішок, у результаті чого істотно поліпшуються їх фізичні та механічні характеристики, підвищується надійність і довговічність виготовлених з них виробів [22].

ЕПП дозволяє регулювати параметри в широких межах, тому ЕПП можна використовувати не тільки витратні електроди, а й некомпактну або сипучу шихту (губка, стружка і т. п.), а також відходи прокатного або ковальсько-штампувального виробництва [23].

Найбільш широко в промисловості застосовують ЕПП витратні електроди в кристалізатор. Залежно від типу і кількості використовуваних електронних гармат електрод, що витрачається, подають в зону плавлення вертикально, горизонтально або похило. Вертикальна подача електрода створює більш вигідні умови рафінування металу, оскільки торець електрода, оплавленого під впливом електронного променя, приймає форму конуса, що збільшує реакційну поверхню. При бічній (горизонтальній або похилій) подачі електрод екранує від електронного променя ділянку поверхні металевої ванни в кристалізаторі, що призводить до неоднорідного розподілу енергії і погіршення умов формування зливка. Конструкція установок ЕПП забезпечує поділ електронних променів на дві частини: одна - для нагріву заготовки, що переплавляється, а друга - для нагріву поверхні рідкої ванни в кристалізаторі. Витратну заготовку опускають в зону плавлення за допомогою механізму, що подає. Під впливом бомбардування прискореними електронами здійснюються нагрів і плавлення нижнього торця заготовки. Розплавлений метал при цьому стікає у водоохолоджуваний

кристалізатор, де створюється рідка ванна, що підігрівається відхиленою частиною електронного променя [21]. Різновидом технологічної схеми електронно-променевого плавлення в кристалізаторі є переплавлення сипучої шихти (порошку, гранул, губки, стружки і т.п.), що застосовується для отримання компактного зливка, який потім піддається повторному ЕПП. За такою схемою переробляють титановий скрап, порошок ніобію та інші матеріали [24]. Робота установки ЕПП вимагає глибокого вакууму. Тому виникають проблеми при ЕПП металів і сплавів з високим рівнем газонасиченості, а також металів і сплавів з високою пружністю парів і сталей, легованих такими елементами. Для установок ЕПП характерна більш низька продуктивність порівняно з установками ВДП аналогічної потужності. Так, при однаковій потужності 150-200 кВт швидкість плавлення електрода в печах ВДП становить 5-10 кг/хв, а в установках ЕПП всього 0,4-0,5 кг/хв. Тому повний ККД електронного плавлення становить близько 10% і пояснюється необхідністю витримувати кожну чергову порцію забрудненого домішками металу, що потрапляє у ванну кристалізатора в перегрітому стані протягом певного часу, для отримання необхідного ступеня рафінування. Істотно підвищити ККД електронного плавлення можна при проведенні процесу рафінування металу не в кристалізаторі, а в проміжній ємності, тобто до потрапляння порції металу в кристалізатор.

Рідкий метал із заготовки, що оплавляється потрапляє в кристалізатор не відразу, а проходить додаткове рафінування в проміжній ємності, зробленої у вигляді водоохолоджувального лотка, а потім стікає в кристалізатор. Наявність проміжної ємності виключає падіння в кристалізатор шматків металу, що переплавляється при можливому розтріскуванні заготовки і дозволяє переплавляти не тільки якісно підготовлені заготовки, але й стружку, лом, порошок і т. п. Крім того, при подібній конструкції установок забезпечується більш глибоке рафінування металу внаслідок збільшення ступенів процесу і більш розвиненою поверхнею випаровування. Подальшим розвитком установок з проміжною ємністю є електронні плавильні установки з холодним подом [20].

Металургійні особливості ЕПП полягають у рафінуванні металу і засновані

на взаємодії металу, що розплавляється, з глибоким вакуумом. Рідкий метал утворюється на торці заготовки, що оплавляється, у вигляді крапель, стікає у кристалізатор, утворює рідку ванну на поверхні зливка, що наплавляється.

Незалежне джерело теплоти при ЕПП дає можливість в широких межах регулювати швидкість наплавлення зливка і тривалість перебування металу в рідкому стані [21].

При переплаві витратної заготовки метал піддається рафінуванню на трьох етапах існування його в рідкому стані: в пливці на торці електрода, що оплавляється, в краплях і на поверхні рідкої ванни. При однаковому діаметрі електрода, при ЕПП з вертикальною подачею заготовки, її кінець, що оплавляється, набуває конічної форми, за рахунок чого площа цієї поверхні в 2-4 рази перевищує площу поперечного перерізу електрода. У поєднанні з вищою температурою рідкого металу, більш глибоким вакуумом в робочому просторі це створює сприятливі умови для кращої дегазації металу, випаровування кольорових металів, вакуумно-вуглецевого розкислення і дисоціації неметалевих включень. Видалення домішок відбувається, в основному, в пливці рідкого металу на кінці електроду, що оплавляється. При ЕПП легованих сталей і хромистих сплавів на торці цього електроду видалається 70-80% кольорових металів, 40-50% азоту і міді. Зниження концентрації таких домішок, як Pb, Bi, Sb, Cu, Sn досягає більш 60% їх первинного вмісту, тобто відділяється значно більше, ніж при ВДП. У 2-4 рази більше, порівняно з ВДП, видалається при ЕПП водень з високолегованих сталей. Його залишкова концентрація після ЕПП, зазвичай, не перевищує $1 \text{ см}^3/100 \text{ г}$. За рахунок цього конструкційні сталі стають нефлокеночутливі. Вміст азоту у високолегованих сталях після ЕПП також в 1,5-2 рази нижче, ніж після ВДП [25].

Слід зазначити, що дистиляція металу від шкідливих домішок при ЕПП супроводжується також випаровуванням легуючих елементів і основи сплаву, що є негативною стороною рафінування. Втрати сплаву за рахунок випаровування досягають 3-5%. Конденсат на стінках камери установки ЕПП складається переважно з Mn, Cr і Fe. [26].

Рафінування металу від кисню здійснюється ЕПП за тим же механізмом, що і в інших процесах в умовах вакууму. Високі вакуум і температура рідкого металу сприяють дисоціації вихідних неметалевих включень, відновленню їх вуглецем, виділенню включень, що не встигли дисоціювати на поверхню металу і їх подальшої коагуляції з відокремленням шлакової фази [27, 28].

До переваг електронно-променевої технології можна віднести [22, 29, 30].:

- рафінуючу здатність процесу по видаленню легколетючих домішок;
- суттєве зниження вмісту домішок проникнення (O, C, H, N), що визначають структуру та механічні властивості металів;
- відсутність корозії обладнання, довготривалий термін його використання;
- можливість автоматизації процесу плавлення;
- рівномірність структури сплавів з регулюванням розміру зерна.

До недоліків:

- відсутність можливості використовувати дрібні фракції шихти при виплавках;
- неоднорідність складу зливків за рахунок поступового оплавлення шихти.

1.2.3 Виготовлення катодів методом вакуумно-індукційної виплавки

Вакуумно-індукційні печі (вакуумно-індукційна виплавка (ВІВ)) - це різновид електричних печей, що працюють на принципі роботи трансформатора. В індукційних печах змінне електромагнітне поле наводиться за допомогою спіралеподібного, що охолоджується водою або повітрям, індуктора (первинна обмотка), за яким пропускають первинний змінний електричний струм [31]. За вторинну обмотку використовується безпосередньо переплавлений ливарний сплав або стінка тигля. Саме в них знаходиться вторинний струм, який генерується в теплову енергію. Важливою особливістю індукційних печей є інтенсивна циркуляція рідкого металу, що викликається впливом

електромагнітних полів. Інтенсивність перемішування пропорційна квадрату ампер - витків (I_n)² і обернено пропорційна частоті струму (f). Перемішування розплаву прискорює процеси плавлення і вирівнювання розплаву за хімічним складом і температурою. Це є позитивною стороною індукційних печей. Іншою особливістю є те, що щільність вторинного (індукованого) струму досягає максимуму на поверхні розплаву, тобто під стінами футерування, і знижується у напрямку до внутрішніх його верств. Причому товщина поверхневого шару металу, де в основному спостерігається вторинний електричний струм, залежить від частоти даного струму, а саме значення товщини поверхневого шару будь-якого провідника (Δ), де в основному тече електричний струм, обернено пропорційний квадрату його частоти ($\Delta \rightarrow I/f^2$). Тому основна теплова енергія генерується саме в цьому шарі провідника. Основними перевагами індукційних печей є [32, 33]:

- генерування теплової енергії безпосередньо в матеріалі, що нагрівається і значно знижує втрати енергії;
- досягнення температури розплаву лімітується тільки стійкістю вогнетривкої футеровки печі;
- циркуляція розплаву в печі, яка прискорює процеси плавлення і стабілізації властивостей;
- незначний угар легуючих елементів;
- знижений вміст газів в розплаві.

Основними недоліками індукційних печей є:

- низька температура шлаку і, відповідно, мала його активність, тобто шлак не має ефективну рафінуючу властивість;
- значне роз'їдання футеровки під дією шлаку;
- ускладненість ремонту футеровки внаслідок малої товщини стінок і вертикального їхнього економічного розташування, особливо це стосується тигля малої місткості;
- обмежена ємність ванни.

Конструкції індукційних печей.

Індукційною піччю називається частина індукційної установки, що включає індуктор, каркас, камеру для плавлення, а також механізми нахилу. Залежно від способу наведення вторинного струму в сплави, що переплавляються, і конструктивного виконання, розрізняють два різновиди індукційних печей: тигельні і каналні. Індукційні тигельні печі (ІТП) широко застосовуються в промисловості для плавлення чорних і кольорових металів як на повітрі, так і у вакуумі і в захисних атмосферах. На даний час використовуються такі печі ємністю від десятків грамів до десятків тонн. Тигельні індукційні печі застосовують, головним чином, для плавлення високоякісних сталей та інших спеціальних сплавів, які вимагають особливої чистоти, однорідності і точності хімічного складу, що недосяжно в полумєневих і дугових печах [34].

Відмінність каналних печей від тигельних полягає в тому, що перетворення електромагнітної енергії в теплову відбувається в каналі тепловиділення, який повинен бути постійно заповнений електропровідним тілом. Для первинного пуску каналних вакуумних печей у канал заливають розплавлений метал або вставляють шаблон з матеріалу, який буде плавитися в печі. При завершенні плавлення метал з печі зливають в повному обсязі, залишаючи, так зване, болото, яке забезпечує заповнення каналу тепловиділенням для подальшого пуску. Для полегшення заміни подового каменю індукційні одиниці сучасних печей виготовляють відокремленими. У каналних індукційних печах виплавляють кольорові метали та їх сплави, чавун [35].

До переваг ВІВ можна віднести високий рівень перемішування металу, що сприяє усередненню хімічного складу, але конструктивні особливості методу зменшують площу реагування розплаву з рафінуючим середовищем і залежно від режиму видалення домішок може знижуватися загальний ступінь рафінування.

Важливим недоліком цього методу є застосування тиглів, що виготовлені із вогнетривких матеріалів, які контактують з розплавом. Наведення шлакової ванни є також негативним технологічним параметром виплавки жаростійких сплавів. Вакуумно-індукційний переплав застосовується для виготовлення заготовок і подальшого переплаву, тобто в технологіях з декількома переплавами, що

збільшує собівартість таких сплавів [36].

1.2.4 Виготовлення катодів методом вакуумно-дугового переплаву

На даний час вакуумно-дуговий переплав (ВДП) є одним з основних способів підвищення якості сталей і сплавів найрізнішого сортаменту (шарикопідшипникові сталі, жароміцні сплави, конструкційні сталі та ін.).

Процес ВДП заснований на переплаві металу у вакуумній дуговій печі в результаті нагрівання і плавлення витратного електрода електричною дугою великої потужності [37].

Електрична дуга горить між торцем переплавного електрода і поверхнею ванни рідкого металу. Переплав здійснюється у вакуумній камері, з якої системою вакуумних насосів безперервно відкачуються гази, що виділяються в процесі переплавки і парування металу [38]. Електрод кріпиться на спеціальному штоку, що вводиться у вакуумну камеру через ковзне вакуумне ущільнення. За рахунок високої температури електричної дуги торець електрода безперервно оплавлюється. Метал у вигляді крапель стікає в мідний водоохолоджувальний кристалізатор, де формується зливком. Під час оплавлення електрода і наплавлення зливка відбувається автоматичне переміщення електрода таким чином, щоб відстань між торцем електрода і зливком, що наплавляється, залишалася постійною.

Ще у 1892 р. принцип дугового переплаву з використанням витратного електрода був винайдений М.Г. Слав'яновим; у 1904 р. піч з електродом, що витрачається, при зниженому тиску в робочій камері, була використана для отримання литого танталу - металу з температурою плавлення 2900 °С. Обробку сталі методом ВДП почали використовувати з 1953 р. [38, 39].

У процесі ВДП відбувається значне видалення з металу газів (водень, азот), а також неметалевих включень [40]. При ВДП з металу в результаті випаровування

успішно видаляються домішки кольорових металів (Pb, Zn, Bi, Cd, Sb, Sn). Зливки кристалізуються у водоохолоджувальному мідному кристалізаторі, виходять однорідними за хімічним складом і макроструктурою. Процес ВДП використовується для переплавки тугоплавких і високореактивних металів (Nb, Ti, Zr, Mo та ін.), також сплавів на основі нікелю і кобальту [41-43].

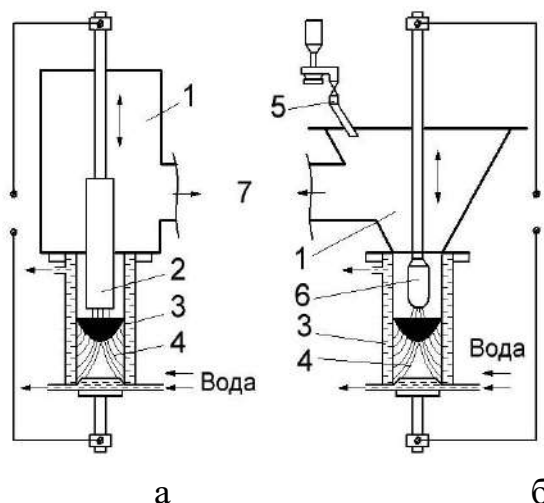
Принцип переплавки металів у вакуумі з використанням в якості джерела тепла електричної дуги був використаний уже після успішного плавлення сталі в дугових електричних печах. Спочатку цей процес застосовували для отримання в литому вигляді тугоплавких металів (танталу, молібдену, титану, цирконію). Саме з'єднання дугового розряду, як джерела тепла з високою температурою, з глибоким вакуумом, який забезпечував відсутність взаємодії легкоокислювальних металів з атмосферою, дозволило отримання зливок цих тугоплавких і високореакційних металів. У середині ХХ століття у зв'язку з швидким розвитком ракетної техніки і реактивної авіації вакуумно-дуговий переплав (ВДП) почали застосовувати для переплавки електродів з жароміцних сплавів. Передумовою для розвитку технології ВДП стосовно отримання зливок і сплавів на основі заліза і кобальту, а також нержавіючих, жароміцних та інших сплавів стало значне поліпшення службових властивостей спеціальних сталей і сплавів після переплавки у вакуумі. Тому ВДП знайшов широке застосування при отриманні металів і сплавів з гарними фізико-хімічними властивостями, які експлуатуються в умовах високих температур, знакозмінних навантажень, жорсткого рентгенівського випромінювання та ін. [38]. У промислових умовах методом ВДП отримують середньо- і високолеговані сталі, а також сплави на основі Ni, Co і Ti.

На даний час працюють установки ВДП, що дозволяють отримувати високоякісні зливки масою до 60 т. З таких зливок виробляють великі поковки виключно високої якості. Однак більшість установок ВДП, що працюють на металургійних заводах, мають місткість печей (масу зливка), що не перевищує 10-12 т. Найбільшого поширення набули печі ВДП 2-6 т.

Принцип дії і налаштування установок вакуумно-дугового переплаву

Існують два принципово відмінних типи вакуумних дугових печей: з

витратним і невитратним електродом (рисунок 1.2) [44].

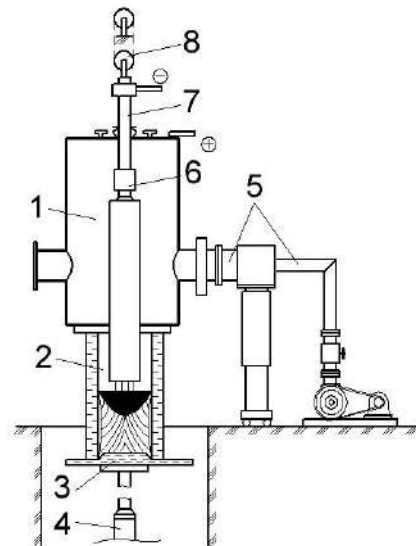


а - з витратним електродом; б – з невитратним електродом

1 - вакуумна камера; 2 - електрод, що витрачається; 3 - кристалізатор;
4 – зливоч, що наплавляється; 5 - живильник для подачі шихти; 6 - тугоплавка
насадка електрода, що не витрачається; 7 - напрямок до вакуумних насосів

Рисунок 1.2 – Вакуумні дугові печі [44]

У печах з витратним електродом (рисунок 1.2 а) дуга горить між електродом, що переплавляється і поверхнею ванни рідкого металу, а в печах з невитратним електродом (рисунок 1.2 б) - між графітовим або металевим електродом і розплавленим металом. В обох випадках переплав ведеться у вакуумній камері. При використанні невитратного електрода останній бере участь в процесі тільки як провідник струму. При веденні плавлення з невитратним електродом існує небезпека забруднення металу, що переплавляється матеріалом електрода, внаслідок його електричної ерозії і можливості відколювання частин. Спільним елементом вакуумних дугових печей є мідний водоохолоджувальний кристалізатор, в якому розплавлений метал твердне і поступово набуває форми зливка. Загальна компоновка вузлів установки ВДП приведена на рисунку 1.3.



1 - робоча камера; 2 - кристалізатор; 3 - піддон; 4 - механізм підйому електрода; 5 - вакуумна система; 6 - вузол кріплення електрода до штоку; 7 - шток електродотримача; 8 - підвіска штока

Рисунок 1.3 – Основні вузли установки ВДП

Технологічний цикл ВДП складається з декількох етапів: підготовчі та допоміжні операції, вакуумування робочого об'єму установки і перевірка натікання, власне, переплав.

Підготовчі операції включають виплавку вихідного металу, виготовлення та підготовку електродів, чистку кристалізатора, установку електрода в піч і закріплення його в електродотримачі [45]. Для підготовки витратних електродів використовується метал, виплавлений у відкритих дугових печах. Більш раціонально застосовувати електроди, відлиті на установці напівбезперервного розливання слалі, в основному без обдирання. При цьому відрізається верхня частина електрода з усадочною раковиною: проводиться зачистка абразивами. Кривизна електрода повинна бути не більше 20 мм на всю довжину (7-8 м). Довжина і вага електродів повинні забезпечувати отримання зливка певних маси і розмірів. Переплав може проводитися із затравочною шайбою або без неї. В останньому випадку торець електрода змочується іонізатором (NaCl, KCl). Електродотримачі виготовляються із м'якого заліза або з тієї ж марки сталі, що і витратні електроди, з'єднання електрода з електродотримачем здійснюється або

приварюванням, або спеціальним захватом.

Процес переплавки включає три основні періоди: початковий (або період розведення ванни), основний і завершальний (або період виведення усадочної раковини). У початковий період, при роботі із затравочною шайбою, після збудження дугового розряду між торцем електрода і затравочною шайбою, що укладається на піддон, здійснюють короткочасний прогрів електрода малим струмом. Струм протягом 2-5 хв плавно піднімається до значень, що складають 115-120% від робочого струму, а для електрода УПНРС $\sim 120-130\% I_p$ (за практичними даними) [44]. Витримка на підвищеному струмі $\sim 10-30$ хвилин. Після повного наведення ванни струм поступово (протягом 5 хв) знижується до номінального. При розведенні процесу без затравочної шайби попередньо проводять розігрів торця електрода малими струмами, що не викликають його оплавлення. Після закінчення прогріву струм протягом однієї хвилини збільшується до значень, що у 1,3-2 рази перевищують робочий I_p . Після наведення ванни підвищений струм витримується ще протягом 5-10 хв, а потім поступово знижується до I_p . Напруга на дузі при наведенні ванни рекомендується 26-29 В. Тривалість початкового періоду зазвичай не перевищує 10% загального часу переплаву. На початку основного періоду робочий струм знижують до номінального або робочого значення. Величину робочого струму вибирають з урахуванням діаметра кристалізатора, хімічного складу металу, що переплавляється, та схильності його до ліквідації. Тривалість переплавки електрода складає основну частку тривалості плавлення і на печах різної місткості становить від 3 до 20 годин. У завершальний період плавлення поступово знижують робочий струм, щоб зменшити обсяг рідкої ванни і, відповідно, знизити обсяг усадочної раковини. Після відключення струму зливки охолоджують у вакуумі до повної кристалізації металу у верхній його частині. Потім напускають повітря, охолоджують зливку до темно-червоного кольору. Усадка зливка полегшує його витяг з кристалізатора. Після вивантаження зливка у вакуумну камеру кристалізатор і піддон очищають від конденсату і готують для наступного плавлення. Основним показником нормального ходу плавлення ВДП є швидкість

наплавлення зливка [46].

Таким чином застосування технології ВДП на відміну від ВІВ і ЕПП при виготовленні катодів дозволяє сформувати щільну, дисперсну макро- і мікроструктуру, що відрізняється однорідним фазовим складом і рівномірним розподілом структурних складових. Використання методу ВДП (у порівнянні з методами ВІВ та ЕПП) максимально наближає структуру, хімічний склад та властивості сплаву до катодів, отриманих методом ГМ.

Раціонально використовувати у серійному виробництві катодів технологію ВДП, так як вона у рази дешевша за ГМ.

Вакуумно-дуговий переплав є порівняно недорогим з економічної точки зору. Але даний метод припускає використання витратного електроду та “глухого” кристалізатора. При цьому виникає потреба у застосуванні витратного електроду такого ж хімічного складу, як і сплав даного типу. Проведення процесу невитратним електродом чи застосування порційної подачі компонентів є неможливим у зв'язку з використанням «глухого» кристалізатора. Виплавка в такий кристалізатор до того ж може призвести до неоднорідності за хімічним складом по висоті зливка.

1.3 Види пошкоджень і руйнувань лопаток турбіни

Збільшення ресурсу роботи авіаційних двигунів пов'язане з удосконаленням конструкції лопаток, та покращенням технології нанесення на їх поверхню жаростійких покриттів. Як відомо, нікелеві жароміцні сплави ЖС26-НК та ЖС32-ВІ широко застосовуються для виробництва робочих лопаток авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) [10]. Їх працездатність визначається не тільки механічними властивостями матеріалу, а й мікроструктурою жароміцного сплаву, станом газоциркуляційного покриття (ГЦП) на поверхні внутрішньої порожнини і захисного покриття на її трактовій поверхні [47].

Однак, актуальними лишаються такі завдання: прогнозування ресурсу, аналіз експлуатаційних пошкоджень, оцінка ремонтпридатності і розробка раціональної технології ремонту робочих лопаток з даних сплавів.

Довговічність лопатки визначається термічною стабільністю структури сплаву. У сучасних жароміцних сплавах вона зростає зі збільшенням вмісту $Ta < 6.0$, $Re < 4.0$ і $Hf < 1.8\%$. Такі елементи з підвищеною температурою плавлення обмежують дифузійну рухливість легуючих елементів сплаву [10].

Використання традиційних алюмінідних покриттів для захисту лопаток турбін не ефективне, оскільки початок оплавлення міжфазної межі між шаром (β -NiAl і жароміцним сплавом (підкладкою) виникає при температурі вище $1120\text{ }^\circ\text{C}$ [48, 49]. У макроскопічному масштабі це викликає хвилястість поверхні захисного покриття ще до розвитку її активного окислення.

На практиці реалізовані і широко застосовуються такі технології нанесення захисних покриттів:

- LPPS (low pressure plasma spraying) для нанесення покриттів, що мають у своєму складі оксиди Y, Hf, Si [10];

- електронно-променева технологія випаровування і вакуумної конденсації покриттів MeCrAlY [50];

- технологія ВПТВЕ (вакуумно-плазмова технологія високих енергій), розроблена ВІАМ - зокрема для захисту робочих лопаток сучасних ГТД [51].

Конструкція, режим експлуатації, умови подачі палива в камеру згоряння перед турбіною зумовлюють виникнення зон локального перегріву на поверхні пера лопаток. Внаслідок впливу температурно-силових факторів і продуктів згоряння палива відбуваються безперервні зміни геометрії пера лопаток. В першу чергу - це вхідні кромки (рисунок 1.4) [52].



Рисунок 1.4 – Схема робочої лопатки ТВД авіаційного ГТД із зоною перегріву [52]

На жаль, промислове використання нового покоління сучасних теплозахисних покриттів на українських підприємствах поки обмежене [53, 54]. Практика експлуатації лопаток з серійними жаростійкими покриттями показує, що в зоні перегріву вони не можуть забезпечити надійний захист деталей на локальних ділянках пера.

При перегріві спостерігається пошкодження жаростійких захисних покриттів і деградація структури матеріалу лопатки. При високій температурі, коли швидкість дифузії компонентів велика, дрібнозерниста структура сполучного шару покриттів стає проникна для атомів тугоплавких елементів із захисних сплавів. Для нікелевого жароміцного сплаву деградація структури характеризується укрупненням розмірів часточок γ' – фази [52].

Деградація структури матеріалу лопатки і жаростійких покриттів посилюється при форсованих режимах роботи турбіни. Вони можуть спровокувати передчасне зниження довговічності робочої лопатки в локальних зонах, призвести до зародження і розвитку термовтомлених тріщин на вхідних і вихідних кромках і, в кінцевому підсумку, до руйнування деталі [55-57].

Розглянуто особливості деградації структури сплавів та захисних покриттів у процесі експлуатації для робочих лопаток ТК AI-450-МС. Металографічний аналіз виконували в поперечному перерізі пера в зоні характерного експлуатаційного пошкодження. Зовнішній вигляд і величина експлуатаційних пошкоджень поверхні робочих лопаток характеризують температуру і тривалість

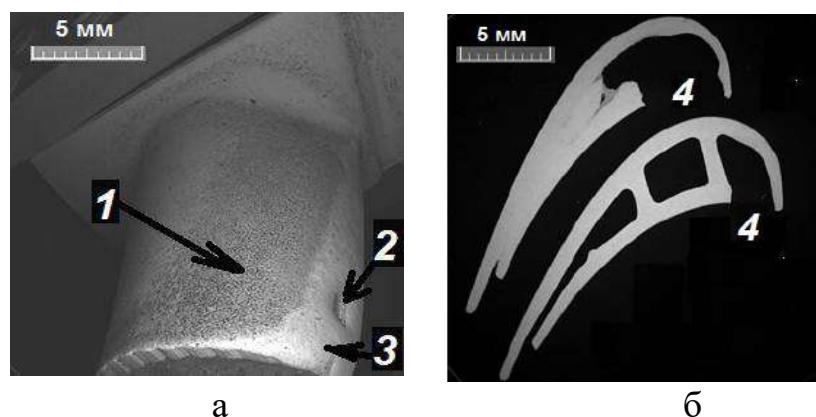
впливу газового потоку на вхідну кромку [58].

Встановлено характерні види експлуатаційних пошкоджень комплексу робочих лопаток зі сплаву ЖС32-ВІ допоміжного двигуна ТК АІ-450-МС після 1400 годин напрацювання. Дані лопатки мали: на трактовій поверхні пера двошарове жаростійке покриття у вигляді композиції ГЦП (β -NiAl) і нанесеного на нього покриття СДП-2 (NiCrAlY); на стінках внутрішньої порожнини пера - жаростійке ГЦП (β -NiAl).

Експлуатаційні пошкодження проявлялися у вигляді: корозійних пошкоджень і вибоїн на трактовій поверхні пера; деформації, руйнування локальних ділянок пера лопатки (рис.1.5).

Енергодисперсійний аналіз поверхні зони корозійних пошкоджень показав наявність повного спектра домішок (С, О, Na, К, Cl, Zn, S) і оксидних з'єднань основних легуючих елементів, що входять в сплав ЖС32- ВІ (Мо, W, Nb, Та, Re, Ni-основа, Cr).

Відзначено підвищений вміст вуглецю на поверхні пера - 20-70 мас. %, що значно перевищує його вміст в сплаві (0.1-0.18 мас.%).



1 – корозійні пошкодження; 2 - вибоїна; 3 - вигин кромки; 4 - локальні руйнування пера стінки лопатки поблизу вхідної крайки

Рисунок 1.5 – Зовнішній вигляд експлуатаційних пошкоджень трактової поверхні пера робочих лопаток АІ-450-МС [52]

Дослідження областей, прилеглих до ділянок руйнувань на пері лопатки (рис. 1.5), показало наявність: фронтального окислення жаростійкого покриття на

трактовій поверхні пера (рис. 1.6 б); тріщин термічної втоми з боку поверхні внутрішньої порожнини лопатки в околиці вхідної кромки (рис.1.6 а).

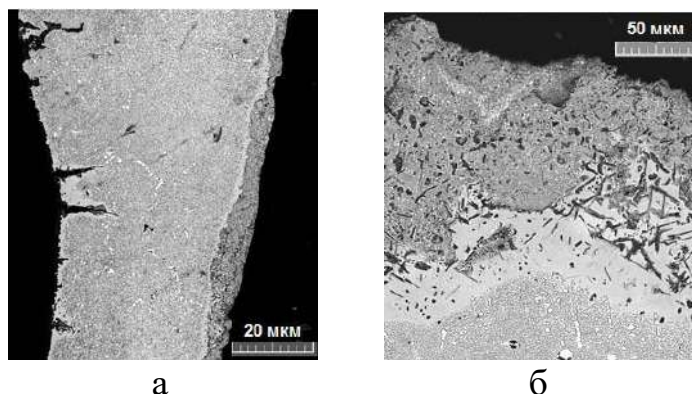


Рисунок 1.6 – Тріщини термічної втоми у внутрішній порожнині (а), фронтальне окислення захисного покриття на трактовій поверхні пера (б), на периферії локальних зон руйнування пера робочої лопатки допоміжного двигуна ТК АІ-450-МС після 1400 год напрацювання [52].

Вплив високотемпературного газового потоку при роботі двигуна і допалення піролітичного вуглецю в локальних зонах трактовій поверхні пера викликає істотне підвищення температури стінки лопатки. Це провокує оплавлення границі контакту покриття з базовим сплавом; втрату заданої форми її пера; сприяє виникненню тріщин термічної втоми. Аналіз експлуатаційних пошкоджень та змін мікроструктури лопатки показав, що температура перегріву локальних зон становила понад 1120 °С.

В результаті важких умов роботи авіаційних ГТД на поверхні пера лопаток виникають зони локального перегріву. Форсовані режими роботи двигуна посилюють вплив такого перегріву на структуру і властивості матеріалу лопаток і жаростійких покриттів [59, 60].

Практика експлуатації лопаток з промисловими захисними покриттями (СДП-2/ГЦП і ГЦП) показує, що в зоні перегріву спостерігається окислення захисного покриття і його дифузійна взаємодія з основним металом; утворення «рафт» - структури, розчинення і глобулярна коагуляція γ' - фази в нікелевому сплаві; деградація структури стінок лопаток, що викликає зниження довговічності

лопатки. У цілому, це обмежує міжремонтний ресурс лопаток і, в ряді випадків, може призвести при експлуатації до руйнування деталі через зародження і розвиток термовтомлених тріщин в лопатці турбіни [61].

Для ремонту лопаток рекомендується відновна термічна обробка у вакуумі, відновлення вихідної геометрії пера наплавленням торцевої частини; нанесення нового жаростійкого покриття на трактову поверхню деталі [62].

Критичним елементом довговічності термобар'єрних покриттів є хімічний склад сполучного шару, який забезпечується сучасними технологіями нанесення захисних покриттів. Вони дозволяють включити в його хімічний склад тугоплавкі елементи Ta, Re, Hf і W. Прикладом такого покриття може бути АЖ8 [63].

Таким чином, аналіз видів пошкоджень та руйнувань лопаток вказує на проблеми підвищення їх експлуатаційних показників та шляхів їх впровадження. Існуючі методи підготовки поверхні для нанесення захисних жаростійких покриттів, підвищення жаростійкості за рахунок розробки хімічного складу сплаву та поетапної технології ремонту лопаток потребують доопрацювання та вдосконалення.

Необхідно приділити увагу технології нанесення покриття, створенню нових схем нанесення з підвищеною товщиною в зонах максимального навантаження, та зменшенню дефектів, виникаючих внаслідок недосконалості металургійних методів отримання катодів для покриттів.

1.4 Характеристика способів підвищення довговічності деталей з нікелевих сплавів при газовій корозії

Підвищення жаростійкості авіаційних сплавів досягається легуванням алюмінієм та хромом. Це дозволяє сформувати на робочій поверхні деталей стійку оксидну плівку, що складається з оксидів Cr_2O_3 , Al_2O_3 , NiCr_2O_4 . Для отримання ефективних захисних покриттів використовують багаторазове легування

алюмінідами, створюють вдосконалені композиції і впроваджують нові технологічні процеси.

Алюмініди CoAl , Ni_3Al , NiAl формують основну інтерметалідну фазу більшості захисних покриттів деталей ГТД, що працюють при високих температурах [64-66].

Дифузійні захисні покриття, що одержують технологіями порошкового або газового алітування [67], хромоалітування [68], шлікерного алітування, алюмосиліціювання продовжують широко використовуватись для підвищення механічних характеристик деталей. Проте, такі покриття обмежуються по товщині до 0,04 ... 0,06 мм через їх значну крихкість, тому важливо підвищувати стійкість до розтріскування покриттів [69].

Найбільш широкого розповсюдження отримали конденсаційні покриття, одержувані магнетронним, іонно-плазмовим, електронно-променевим методами. Хімічний склад сплавів для жаростійких покриттів наведено в таблиці 1.3 [7,70].

Багатошарові композитні покриття, що містять у своєму складі W, Ta, Gd, La, Pt, Hf, Si, Yb створюють шляхом спільного застосування різних методів [7].

Таблиця 1.3 – Хімічний склад сплавів для покриттів [7,70]

Марка сплаву	Вміст елементів, % мас					
	Ni	Al	Cr	Co	Y	Si
СДП-1	Осн.	12	20	20	0,4	-
СДП-2	Осн.	12	20	-	0,4	-
ВСДП-11	-	Осн.	-	-	1,5	5
ВСДП-16	15	Осн.	-	-	1,5	-

Введенням в покриття таких мікролегуючих елементів як Y, La, Ce, Hf, Er, Yb підвищують стійкість оксидної плівки до відколювання при термоциклах [7].

Для гальмування дифузійних процесів в покриття вводять тугоплавкі метали Ta, W, Re, чи формують бар'єрні шари з карбідів легуючих елементів. Такі покриття добре протидіють не тільки окисленню, але і сольовій корозії. Для

подрібнення зерна структури покриття нерідко рекомендують застосування термомеханічної обробки [71]. Така обробка підвищує в'язкість і стійкість до утворення тріщин покриттів. Одночасно досягається бажаний напружений стан в системі сплав-покриття, формуються залишкові стискаючі напруження, які позитивно впливають на міцність деталей та їх стійкість до втоми.

Так само слід зазначити, що при високих температурах, понад 1400 °С, досить ефективно застосування теплобар'єрних покриттів, які зазвичай включають жаростійку металеву і керамічну складові [72].

Керамічна складова покриття, як правило, складається з оксиду цирконію, стабілізованого оксидом ітрію [73]. Вона зазвичай має стовпчасту дендритну структуру з орієнтованих монокристалів. Фазовий склад нанесеного поверхневого шару металічного покриття визначає орієнтацію кристалів конденсату.

Кристали керамічного конденсату, зароджуючись у вакуумі, повторюють орієнтацію кристалів поверхневої металевої структури.

Плазмова технологія нанесення керамічних покриттів дозволяє сформувати шар щільної кераміки. Проте, такі покриття менш стійкі до пластичної деформації, легше розтріскуються і відшаровуються. Якість теплобар'єрних покриттів значною мірою залежить від якості керамічних порошків: ZrO_2 , Y_2O_3 . Наявність Y_2O_3 обумовлено необхідністю стабілізації ZrO_2 від фазових перетворень. Плазмова технологія нанесення теплобар'єрних покриттів застосовується переважно при виготовленні соплових апаратів і деталей камери згоряння авіадвигунів [7].

Для підвищення теплопровідності в кераміку вводять оксиди рідкісноземельних металів. Стійкість теплобар'єрних покриттів найбільше залежить від стійкості композитного покриття до пропускання кисню до металічної основи.

Склад і властивості зносостійких та жаростійких покриттів значною мірою залежать від технології їх нанесення [74]. Методи створення таких покриттів за допомогою осадження діляться на фізичні (PVD) і хімічні (CVD). У середині цих двох груп існує досить велика кількість методів нанесення покриттів, у тому числі

комбінованих або методів з підтримкою чи активацією процесу від інших джерел енергії [75].

Процеси нанесення покриттів PVD і CVD засновані на різних явищах. Кінцевий же результат і в тому, і в іншому випадку - осадження з газової фази матеріалу покриття на підкладку. При фізичному осадженні (PVD) матеріал покриття переходить з твердого стану в газову фазу в результаті випаровування під впливом теплової енергії або в результаті розпилення за рахунок кінетичної енергії зіткнення часток з матеріалом. Енергія, розподіл і щільність потоку часток визначаються методом нанесення, параметрами процесу і формою часток. Нанесення покриттів методом PVD проводиться при температурі до 450 °C, що практично не обмежує вибір матеріалів, на які наноситься покриття. PVD - процеси проводять у вакуумі або в атмосфері робочого газу при досить низькому тиску. Вакуум необхідний для полегшення перенесення часток від джерела (мішені) до виробу (підкладки) при мінімальній кількості зіткнень з атомами або молекулами газу. Ця ж умова визначає обов'язковість прямого потоку часток. У результаті покриття наноситься тільки на ту частину виробу, яка орієнтована до джерела часток. Швидкість осадження залежить в цьому випадку від відносного розташування джерела і матеріалу. Для рівномірного нанесення покриття необхідний плавний рух матеріалу або застосування кількох, певним чином розташованих, джерел. У той же час, оскільки покриття наноситься тільки на поверхню, направлену до джерела часток, метод дозволяє селективно наносити покриття тільки на певні частини поверхні, залишаючи інші без нанесеного шару. Це абсолютно неможливо при використанні методу хімічного осадження (CVD). Основними факторами, що визначають якість покриття, нанесеного методом фізичного осадження, є чистота вихідних матеріалів і реакційного газу, а також необхідний рівень вакууму [75].

Метод хімічного осадження (CVD) практично не має обмежень за хімічним складом покриттів [76]. Всі присутні частки можуть бути осаджені на поверхню матеріалу. Які покриття при цьому утворюються, залежить від комбінації матеріалів і параметрів процесу. Якщо процес протікає при заповненні простору

реакційноздібним газом (киснем, азотом або вуглеводнями), в результаті хімічної реакції між атомами завантажених металів і молекулами газу відбувається нанесення оксидних, нітридних та карбідних покриттів. Склад покриття залежить від парціального тиску газу і швидкості осадження покриття. При використанні CVD-методу хімічні реакції відбуваються в безпосередній близькості або на поверхні матеріалу, що оброблюється. На противагу процесам PVD, при яких тверді матеріали покриття переводяться в газоподібну фазу випаровуванням або розпиленням, при CVD-процесі в камеру для нанесення покриття подається суміш газів, причому для протікання необхідних хімічних реакцій потрібна температура до 1100 °С [75].

Процеси CVD відбуваються при тисках 100-1000 Па. Покриття наноситься на всю поверхню виробу. Відпадає необхідність обертання виробу, яке має місце при методі PVD. Це одна з переваг CVD. Завдяки високій температурі нанесення, що забезпечує часткову дифузію і наноситься в основу, покриття CVD характеризуються кращою адгезією [77].

У вітчизняному машинобудуванні для напилення жаростійких покриттів частіше застосовується технологія, розроблена ВІАМ [78]. Та установки АПН-250 або МАП призначені для нанесення, жаростійких, ерозійно-стійких, зносостійких та інших видів покриттів іонно-плазмовим способом у вакуумі [79].

При використанні установки АПН-250 застосовується метод іонно-плазмового напилення. Його суть полягає в тому, що у вакуумній камері із залишковим тиском $6,65 \cdot 10^{-2}$ Па запалюється дуга між циліндричним катодом, що знаходиться в центрі і, розташованим по периферії, кільцевим анодом. Струм дуги локально (в катодній плямі) нагріває катод настільки, що його матеріал випаровується й іонізується. У проміжку між катодом і анодом розташовані лопатки, на які теж подається електрична напруга, і іони потрапляють не тільки на анод, а й на ці лопатки, прискорюючись електричним полем.

Переваги іонно-плазмового процесу осадження [80]:

1. Можливість управління енергією часток плазми, шляхом прискорення або гальмування іонів зміною електричного потенціалу деталі.

2. Спрямованість потоку плазми, що забезпечує високі значення КІМ катода.
3. Можливість осадження покриття при відносно низькій температурі основи (немає необхідності зовнішнього підігріву).
4. Можливість отримання складних покриттів.

Недоліки іонно-плазмового процесу осадження:

1. Недостатня кількість технологічних посадочних місць для установки напилювання лопаток.
2. Неефективна витрата матеріалу катода – 50 ... 60% залишається невикористаним через його геометрію.
3. Для проведення дослідних робіт потрібні значні витрати на виготовлення катодів через їх геометрію і матеріал [79].

Установка іонно-плазмового напилення КІБ розробки АТ «МОТОР СІЧ» призначена для отримання покриттів як і АПН-250, але має ряд переваг:

1. Можливість напилення холодним катодом.
2. Можливість використання катодів з економічною геометрією.
3. Раціональне до 90 % використання матеріалу катодів.

На цій установці можливо виконання робіт з нанесення комплексних жароміцних покриттів ВСДП-11 і СДП-2 лопаток газотурбінних двигунів. Але ресурс експлуатації даних покриттів недостатній і може бути збільшений за рахунок доопрацювання технології та удосконалення хімічного складу шляхом введення рідкісноземельних металів.

1.5 Системи Al-Ni, Al-Cr, Ni-Cr

У роботах [81-83] детально викладені особливості фазової будови сплавів системи Al-Ni. У роботі [84] встановлено утворення в цій системі ще одного з'єднання - Ni_5Al_3 і в даний час загальний вигляд діаграми стану вважається встановленим.

У сплавах системи, залежно від концентрації елементів утворюється п'ять з'єднань: NiAl_3 , Ni_2Al_3 , NiAl (β'), Ni_3Al (γ'), Ni_5Al_3 . Додаток Al до Ni знижує температуру магнітного перетворення до $70\text{ }^\circ\text{C}$ [83].

Аналіз металевої системи Al-Ni [81] показує, що вона характеризується низькою величиною розчинності нікелю в твердому алюмінії ($\sim 0,05\%$ (по масі) при $640\text{ }^\circ\text{C}$ [81]). Розчинність алюмінію в нікелі зменшується від 11% (по масі) при $1385\text{ }^\circ\text{C}$ до $5,2\%$ (по масі) за нормальної температури. Розчинність нікелю в рідкому алюмінії при 854°C становить $28,4\%$ (по масі) і підвищується з ростом температури. В інтервалі температур $650\text{-}900\text{ }^\circ\text{C}$ теплота розчинення нікелю в рідкому алюмінії становить $60,8\text{ кДж/моль}$, енергія активації розчинення нікелю в рідкому алюмінії дорівнює $41,4\text{ кДж/моль}$ [85,86].

Кристалічна структура інтерметалідних фаз, що утворюються в системі Al - Ni, представлена в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 - Кристалічна структура сполук системи Al – Ni [87]

З'єднання	Структурний тип	Прототип	Символ Пірсона / просторова група	Параметри решітки, нм		
				a	b	c
NiAl_3	$D0_{11}$	NiAl_3	$oP16/Pnma$	0,6611	0,7366	0,4812
Ni_2Al_3 $D5_{13}$	Ni_2Al_3	$hP5/P3$ $m1$	0,4036	-	0,4900	-
0	0	0	$cP2/Pm3m$	0,2887	-	-
Ni_5Al_3	0	Ga_3Pt_5	$oC16/Cmmm$	0,753	0,661	0,376
Ni_3Al	$L1_2$	AuCu_3	$cP4/Pm3m$	0,3589	-	-

У системі Al-Cr утворюються тверді розчини на основі (Al) і (Cr), а також шість проміжних фаз: β (CrAl_7), γ ($\text{Cr}_2\text{Al}_{11}$), δ (CrAl_4), ε (ε_1 , ε_2 , ε_3) (Cr_4Al_9), ζ ($\zeta_1\text{-Cr}_4\text{Al}_9$, $\zeta_2\text{-Cr}_5\text{Al}_8$) і η (Cr_2Al) [48, 87].

Фаза η (Cr_2Al) утворюється конгруентно при температурі $910\text{ }^\circ\text{C}$ з твердого стану. Решта фази утворюються за перетектичною реакцією. Фаза η (Cr_2Al) має вузький інтервал гомогенності.

Фаза γ ($\text{Cr}_2\text{Al}_{11}$) знаходиться в області концентрацій $14,07\text{-}15,75\%$ (ат.) Cr.

Фаза ε (Cr_4Al_9) розташована в діапазоні концентрації 30,8-33,5% (ат.) Cr в інтервалі температур 1060°C-1075 °C, відповідно. Фаза ζ (Cr_5Al_8) має інтервал гомогенності 36,0-42,0% (ат.) Cr при температурі 1125 °C. У фазі ε (Cr_4Al_9) протікає високотемпературне поліморфне перетворення $\varepsilon_1 \leftrightarrow \varepsilon_2$ при температурі – 1070 °C.

Поліморфне перетворення в цій фазі $\varepsilon_2 \leftrightarrow \varepsilon_3$, при температурах більших 700 °C є процесом типу впорядкування. Твердий розчин на основі Cr і фаза η антиферромагнітна при температурах нижче від 37 °C для Cr і нижче 640 °C для фази η .

У системі Cr-Ni існує проміжна фаза Ni_2Cr , яка утворюється в твердому стані. Евтектика між (Ni) і (Cr) кристалізується при температурі 1345 °C і вмісті 56% (ат.) Cr. У роботах [88,89] проведено комп'ютерне моделювання діаграм стану та озраховані діаграми твердих розчинів на основі Ni і Cr.

1.6 Постановка проблеми. Обґрунтування мети і формулювання задач наукового дослідження

Комплексний аналіз умов експлуатації лопаток газотурбінних двигунів і характеру їх пошкоджень дозволяє зробити висновок про наявність порушень цілісності захисного шару. Причиною таких пошкоджень і зниження якості нанесених покриттів може служити комплекс чинників (дефектів):

- нерівномірність нанесення покриттів в зоні інтенсивного зносу;
- неоднорідність структури покриття;
- наявність ліквіційних явищ в структурі покриття.

Приведені в розділі дослідження показали актуальність теми та необхідність вирішення питань, пов'язаних з вивченням впливу технології виготовлення катодів, впливу модифікаторів на структуру матеріалу, який випаровується, створення технології нанесення покриття з диференційованою товщиною шару.

Вирішення даних проблем на належному теоретичному і методичному рівні дозволить збільшити ресурс покриття, підвищити його жаростійкість і, як наслідок, збільшити ресурс самого двигуна в цілому.

На сьогоднішній день для підвищення експлуатаційних характеристик лопаток газотурбінних двигунів з жароміцних сплавів застосовуються захисні покриття, основою яких є система Ni-Cr-Al. Нікелеві жароміцні сплави є складними багатокомпонентними і багатофазними системами. В них під дією високих температур і напруг безперервно протікають фазові і структурні перетворення, тобто ці сплави є з фізико-хімічних позицій динамічними системами. Застосування складних систем легування обумовлено необхідністю стабілізації структури, а, отже, і властивостей нанесених покриттів. Такі сплави виготовляються із застосуванням модифікування і мікролегування.

Відомо, що при виробництві жаростійких і жароміцних сплавів на нікелевій основі в їх склад вводяться високоактивні, поверхнево-активні елементи (Y, Hf і La) з метою формування дрібнодисперсних фаз, що стабілізують структуру сплаву і підвищують його властивості. Ці елементи активно взаємодіють з домішками - елементами впровадження (переважно з вуглецем і киснем) і можуть утворювати стабільні карбіди і оксиди на кордонах розділу (міжфазні кордони, скупчення дислокацій і ін.). Також можливе утворення надлишкових з'єднань з Ni і Al.

Крім того, ітрій і лантан локалізуються на кордонах розділів фаз і структурних складових, утворюють надлишкові з'єднання, як з нікелем і алюмінієм, так і з елементами домішок.

Ітрій у відповідних пропорціях стабілізує оксидні плівки алюмінію і хрому, покращує адгезію нанесених покриттів до матеріалу підкладки, підвищує термічну стабільність сплавів, уповільнює коагуляцію зміцнюючих фаз. Ітрій, розчинений в нікелевої матриці, сприятливо діє на жароміцність нікелевих сплавів, що пояснюється гальмуванням дифузійних процесів. Введення ітрію в кількості, що перевищує його межу розчинності (для нікелю це 0,2-0,3 мас.%), призводить до виділення усередині і по кордонах зерен з'єднання, за хімічним складом близького до фази Ni₃Y. При цьому має місце зниження короткочасної міцності і в'язкості.

Hf так само не розчиняється в твердих розчинах і локалізується на кордонах розділів фаз, що призводить до подібного ефекту.

Практично відсутня інформація про вплив Hf і La на характеристики витратних катодів, (їх гомогенність), а як наслідок, і на властивості нанесених покриттів. Відомо, що розчинність La в Ni становить 0,3 ... 0,4% і Hf в Ni знаходиться на рівні приблизно 2%. La і Hf позитивно впливають на гомогенність хімічного складу і однорідність структури сплавів на нікелевій основі.

Оскільки основну роль в характеристиках нанесених покриттів грає якість застосовуваних катодів, необхідно забезпечити отримання їх хімічної, структурної та фазової однорідності з мінімальною кількістю дефектів. Концентрація модифікуючих елементів знаходиться на рівні десятих відсотка їх введення і рівномірний розподіл утруднено і є дуже важливим завданням.

Виходячи з вищевикладеного, прийнято рішення використовувати такі елементи, як La і Hf у вигляді альтернативних мікродобавок замість ітрію, з метою підвищення гомогенності хімічного складу, однорідності структури і технологічності процесу нанесення покриттів.

1.7 Висновки до розділу 1

Тому, враховуючи вище сказане, метою дисертаційної роботи є удосконалення металургійних процесів отримання катодів нової геометрії та складу, шляхом підвищення комплексу якісних та технологічних характеристик зливків. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити ряд наступних задач:

1. Дослідити вплив технологічних чинників та методів виготовлення катодів на процеси формування структури сплава.
2. Дослідити вплив технологічних чинників на процес осадження та формування жаростійких покриттів на деталях ГТД.
3. Дослідити вплив модифікуючих елементів на характеристики жаростійкості.

4. Дослідити структуру і властивості покриттів, отриманих на серійному і новому обладнанні із застосуванням модифікованих нікелевих сплавів.

5. Розробити технологію зняття градієнтного жаротривкого покриття з поверхні лопаток без пошкодження їх геометрії.

6. Виготовити дослідні зразки деталей газотурбінних двигунів, з нанесеним на них модифікованим покриттям.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Обладнання для виготовлення зливків катодів

Для отримання зливків Ni-Cr-Al з додаванням різних модифікаторів структури застосовувалась установка вакуумно-дугового гарнісажного переплава (ВДГП) (рисунок 2.1), яка дозволяє використовувати для виготовлення зливків сировину різної дисперсності (у вигляді порошків та чушок), що позитивно позначається на гомогенності отриманих зливків [21,90].

Підготовка шихти виконується шляхом механічного подрібнення матеріалів і відповідає даним, вказаним у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад шихтового матеріалу

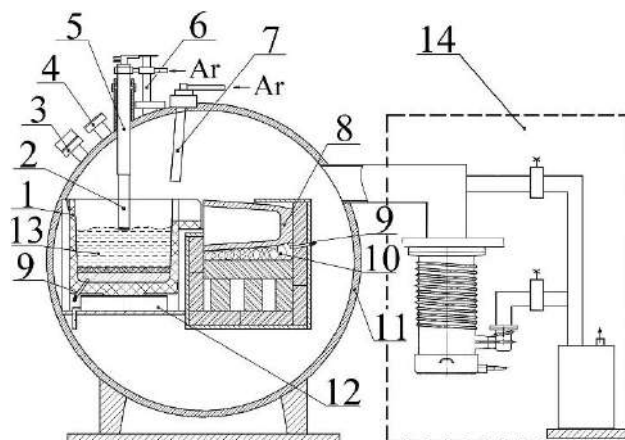
Хімічний склад, % маси						
№	Ni	Cr	Al	Hf	La	Y
1	67,55	20,00	12,00	0,56	-	-
2	67,55	20,00	12,00	-	0,55	-
3	67,55	20,00	12,00	-	-	0,6
4	67,55	20,00	12,00	-	0,3	0,35
5	67,55	20,00	12,00	0,3	0,15	0,3
Коеф. переходу	1,00	0,91	0,93	0,90	0,87	0,85

Як шихту для виплавки сплаву відповідної якості використовували наступні матеріали (у чистому вигляді): алюміній первинний (min 99,9%) ДСТУ ГОСТ 11069:2003; ітрій металічний (99,5%) ТУ 48-4-208-72; нікель катодний Н1У ДСТУ ГОСТ 492:2007; хром металічний Х99Н1 ДСТУ ГОСТ 5905:2005, лантан марки ЛаМ-1 ГОСТ 23862.5-79 (діючий до 2014р.); гафній йодідний ГФИ-1, ГОСТ 22517-77 (діючий до 2014р.) [91].

Переплави проводили в графітовому тиглі з наступним виливом сплаву у графітовий кокіль. Отримані зливки мали наступні геометричні параметри: діаметр 127 мм, висота 45-50 мм [90,91].

Технологічні режими роботи обладнання для виплавки зливків включали:

- роботу насоса вакуумного, бустерного, паромасляного типу 2НВБМ-160 і форвакуумного насоса типу АВЗ-20, які працювали 3 години на одну виплавку;
- роботу насосів контролювали вакуумметром ВИТ 2-П.



- 1 - тигель; 2 - неплавкий електрод; 3 - оглядове вікно з відео-фіксацією;
 4 - оглядове вікно; 5 - плазмотрон; 6 - привод переміщення; 7 - підведення аргону;
 8 - кокіль; 9 - термопара; 10 - нагрівачі; 11 - плавильна камера; 12 - анод;
 13 - расплав; 14 - вакуумна система

Рисунок 2.1 – Схема установки ВДГП [92]

Плавлення проводили у наступному діапазоні режимів технологічного процесу: $I = 450 \dots 1800 \text{ A}$, $U = 35 \dots 40 \text{ V}$, час = 25 ... 30 хв., попереднє створення вакууму $1 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$, робоча середа – суміш газів Ag/He (70/30), температура підігріву кокіля 300 ... 450 °С, температура розплаву перед заливкою 1550 ... 1750 °С час охолодження 60 ... 90 хв. Використання вище перерахованих параметрів дозволяє забезпечити якісний переплав і перемішування всіх компонентів сплаву з метою отримання гомогенної структури зливка і мінімізації ліквідаційних процесів [93].

2.2 Визначення хімічного складу і металографічні дослідження

Хімічний склад визначали рентгеноспектральним методом за ГОСТ 5632-72 (діючий до 2014р.) “Сталі високолеговані і сплави корозійно-стійкі, жаростійкі і

жароміцні. Марки”.

Для визначення елементного хімічного складу сплавів і покриттів проводили рентгеноспектральний аналіз на портативному спектрометрі DPO-2000 (фірма OLYMPUS, США). Додатково хімічний склад контролювався факультативними вимірами на оптико-емісійному спектрометрі SPECTROMAX (фірма SPECTRO, Німеччина).

Металографічні дослідження макро- і мікроструктури в не травленому і травленому стані матеріалів катода здійснювали на оптичному мікроскопі «Ахіо Observer. Dlm» (фірма Karl Zeiss, Німеччина), біноклярному стереомікроскопі SMZ 745T (фірма Nikon, Японія), а також на растровому електронному мікроскопі JSM-IT300LV (фірма Jeol, Японія).

Для аналізу мікро і макроструктури поверхню і шліфи піддавали травленню з використанням розчину «Фрі» (хлорид заліза (FeCl_3) - 27 г; кислота соляна 36 мл; вода 30 мл) протягом 4-6 с [94-96].

Виготовлення шліфів проводилося на установці AUTOMET-2 (фірма BUEHLER, США), величина зерна оцінювалася за ДСТУ 8972:2019. Розмір абразивного зерна, що використовували при шліфуванні P240, P400, P600, усі з подачею води. Фінішне полірування відбувалося на фетровому крузі з додаванням алмазної емульсії (DiaMaxx Mono, фракцією 3 мкм). Додатково після шліфування абразивами для очищення поверхні від забруднень використовували установку іонної очистки PECS II (Model 685) у середовищі газу Ar (фірма ATAN, США).

Для дослідження шару покриття використовували растровий електронний мікроскоп РЕМ-106И. Зразок фіксували на предметному столику вуглецевою електропровідною клейкою стрічкою.

Дослідження структури і складу, а також якості розподілу основних легуючих елементів виконували на травлених шліфах на багатоцільовому растровому мікроскопі JSM-IT300LV (фірма Jeol, Японія), оснащеному системою рентгеноспектрального енергодисперсійного мікроаналізу (РСМА) X-Max 80 (фірма Oxford Instruments, Великобританія).

Роботу виконували при прискорюваній напрузі 20 кВ і діаметрі

електронного зонда 4нм, при цьому діаметр зони збудження рентгенівського випромінювання становить близько 2 мкм. Визначення хімічного складу виконували безеталонним методом розрахунку фундаментальних параметрів: розрахунком поправочних коефіцієнтів відбиття електронів зонда, поглинання характеристичного рентгенівського випромінювання і флуоресценції.

Чорно - білі зображення поверхні шліфів отримані у вторинних і зворотньо відбитих електронах. Розподіл хімічних елементів на шліфах отримані методом картування і наведені у вигляді кольорових карт, де підвищений вміст хімічного елемента відповідає більш щільному забарвленню. Визначення локального складу виконано по точках (аналіз в точці) і на ділянках (аналіз по площі), зазначених на зображеннях шліфів під відповідними номерами, для яких представлені характеристичні спектри розрахунку хімічного складу.

Аналіз виконували трьома способами: методом картування локальної ділянки, який дає можливість отримати концентраційні карти якісного розподілу хімічних елементів; аналізами в точці і по площі, що забезпечують якісні та кількісні дані розподілу хімічних елементів в досліджуваних областях сплавів. Крім цього, використовували метод переміщення зонда уздовж заданої лінії, що дозволяє визначати вміст хімічних елементів в кожних двох послідовних точках досліджуваної ділянки із заданим інтервалом уздовж певної лінії.

2.3 Технологічний процес нанесення жаростійких покриттів методом вакуумно-плазмової технології високих енергій

Нанесення покриттів виконують у вакуумі шляхом осадження іонів з потоку плазми, додатково прискорених електричним полем на установці АПН-250 [79].

В залежності від енергії потоку часток виділяють такі види іонної обробки поверхні пера лопатки:

- енергія часток 10-102 eВ; відбувається осадження (конденсація) покриттів, що супроводжується іонним бомбардуванням і саморозпиленням конденсату на поверхні, що оброблюється;

- енергія часток 102-104 eВ; здійснюється іонне травлення поверхні, що оброблюється та супроводжується її розігрівом і термодифузійним насиченням;

- енергія часток 104-105 eВ; відбувається модифікування поверхні шару лопатки в результаті проникнення іонів потоку плазми в матеріал підкладки;

- енергія часток вище 105 eВ; відбувається розігрів поверхні пера лопатки вище за температури фазових і структурних змін.

В установці АПН-250 використовують плазму з енергією часток до 103 eВ, заснованій на методі катодного вакуумно-дугового розпилення матеріалу.

В установці передбачене іонне очищення поверхонь шляхом їх бомбардування іонами плазми матеріалу покриття при енергії іонів 400-500 eВ, що відповідає негативному потенціалу на лопатках 200-250 В [79].

Деталі розміщують за допомогою касет на планетарному механізмі, що забезпечує обертання деталі навколо власної осі і навколо циліндричного катода з матеріалу, який випаровується. При цьому іонне очищення призводить до активації поверхневого шару, його нагрівання і до утворення перехідної зони між покриттям та основним металом.

Для того, щоб локалізувати зону випаровування на катоді застосовують принцип електромагнітної фіксації катодних плям. Він полягає у стабілізації вакуумної дуги за допомогою електромагнітного поля на поверхні катода.

Деталі, що покриваються, розташовують в установці на рівні зони випаровування, це забезпечує максимальну швидкість осадження.

Установка АПН-250 при струмі вакуумної дуги 750 А забезпечує швидкість випаровування катода 200-215 г/год і швидкість осадження покриття, на обертовій підкладці 25 мкм/год [78].

При нанесенні покриття на поверхню деталей необхідно враховувати, що покриття системи Ni-Cr-Al-Y мають дифундуючу здатність в матеріал деталі. Покриття після стабілізуючого відпалу має величину дифузійної зони 5 ... 10% від

загальної товщини шару покриття.

Підготовка перед нанесенням покриття.

Перед нанесенням покриття, деталі проходять 100% візуальний контроль. Деталі повинні бути без механічних пошкоджень, слідів мастил, мастильно-охолоджуючих рідин та інших забруднень.

Шорсткість поверхні, що підлягає покриттю, повинна відповідати вимогам креслення.

Після візуального контролю деталі направляються на підготовку з метою очищення поверхонь від забруднень органічного та неорганічного характеру.

Від якості проведення підготовчих операцій залежить адгезія з матеріалом основи, відсутність домішок в шарі покриття, стабільність технологічного процесу нанесення, що, в кінцевому рахунку, відбивається на працездатності деталі з покриттям в експлуатації.

Очищення від забруднень включає в себе: промивку в бензин-розчиннику, ацетоні і дистильованій воді; повітряно-абразивне обдування; промивку деталей в спирті.

Нанесення покриття на установці АПН-250

Після операцій з очищення відбувається встановлення деталей в оснастку та завантаження їх в камеру установки, де проводиться їх вакуумування до тиску $P = 6,65 \times 10^{-2}$ Па ($6,65 \times 10^{-8}$ МПа) і нижче. Деталі в середині камери рухаються по планетарній траєкторії.

Далі відбувається іонне очищення та осадження покриття на деталі.

Процес іонної очистки полягає в бомбардуванні прискореними іонами матеріалу катода поверхні деталей, що знаходяться під негативним високим потенціалом. В результаті відбувається вибивання атомів поверхневого шару, що призводить до руйнування окисної плівки, видалення різного роду забруднень, розігріву деталей.

Іонне очищення сприяє якійсь адгезії покриття з матеріалом основи.

Режими іонного очищення:

- для зниження ймовірності мікродугових розрядів встановити мінімально

можливий струм стійкого горіння вакуумної дуги в межах
 $I_d = 400 \pm 25 \text{ A}$;

- регулюванням струмів систем підмагнічування катода в межах $0 \dots 5 \text{ A}$,
допомогтися стабільного горіння дуги.

- напруга на виробі $U_{\text{вир}} = 240 \text{ В}$;

Час проведення іонного очищення - 5 хв.

Наступний етап - це осадження (конденсація) покриття.

Процес осадження покриття починається з моменту завершення іонної
очистки та зниження потенціалу на виробі.

Швидкість конденсації, а відповідно і товщина покриття, пропорційна
струму дугового розряду і часу осадження. Разом з тим, зі збільшенням струму
дуги зростає температура оброблюваних деталей, яка залежить від їх розмірів і
маси, тому остаточне значення струму дугового розряду, часу конденсації і
отримане при цьому значення струму на виробі встановлюють експериментально
для кожної деталі за результатами не менше 3-х технологічних циклів.

Режими обробки: струм дугового розряду $I_d = 600 \pm 25 \text{ A}$; струм на виробі
 $8 \pm 1 \text{ A}$; час напилення $200 \pm 10 \text{ хв}$.

При досягненні заданої тривалості процесу осадження покриття - процес
припинити відключенням струму вакуумної дуги.

Товщина шару покриття складає $30 \dots 50 \text{ мкм}$.

Після завершення осадження деталі необхідно охолодити в вакуумі
протягом $60 \dots 90 \text{ хв}$.

Для отримання градієнтного (диференційного) шару покриття необхідно
після завершення циклу осадження та охолодження, відкрити камеру установки та
перевстановити лопатки в екрануючу оснастку. Оснастка забезпечує нанесення
покриття на вхідну кромку загальною товщиною $70 \dots 90 \text{ мкм}$ з поступовим
зменшенням на перо лопатки.

Після установки лопаток в екрануючу оснастку повторюють
вакуумування камери до до тиску $P = 6,65 * 10^{-2} \text{ Па}$ ($6,65 \times 10^{-8} \text{ МПа}$) і нижче.

Повторно проводиться іонне очищення, нанесення покриття та охолодження

за режимами викладеними вище.

Нанесення покриття на установці КІБ

Після операцій з очищення відбувається завантаження деталей в камеру установки, де проводиться їх вакуумування до тиску $P=6,65 \cdot 10^{-2}$ Па ($6,65 \times 10^{-8}$ МПа) і нижче. Деталі в середині камери розташовані статично в площині перпендикулярній плазмовому потоку [97]. Це обумовлено тим, що конструктивно в установці КІБ катоди розташовані на бічних стінках камери та їх кількість може варіюватися від 1 до 8 шт. У нашому варіанті установки катодів 4 - по два з кожної сторони деталі, що дає можливість відбіркового включення катодів та варіювання товщиною отриманого покриття за один цикл обробки.

Після вакуумування відбувається іонне очищення та осадження покриття на деталі.

Режими іонного очищення: струм дугового розряду $I_d = 250 \pm 10$ А на кожному катоді; напруга на деталях $U_{дет.} = 1500$ В.

Час іонного очищення - 3 хв.

Осадження (конденсація) покриття.

Процес осадження покриття починається з моменту завершення іонної очистки.

Режими обробки : струм дугового розряду $I_d = 300 \pm 10$ А на кожному катоді; напруга на деталях $U_{дет.} = 15 \pm 1$ В.

Час напилення 120 хв.

Використовуючи ці режими, наноситься рівномірний шар покриття на перо лопатки товщиною 30 ... 50 мкм.

Для отримання градієнтного (диференційного) шару покриття на установці КІБ необхідно продовжити наносити покриття за аналогічними режимами але попередньо відключивши 2 катоди від живлення.

Катоди відключаються з однієї сторони установки (у нашому випадку із сторони вихідної кромки) інші 2 катоди продовжують працювати. Таким чином працюючі катоди за ще 120 хв забезпечують нанесення покриття на вхідну кромку загальною товщиною 60 ... 90 мкм з поступовим зменшенням на перо лопатки.

При досягненні заданої тривалості процесу осадження покриття - процес зупинити відключенням струму вакуумної дуги. Охолодити деталі в вакуумі протягом 60 ... 90 хв.

2.4 Контроль якості покриття

Контроль якості покриття проводиться на підставі 100% візуального огляду деталей після нанесення покриття.

Отримане покриття повинне мати однорідний сірий, матовий колір, бути без забоїн, подряпин, сколів, спучування, розтріскування.

При візуальному контролі після відпалу та видалення окисів допускаються темні або світлі плями довільної форми.

Контроль капілярним методом ЛЮМ1-ОВ після відпалу та обдування електрокорундом проводиться за спеціальним нормативним документом [98,99].

Клас чутливості контролю, методом ЛЮМ1-ОВ, згідно ДСТУ 12706 (Якість продукції. Неруйнівний контроль. Капілярні методи.) І ДСТУ EN571-1-2001 (Неруйнівний. Капілярної методи. Загальні вимоги) - перший, особливо високий, виявляє дефекти з мінімальним розкриттям біля виходу на поверхню (менше 1 мкм). Суть методу ЛЮМ1-ОВ полягала в наступному: на очищену поверхню наносився шар проникаючої рідини (індикаторного пенетранта). Під впливом капілярних сил пенетрант проникав в поверхневі дефекти і утримувався в них. Через певний проміжок часу, необхідний для заповнення дефектів, пенетрант віддалявся з поверхні 26 деталі очищувачем (при цьому частина його залишалася в дефекті). Під дією проявника, який наноситься на поверхню, за рахунок дифузійних процесів індикаторний пенетрант витягувався з дефекту, утворюючи слід, чітко видимий в ультрафіолетовому світлі. Контроль ЛЮМ1-ОВ проводили із застосуванням індикаторного пенетранта ЛШ-6А, очищає рідину - водний розчин неолола АФ9-12, концентрація розчину 20 г / л, Проявник ПР-1 - по ТУ 6-

09-11-2163 (в'язкість проявника 14 одиниць). Шорсткість поверхні зразків становила не нижче Ra 3,2 мкм, відповідно до вимог ГОСТ 2789-73. Огляд під лампою з УФС випромінюванням проводили з освітленістю не більше 10 люкс.

Крапельна фаза повинна не перевищувати норми, вказаної у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 Норми крапельної фази покриття

Поверхня	Допустимі норми		
	Діаметр краплі, мм	Відстань між краплями, мм не менш	Кількість, шт.
Перо лопатки: Радіус вхідної кромки Радіус вихідної кромки	Не дозволяється більше 0.3 мм		
Перо лопатки: Спинка, корито	0.31 ... 0.8 включно	5	3
Радіус переходу поверхні пера з полицею хвостовика	0.31 ... 0.8 включно	5	3
Проточна поверхня полки хвостовика	0,5 не більше	3	4

2.5 Обладнання для нанесення іонно-плазмових покриттів

2.5.1 Установка для нанесення покриттів у вакуумі АПН-250

На сьогоднішній день для нанесення серійних іонно-плазмових покриттів іонно-плазмовим методом застосовуються установки АПН-250 (рисунок 2.2, таблиця 2.3), призначені для нанесення захисних, жароміцних, зносостійких і інших видів покриттів на вироби, що мають вісь обертання, плазмовим способом у вакуумі.

На рисунку 2.2 зазначені: катод, анод та місця розташування лопаток в середині камери напилення, де можливо розмістити 24...72 шт. турбінних лопаток, які рухаються по планітарній схемі між катодом та анодом.

Установка оснащена сучасною системою управління на базі промислового комп'ютера і PLC-контролерів, новими інверторними блоками живлення на базі

IGBT - технологій для іонного джерела і для дугового випарника.

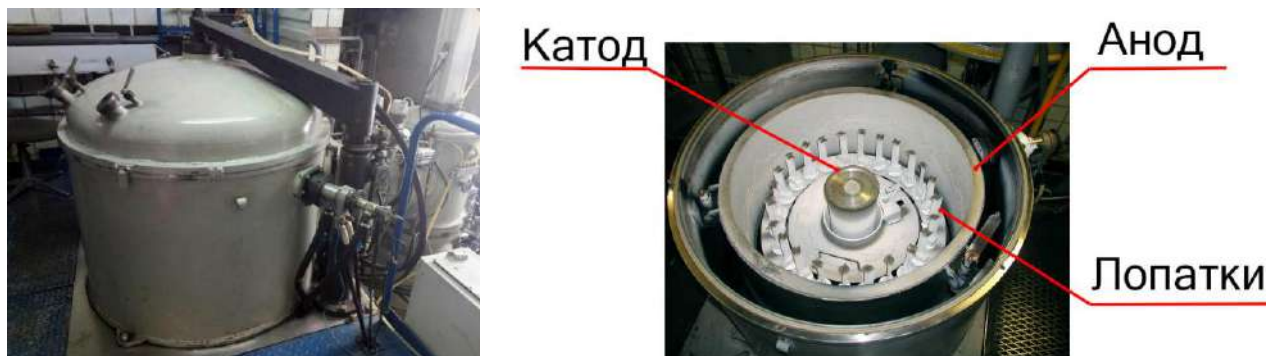


Рисунок 2.2 – Установка АПН-250 для нанесення покриттів у вакуумі

Таблиця 2.3 – Основні технічні характеристики установки АПН-250

Споживана потужність, кВт	60
Коефіцієнт матеріалу, що використовується, %	40 ... 70
Швидкість конденсації покриття, мкм / хв	1 ... 5
Кількість виробів що оброблюються одночасно, шт	Кратне 12
Габаритні розміри виробів, мм: діаметр / висота	120 / 200
Тиск в камері при іонізаційному очищенні виробів, Па	$1,33 \dots 1,33 \times 10^{-1}$
Тиск в камері при нанесенні покриттів, Па	$2,66 \times 10^{-2} \dots 6,65 \times 10^{-3}$
Габаритні розміри установки, мм: довжина / ширина / висота	3680 / 3640 / 3100

Коефіцієнт використання матеріалу катоду на установках АПН-250 складає 35 ... 40%.

2.5.2 Установка для нанесення покриттів у вакуумі КІБ

Установка КІБ спроектована та розроблена на АТ «МОТОР СИЧ» (рисунок 2.3, таблиця 2.4) та призначена для нанесення захисних, жароміцних,

ерозійностійких, зносостійких та інших видів покриттів на вироби, плазмовим способом у вакуумі [97,100].



Рисунок 2.3 – Установка КІБ для нанесення покриттів у вакуумі

Установка КІБ, на відміну від вищезгаданих установок АПН-250, має статичне закріплення деталей у середині камери для напилення та інше конструктивне розміщення катодів. Катоди в установці КІБ розташовані на бокових стінках камери. Катоди мають вигляд циліндрів з болтовим кріпленням. По периметру камери навколо осі переміщуються лопатки (у нашому випадку 288 шт. турбінних лопаток) але переміщення не планетарне, як в установках АПН, лопатки знаходяться у фіксованому положенні. Установка дозволяє використовувати до 8 катодів одночасно, що збільшує її продуктивність і дозволяє наносити жаростійкі покриття з градієнтним шаром.

Таблиця 2.4 – Основні технічні характеристики установки КІБ

Споживана потужність, кВт	60
Коефіцієнт матеріалу, що використовується, %	40 ... 80
Швидкість конденсації покриття, мкм / хв	1 ... 3
Кількість виробів, що оброблюються одночасно, шт	110 ... 640
Габаритні розміри виробів, що оброблюються, мм: ширина / висота	150 / 250
Тиск в камері при іонізаційному очищенні виробів, Па	$1,3 \times 10^{-2} \dots 6,6 \times 10^{-3}$
Тиск в камері при нанесенні покриттів, Па	$2,4 \times 10^{-1} \dots 3 \times 10^{-1}$
Габаритні розміри установки, мм: довжина / ширина / висота	3900 / 4200 / 2500

Установки КІБ мають коефіцієнт використання матеріалу катоду 70 ... 80%, що майже у два рази ефективніше за установки АПН-250.

2.5.3 Лабораторна електропіч SNOL 6,7/1300

Для випробування отриманих покриттів на жаростійкість використовували лабораторну електропіч SNOL 6,7/1300, яка має робочу температуру в діапазоні від 50 °С до 1300 °С.

Кожен із варіантів жаростійкого покриття наносили на зразок зі сплаву ЖС-32, нагрівали до температури 1100 °С, та витримували впродовж 100 ... 400 годин.

2.6 Методика дослідження властивостей нанесених покриттів

2.6.1 Методи дослідження високотемпературного окислення

Згідно літературних джерел кінетика окислення металів і сплавів визначається у термогравіметричній залежності у вигляді параболічної кривої [101-103].

$$(\Delta m / S)^2 = K_p \cdot \tau, \quad (2.1)$$

де Δm - величина зміни маси припадає на одиницю площі окислення поверхні S ;

τ - час, годин;

K_p - параболічна константа швидкості окислення.

Величину K_p визначали на стадії усталеного окислення, коли на поверхні зразків сформувалася захисна оксидна плівка. У разі застосування покриття

оксидна плівка на основі оксиду Al_2O_3 і швидкість окислення, в основному, визначається швидкістю сколювання окалини [103].

Дослідження характеристик жаростійкості при ізотермічному окисленні проводилося на зразках у наступних станах: без покриття; з серійним покриттям; з покриттям, що має модифікований склад.

Випробування проводили в корундових тиглях у повітряному середовищі при температурах $1050\text{ }^\circ\text{C}$ в електропечі SNOL 6,7/1300. Результати оцінювали за зміною питомої маси зразків ($\Delta m/S$, г/м^2), зовнішнім оглядом, зміною структури поверхневого шару, глибини корозійних пошкоджень, а також рентгеноструктурним аналізом фазового складу поверхневого шару зразків. Зразки з тиглями зважували на аналітичних вагах після 100, 200, 300 і 400 годин випробувань. Часи окислення відраховуються з моменту досягнення зразками заданої температури.

Як досліджувані зразки, використовувалися деталі, виготовлені зі сплаву марки ЖС32-ВІ. На частину зразків наносилося серійне і модифіковане покриття однакової товщини в 30 ... 50 мкм, так само були присутні контрольні зразки без покриття.

Після цього, зразки завантажували в піч і нагрівали до температури $1050\text{ }^\circ\text{C}$ протягом різного періоду часу. Масу зразків вимірювали на аналітичних вагах. Хімічний склад сплавів наведено в таблиці 2.6 і 2.7.

Таблиця 2.6 – Хімічний склад сплаву, мас. %

Сплав	Ni	Co	W	Al	Cr	Re	Ta	Nb	C	Mo	B	Ce
ЖС32-ВІ	Осн.	9,0	8,5	5,9	4,9	4,0	4,0	1,6	0,15	1,0	0,02	0,025

Таблиця 2.7 – Хімічний склад покриттів, мас. %

Сплав	Ni	Cr	Al	Y	La	Hf
СДП-2 (базовий)	Осн.	18 ... 22	11 ... 13	0,2 ... 0,6	-	-
Сплав (№1)	Осн.	18 ... 22	11 ... 13	0,2 ... 0,5	-	-
Сплав (№2)	Осн.	18 ... 22	11 ... 13	-	0,2 ... 0,5	-
Сплав (№3)	Осн.	18 ... 22	11 ... 13	-	-	0,2 ... 0,5
Сплав (№4)	Осн.	18 ... 22	11 ... 13	0,2 ... 0,3	0,2 ... 0,3	-
Сплав (№5)	Осн.	18 ... 22	11 ... 13	0,2 ... 0,3	0,1 ... 0,2	0,2 ... 0,3

2.6.2 Методика дослідження механічних властивостей

Вимірювання мікротвердості проводили за ДСТУ ISO 6507-1:2007. Цей стандарт встановлює метод вимірювання твердості за Віккерсом чорних і кольорових металів при навантаженнях від 9,8 Н до 980 Н. За допомогою методу Віккерса при невеликих навантаженнях можна визначати твердість дуже тонких поверхневих шарів. Як індентор, використовували алмазну пірамідку. При вимірюванні мікротвердості поверхню зразків очищують. Дослідження проводили на установці LECO АМН-43 при навантаженні 0,1 кг. Розрахунок мікротвердості проходив в автоматичному режимі.

Система автоматичного вимірювання мікро- і макротвердості АМН-43 фірми LECO використовує запатентований метод, який дозволяє отримувати на екрані панорамне зображення зразка, що досліджується. Завдяки цьому можливо проводити індентування, спостерігати, як окремі зони зразка, так і весь зразок цілком.

Система АМН-43 дозволяє створювати схеми індентування, необхідні для того чи іншого виду виробів. У них можливо вказати кількість і порядок проставлення відбитків на зразку, відстань між ними та інші умови зйомки. Отримавши на екрані панорамне зображення зразка, залишається тільки розмістити на ньому потрібну схему індентування. Після цього система АМН-43 сама розставить відбитки за вказаною схемою, а потім в автоматичному режимі зробить їх вимір. На підставі отриманих результатів система автоматично створює звіт з таблицею результатів вимірювань, графік зміни твердості зразка.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНОГО ТА ХІМІЧНОГО СКЛАДУ КАТОДІВ, ВИГОТОВЛЕНИХ РІЗНИМИ МЕТОДАМИ

3.1 Вплив метода виготовлення сплаву на структуру катодів

Як відмічали у першому розділі, існує чотири основні методи виготовлення катодів для нанесення іонно-плазмових покриттів, це: гранульна металургія (ГМ), вакуумно-індукційна виплавка (ВІВ), електронно-променевий переплав (ЕПП), вакуумно-дуговий переплав (ВДП).

Кожен з методів має свої переваги та недоліки тому доцільно порівняти їх між собою та обрати один найбільш перспективний для подальшого використання у серійному нанесенні покриттів на деталі ГТД. Обраний метод повинен забезпечити підвищення якості покриттів за рахунок зменшення дефектів та підвищення рівномірності розподілу хімічного складу.

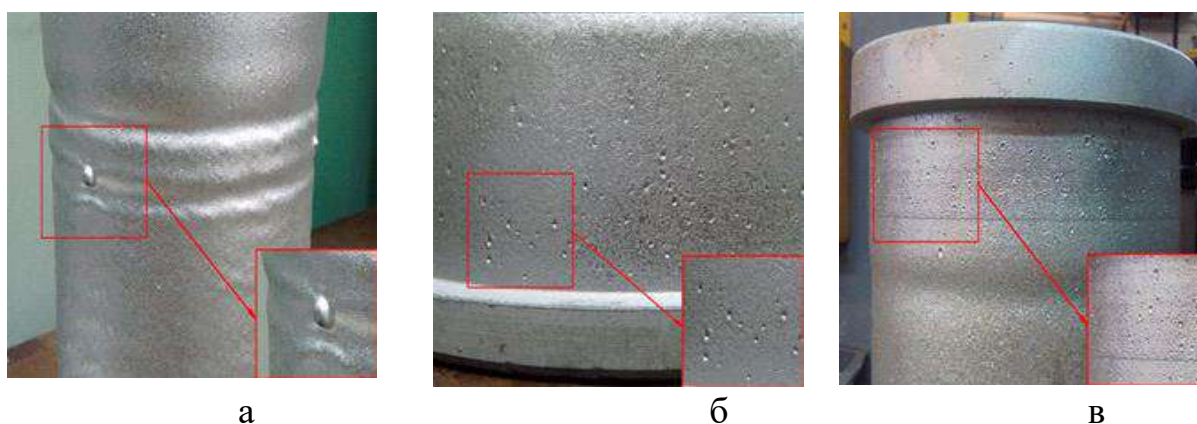
Крім того метод повинен забезпечити можливість виготовлення катодів нової геометрії, які можливо використовувати при впровадженні установки КІБ.

За порівняльну основу був узятий жаростійкий сплав системи Ni-Cr-Al-Y (Ni - основа, Cr - 18...22%, Al - 11...13,5%, Y - 0,3...0,6%) та виготовлена партія катодів. Кожна партія включала в себе 4 катоди.

В якості модифікаторів основного сплаву використовували високоактивні, поверхнево-активні елементи Y, Hf і La з метою формування нанорозмірних фаз, що стабілізують структуру сплаву і підвищують його властивості, зокрема жаростійкість [104, 105].

3.1.1 Вимоги до зливків катодів

Циліндричні катоди для отримання покриттів на установках іонно-плазмового нанесення, на сьогодні мають досить багато металургійних дефектів, таких як негомогенність структури, наявність пор, тріщин та ін. В основному ці ознаки проявляються вже в процесі нанесення покриття і призводять до утворення дефектів на самих лопатках, що неприпустимо у авіадвигунобудуванні (Рисунок 3.1).



а – нерівномірність розподілу шихти в процесі виплавки; б, в – наявність пор в середині катоду.

Рисунок 3.1 – Види дефектів циліндричних катодів

Для зменшення кількості дефектів у процесі експлуатації, ще на стадії виготовлення, до катодів висуваються суворі вимоги з якості.

Так литі трубні заготовки повинні мають бути за розмірами: діаметр зовнішній 180 ... 185 мм, діаметр внутрішній 133 ... 139 мм, довжина 350 мм.

Хімічний склад зливків повинен відповідати заданому та технічним умовам, тріщини на виливках не допускаються. На поверхні допускаються ливарні дефекти, що укладаються в припуск на механічну обробку (чистові розміри катода: діаметр зовнішній - 180 мм; діаметр внутрішній - 140,5 мм, довжина - 340 мм).

На внутрішній поверхні катода допускається не більше двох ужимин

площею до 200 см², глибиною до 3 мм, а також будь-які дефекти глибиною не більше 4 мм, діаметром не більше 10 мм. Рентгеноконтроль допускає наявність одиничних пор, раковин та інші дефекти розміром не більше 5 мм в кількості не більше 3-х штук на площі 25 см², з відстанню між дефектами не менше 20 мм і не більше 15 таких дефектів на одному зливку.

Крім зазначених одиничних дефектів допускаються дрібні дефекти (діаметром не більше 2 мм) групового розташування з відстанню між окремими групами не менше 20 мм. Під груповим розташуванням дефектів розуміється наявність від 3 до 5 дефектів діаметром рівним чи менше 2 мм. Кількість таких груп не більше 25.

Тож для скорочення кількості дефектів і підвищення якості нанесення покриття потрібно розглянути різні металургійні методи виготовлення катодів і порівняння якості одержуваного покриття. За рахунок поліпшення металургійної технології отримання катодів зменшимо дефекти покриття.

3.1.2 Дослідження катодів, виготовлених методом гранульної металургії

Катод, виготовлений ГМ, отримували за рахунок компактування у гарячому ізостатичному пресі гранул матеріалу складу Ni-Cr-Al-Y фракцією до 0,06 мм при температурі 1160 ± 10 °C та тиску 100 МПа з витримкою впродовж 4 годин.

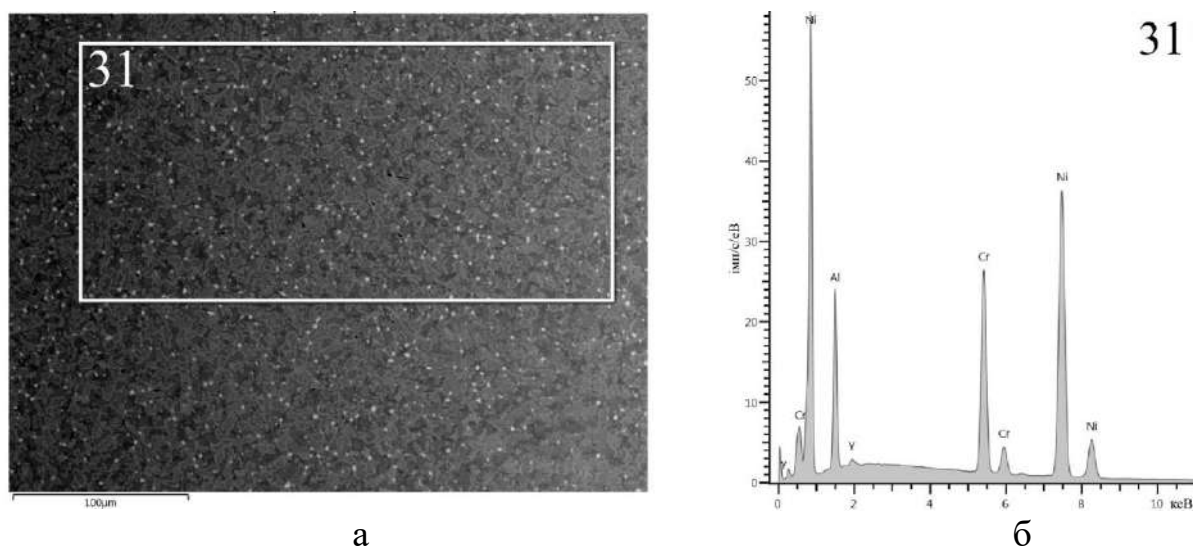
При компактуванні використовували гранули, отримані газоструменевим розпилюванням розплаву [18].

Після компактування катоди проходили етапи механічної обробки з метою забезпечення необхідних геометричних розмірів. В процесі виготовлення від катодів були відрізані фрагменти розміром 50x30x20 мм для оцінки якості отриманого матеріалу.

Хімічний склад сплаву катода визначали методом рентгеноспектрального аналізу. Дослідження мікроструктури катодів проводили на мікрошліфах з

використанням мікроскопа «Axio Observer. Dlm» та сканувального електронного мікроскопа «Jeol JSM 6360LA» за методиками, викладеними у розділі 2.

За результатами аналізу (рисунок 3.2) встановлено, що хімічний склад дослідного катода, відповідає вимогам.



а – мікроструктура катода в позначеній зоні аналізу; б – спектрограма позначеної зони.

Рисунок 3.2 – Результати рентгеноспектрального мікроаналізу (РСМА) катода Ni-Cr-Al-Y, отриманого ГМ.

У відповідності до отриманих результатів складена таблиця 3.1 з процентним позначенням елементів в складі сплаву.

Таблиця 3.1 - Хімічний склад катода, виготовленого методом ГМ, мас. %

№	Елемент	Спектр 31
1	Al	12.12
2	Cr	21.45
3	Ni	65.66
4	Y	0.77

Макроструктурний аналіз показав, що матеріал катода щільний, дірчастостей, тріщин, по кількості та розмірам перевищуючих вимоги НТД, не виявлено.

Згідно з даними електронно-мікроскопічного дослідження (рисунок 3.3, таблиця 3.2) встановлено, що матеріал катода представляє собою γ - твердий

розчин на основі Ni з наявністю інтерметалідних Ni-Cr-Al фаз змінного складу. Розподіл фаз з Y представлений у вигляді окремих включень (білого кольору на електронному фото структури), розподілених по матеріалу катода [106].

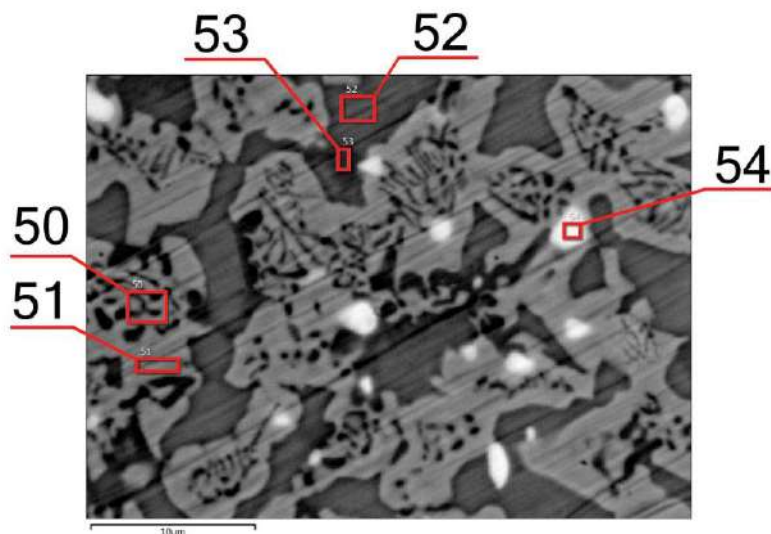


Рисунок 3.3 – Мікроструктура катода Ni-Cr-Al-Y, отриманого ГМ з позначеними зонами РСМА

Із аналізу мікроструктури сплаву встановлено, що він уявляє собою двофазний сплав з розміром фаз – від 10 до 40 мкм, при цьому розмір фаз, які містять іттрій 0,5 ... 2 мкм.

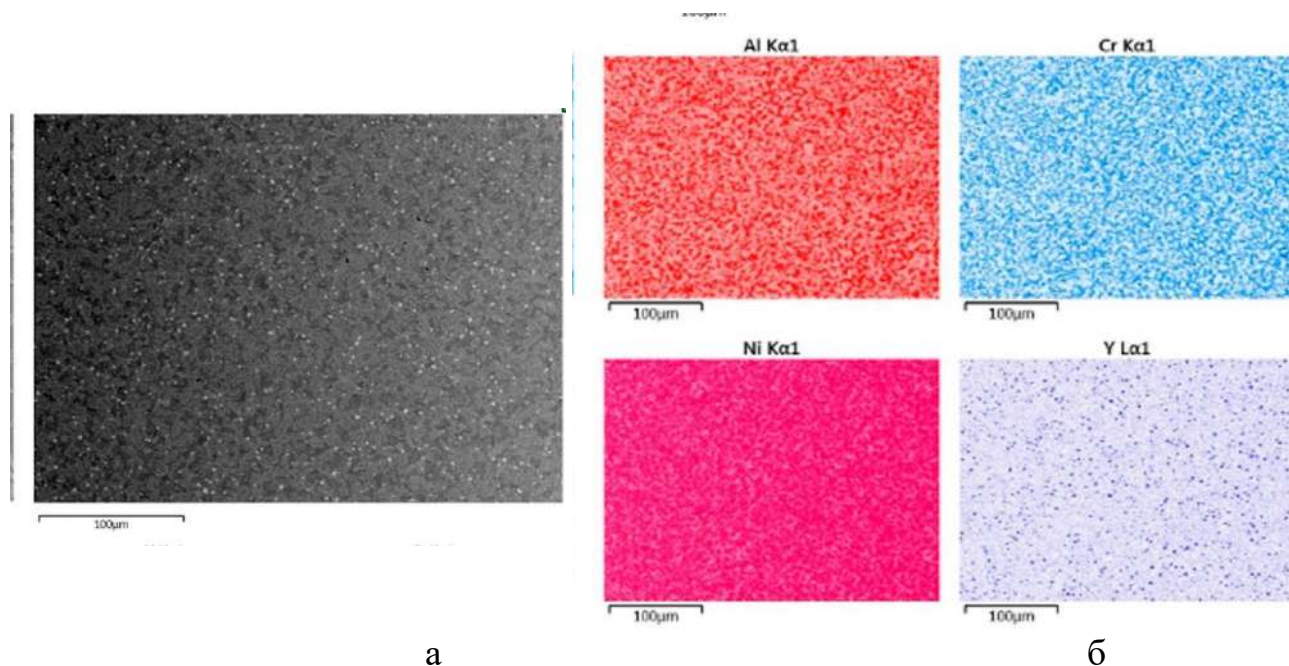
Для встановлення складу фаз проводили хімічний аналіз по зонам, вказаним на рисунку 3.3. Результати аналізу представлені в Таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Хімічний склад в зонах позначених на рисунку 3.3, мас. %

Елемент	Спектр				
	50	51	52	53	54
Al	7.79	12.17	20.56	8.91	5.68
Cr	33.93	8.21	5.62	3.83	44.00
Ni	58.14	79.62	73.82	34.11	66.71
Y	0.14	0.00	0.00	0.52	23.79

Має місце висока однорідність і дисперсність усіх структурних складових матеріалу гранульного катода (рисунок 3.4). Зокрема форма ітрієвої фази наближена до правильної, а її розміри не перевищують 2 мкм. Це обумовлено

застосуванням гранульної технології виготовлення сплаву (розмір гранул $\leq 0,06$ мм) і відповідно спадковістю, набутою заготовкою катода при компактуванні.



а – електронна фотографія зони аналізу, б – карти розподілу хімічних елементів по зоні аналізу.

Рисунок 3.4 Результати РСМА у режимі картування в катоді, отриманому способом ГМ

Циліндричний катод, виготовлений методом ГМ, випробувався на установці АПН-250. Установка з дослідним катодом працювала стабільно, всі технологічні параметри відповідали серійній технології.

Після виконання першого циклу напилення його поверхня стала більш шорсткою, а при подальших циклах експлуатації з'явилися напливи матеріалу по всій поверхні катода (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 – Зовнішній вигляд катода ГМ після експлуатації

Встановлено, що попри дефект “хвилястості”, інших дефектів катод не мав.

Однак технологія ГМ дуже затратна і її не можливо використовувати при виготовленні катодів для установки КІБ. Розміри циліндричних катодів для установки КІБ $\varnothing 127$ мм, висота 45-50 мм, що унеможлиблює їх виготовлення ГМ, так як товщина матеріалу для пресування повинна не перевищувати 35 мм. Отже виникає необхідність провести дослідження різних металургійних методів виготовлення катодів і отримати катоди заданої геометрії. При цьому необхідно забезпечити рівномірність хімічного складу та структури аналогічного ГМ.

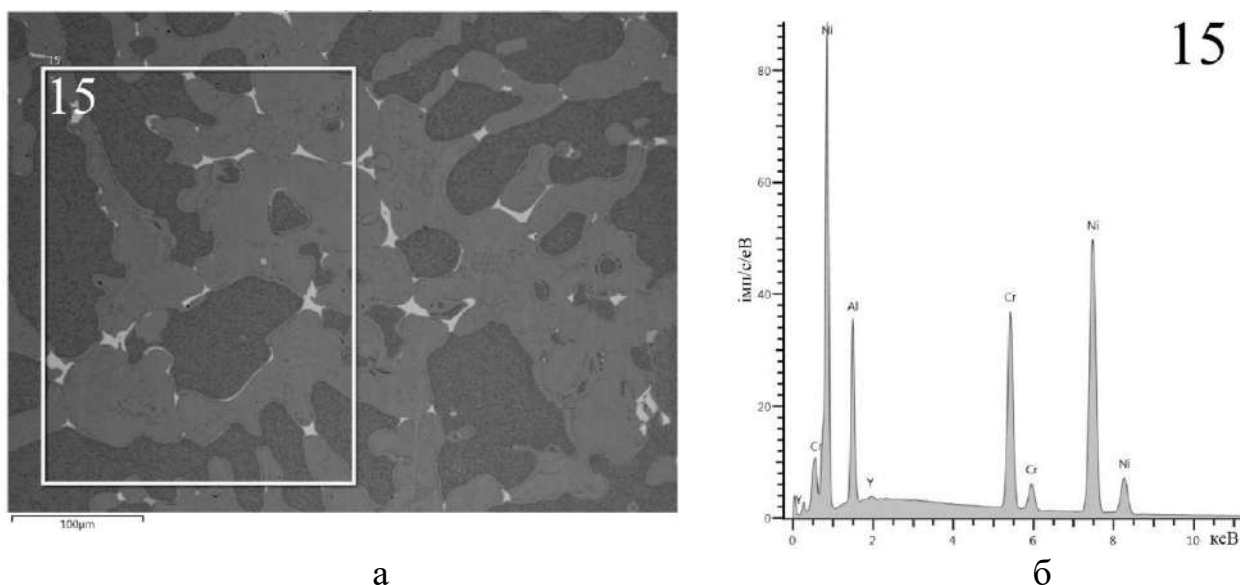
3.1.3 Дослідження катодів, виготовлених методом вакуумно-індукційної виплавки (ВІВ)

Катоди виготовлені ВІВ отримували переплавом шихтових компонентів сплаву на вакуумно-індукційній плавильній установці ІСВ-016. Для усунення внутрішньої пористості литий катод піддавали гарячій ізостатичній обробці на пресі фірми QUINTUS [74].

Після лиття катоди проходили етапи механічної обробки з метою забезпечення необхідних розмірів. В процесі виготовлення від катодів були відрізані фрагменти розміром 50x30x20 мм для оцінки якості матеріалу.

Хімічний склад сплаву катода визначали методом рентгеноспектрального аналізу. Дослідження мікроструктури катодів проводили за методиками, викладеними у розділі 2.

За результатами аналізу (рисунок 3.6 та таблиці 3.3) встановлено, що хімічний склад дослідного катода, відповідає нормативно-технічній документації.



а – мікроструктура катода в позначеній зоні аналізу; б – спектрограма позначеної зони.

Рисунок 3.6 – Результати РСМА катода Ni-Cr-Al-Y, отриманого ВІВ

У відповідності до отриманих результатів складена таблиця 3.3 з процентним позначенням елементів в складі сплаву.

Таблиця 3.3 – Хімічний склад катодів, виготовлених методом ВІВ, мас. %

№	Елемент	Спектр 15
1	Al	12.27
2	Cr	21.81
3	Ni	65.48
4	Y	0.44

Макроструктурний аналіз показав, що матеріал катода щільний, дірчастості, тріщин по кількості та розмірам перевищуючих вимоги НТД, не виявлено.

Згідно з даними електронно-мікроскопічного дослідження (рисунок 3.7,

таблиця 3.4) встановлено, що матеріал катода представляє собою γ - твердий розчин на основі Ni з наявністю інтерметалідних Ni-Cr-Al фаз змінного складу. Фаза з Y представлена у вигляді окремих включень неправильної форми та різного розміру (білого кольору на фото структури), розподілених по матеріалу катода.

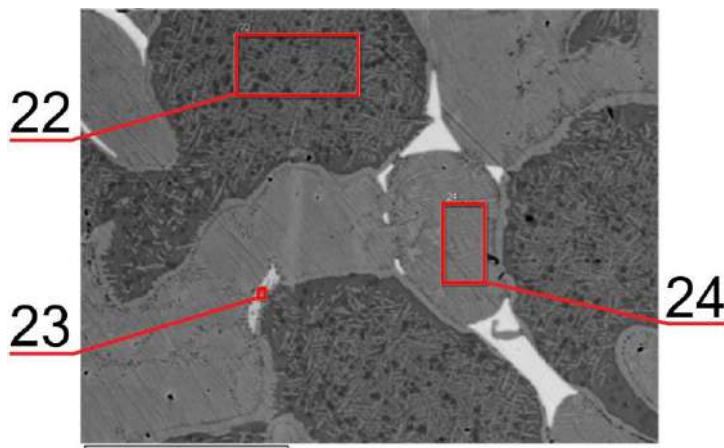


Рисунок 3.7 – Мікроструктура катода Ni-Cr-Al-Y, отриманого ВІВ з позначеними зонами РСМА аналізу

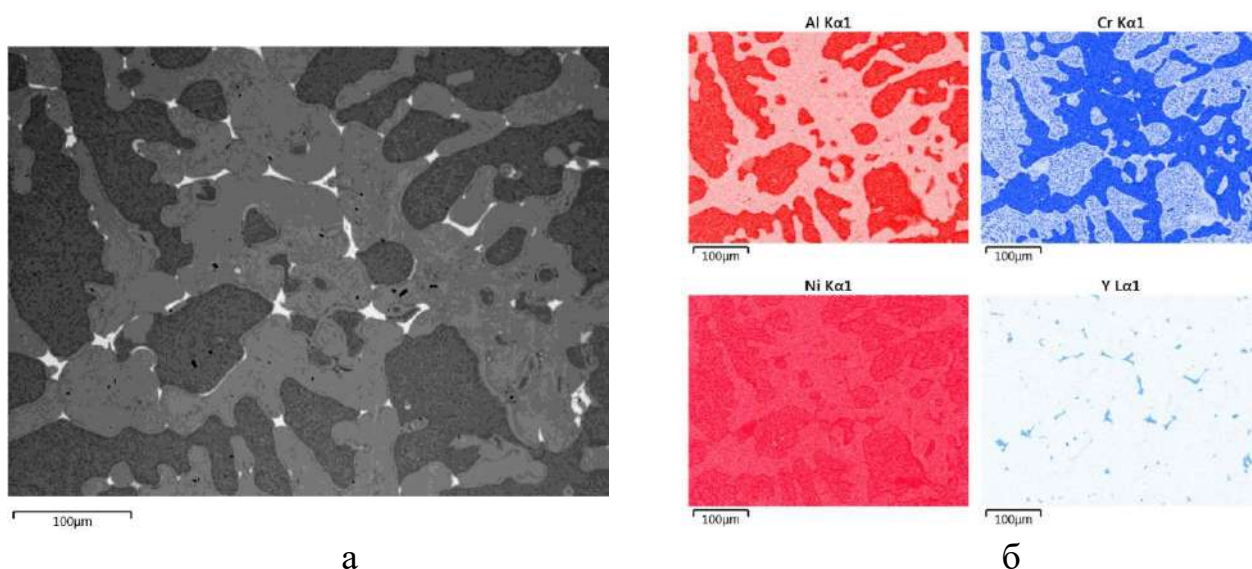
Із аналізу мікроструктури катода встановлено, що розміри твердого розчину і інтерметалідних фаз – від 50 до 200 мкм, при цьому розмір фаз, які містять іттрій 15 ... 30 мкм, що свідчить про його погану розчинність у складі сплаву. Наявність скупчення ітрієвих фаз може призвести до його локального випарування в процесі наплення із-за високого потенціалу іонізації, та спричинить виникнення дефектів покриття.

Для встановлення складу фаз проводили хімічний аналіз по зонам, вказаним на рисунку 3.7. Результати аналізу представлені в Таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Хімічний склад в зонах, позначених на рисунку 3.7, мас. %

Елемент	Спектр		
	22	23	24
Al	18.19	7.57	6.53
Cr	12.89	11.81	31.45
Ni	68.83	61.63	62.02
Y	0.09	18.99	0.00

Встановлена незначна дисперсність ітрієвої фази в складі структури ВІВ катода, зокрема в деяких випадках вона представляла собою конгломерати довжиною понад 0,05 мм, що на порядок перевищує розміри структур, утворених з використанням методу ГМ.



а - електронна фотографія зони аналізу, б - карти розподілу хімічних елементів по зоні аналізу

Рисунок 3.8 – Результати РСМА у режимі картування в катоді, отриманого способом ВІВ

Таким чином після порівняння ВІВ та гранульного методів виготовлення катодів, отримали меншу структурну та хімічну однорідність сплаву. Чітко можна визначити окремі фази, одні збагачені алюмінієм, інші хромом (рисунок 3.8 б). Розмір структурних складових знаходиться в межах від 15 мкм до 100 мкм, в окремих випадках розмір може перевищувати 100 мкм. Морфологія фази, збагаченої алюмінієм, наближена до правильної, натомість форма фаз з хромом, має більш розгалужену структуру, що пов'язано з особливостями технології вакуумного індукційного переплаву та різними температурою та умовами кристалізації цих фаз.

Отже застосування металургійного методу ВІВ для виготовлення катодів призводить до збільшення розміру структурних складових та зростанню хімічної неоднорідності, це негативно впливатиме на якість покриття. Тому необхідно провести додаткові дослідження металургійних методів з метою поліпшення

розподілу хімічних складових та зменшенню розміра структури.

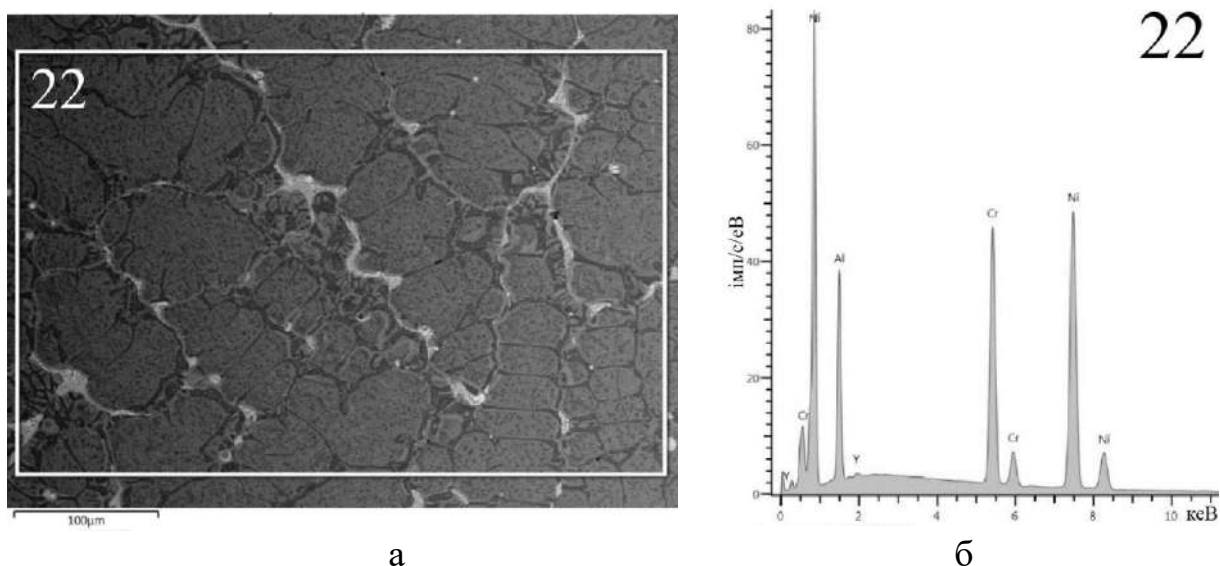
3.1.4 Дослідження катодів, виготовлених методом електронно-променевого переплаву (ЕПП)

Католи, виготовлені ЕПП, отримували переплавом шихтових компонентів сплаву на плавильній установці електронно-променевого переплаву.

Аналогічно до попередніх способів католи проходили етапи механічної обробки з метою забезпечення необхідних розмірів. Також окремо виготовлялись зразки для оцінки якості матеріалу.

Хімічний склад сплаву катода визначали методом рентгеноспектрального аналізу. Дослідження мікроструктури катодів проводили за методиками, викладеними у розділі 2.

По результатам аналізу (рисунок 3.9 та таблиці 3.5) встановлено, що хімічний склад дослідного катода, відповідає нормативно-технічній документації.



а – мікроструктура катода з позначеними зонами аналізу; б – спектрограми позначених зон.

Рисунок 3.9 – Результати РСМА катода Ni-Cr-Al-Y, отриманого ЕПП

Згідно з отриманих результатів, складена таблиця 3.5 з процентним позначенням елементів в складі сплаву.

Таблиця 3.5 – Хімічний склад катодів, виготовлених методом ЕПП, мас. %

№	Елемент	Спектр 22
1	Al	12.56
2	Cr	26.08
3	Ni	60.86
4	Y	0.50

Макроструктурний аналіз показав, що матеріал катода щільний, дірчастостей, тріщин, по кількості та розмірам перевищуючих вимоги НТД, не виявлено.

Згідно з даними електронно-мікроскопічного дослідження (рисунок 3.10, таблиця 3.6) встановлено, що матеріал катоду представляє собою γ - твердий розчин на основі Ni з наявністю інтерметалідних Ni-Cr-Al фаз змінного складу. Фаза з Y представлена у вигляді окремих включень пластинчастої будови, що мають неправильну, досить розгалужену витягнуту форму, більший розмір яких, в окремих випадках, може сягати 80 мкм ... 100 мкм (білого кольору на фото структури), розподілених по матеріалу катода вздовж меж поділу окремих фаз.

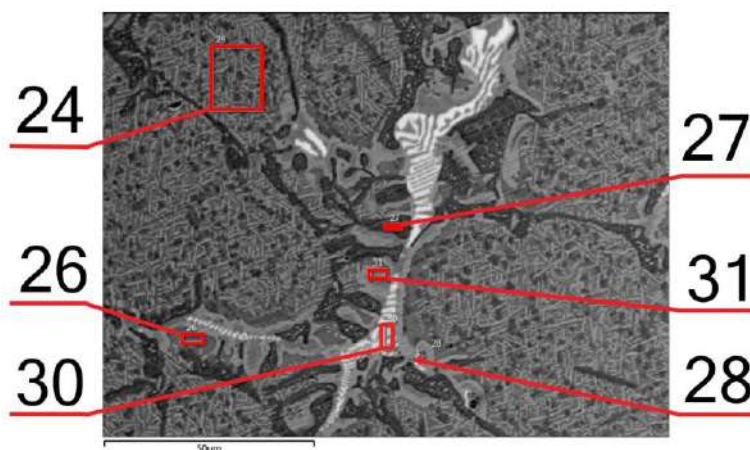


Рисунок 3.10 – Мікроструктура катода Ni-Cr-Al-Y, отриманого ЕПП з позначеними зонами РСМА аналізу

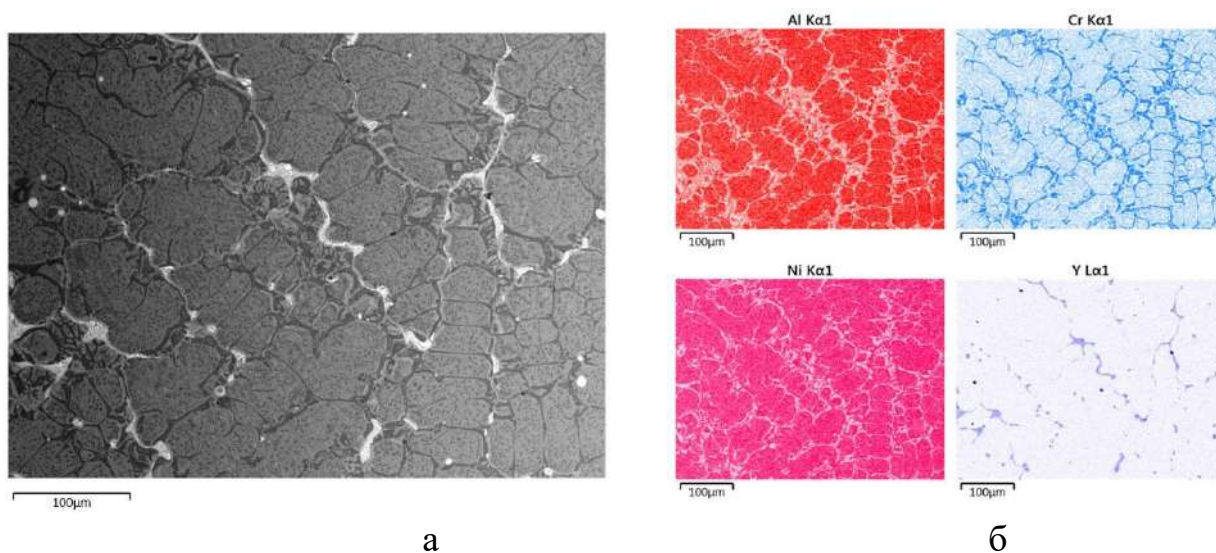
Із аналізу мікроструктури катода отриманого ЕПП встановлено, що розміри твердого розчину і інтерметалідних фаз складає від 50 до 300 мкм, розмір фаз які містять іттрій 10 ... 100 мкм, що свідчить про його погану розчинність у складі сплаву або скупчення на границях зерен. Наявність таких скупчень Y може призвести до його локального випарування в процесі напилення із-за високого потенціалу іонізації, та спричинить виникнення дефектів та нерівномірного розподілу в покритті.

Для встановлення складу фаз проводили хімічний аналіз по зонам вказаним на рисунку 3.10. Результати аналізу представлені в Таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Хімічний склад в зонах, позначених на рисунку 3.10, мас. %

Елемент	Спектр					
	24	26	27	28	30	31
Al	15.56	19.05	1.82	6.98	6.15	11.07
Cr	15.77	9.60	78.67	21.71	15.56	14.67
Ni	68.67	71.35	19.51	48.99	63.42	74.05
Y	0.00	0.00	0.00	22.32	14.87	0.21

Таким чином можна констатувати невисоку дисперсність ітрієвої фази в складі структури катода, отриманого методом ЕПП, зокрема в деяких випадках вона представляла собою конгломерати довжиною понад 0,10 мм.



а - електронна фотографія зони аналізу, б - карти розподілу хімічних елементів по зоні аналізу.

Рисунок 3.11 – Результати РСМА у режимі картування в катоді, отриманого способом ЕПП

За результатами металографічних досліджень (рисунок 3.11 а, б) та результатами розподілу легувальних елементів за площею шліфа можна сказати, що катоди, отримані методом ЕПП не суттєво відрізняються від отриманих за методом ВІВ. Проте можна відзначити більшу рівномірність розподілу таких елементів, як алюміній і хром. Зокрема за рахунок дисперснішої та розгалуженішої морфології фази, що містить хром, у порівнянні з такою ж фазою при використанні методу ВІВ. Також слід зазначити, що фаза, яка містить алюміній, має більш правильну форму та однорідну морфологію у порівнянні з такою ж фазою, що утворилась при методі ВІВ.

Слід відзначити, що катод, виготовлений методом ЕПП, випробувався на установці АПН-250. Установка з дослідним катодом працювала стабільно, всі технологічні параметри відповідали серійній технології.

Після виконання першого циклу напilenня, нанесено покриття на лопатки-зразки, зовнішній стан дослідного катода змінився.

На його поверхні виявлені численні, що повторюються через 8 ... 9 мм по всій висоті катода, світлі смуги і пори у вигляді кратери по цих смугах, які йдуть по колу катода (рисунок 3.12).



Зменшення x15

Рисунок 3.12 – Зовнішній вигляд катода ЕПП після експлуатації

Для усунення дефектів катод було проточено по зовнішній поверхні з початкового діаметра 180 мм до розміру 174 мм. Після проточки, в місцях розміщення кільцевих дефектів, спостерігалися лунки вдавненого металу.

Наступні випробування катода виявили дефекти на зовнішній робочій поверхні аналогічні тим, які спостерігалися при першому циклі обробки.

Після повторної проточки по зовнішньому діаметру до розміру 160 мм дефекти не зникли, виявлені множинні кратериви, тріщини - що не відповідає вимогам.

Виникнення дефектів спричинив нерівномірний розподіл алюмінію в об'ємі катода, що в процесі випаровування катода проявилось як множинні кільцеві кратери на його поверхні.

3.1.5 Дослідження катодів, виготовлених методом вакуумно-дугового переплаву (ВДП)

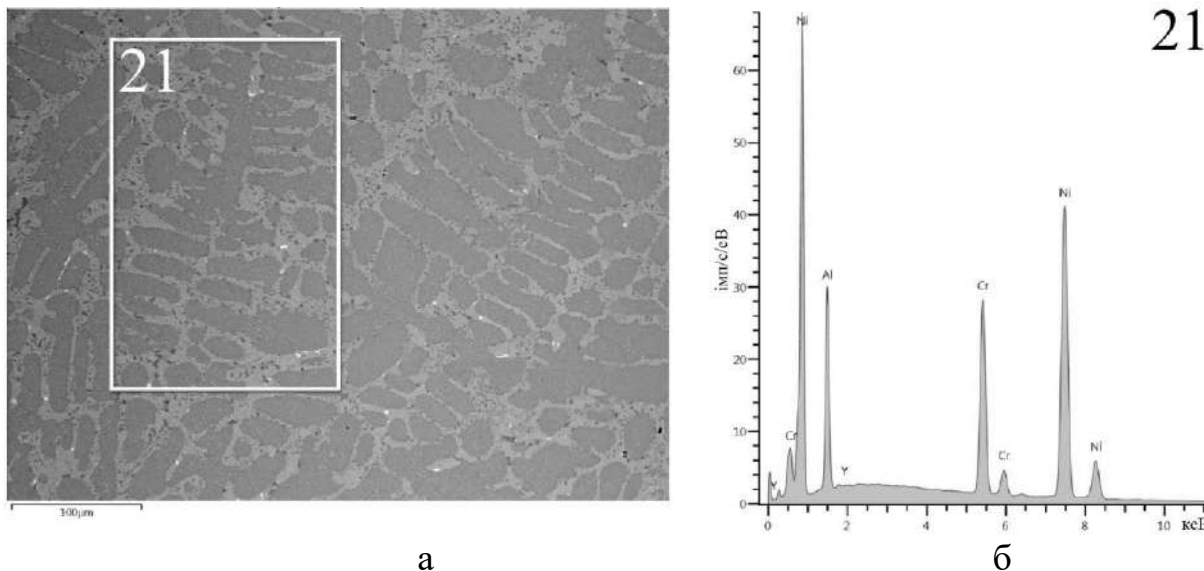
Католи, виготовлені методом ВДП, отримували на установці вакуумно-дугового гарнісажного переплаву, яка дозволяє використовувати дрібнодисперсну сировину (у вигляді порошоків або чушок), що позитивно позначається на гомогенності одержуваних зливків [91,92].

Підготовка шихти здійснювалась шляхом механічного подрібнення матеріалів і відповідає даним, зазначеним у таблиці 2.1.

Після лиття, аналогічно до попередніх способів, католи проходили етапи механічної обробки та газостатування з метою забезпечення необхідних розмірів. В процесі механічної обробки катодів були відрізані фрагменти розміром 50x30x20 мм для оцінки якості матеріалу.

Хімічний склад сплаву катода визначали методом рентгеноспектрального аналізу. Дослідження мікроструктури катодів проводили за методиками, викладеними у розділі 2.

По результатам аналізу катода (рисунок 3.13 та таблиця 3.7), встановлено, що хімічний склад дослідного катода, відповідає нормативно-технічній документації.



а - мікроструктура катода з позначеними зонами аналізу; б - спектрограми позначених зон.

Рисунок 3.13 – Результати РСМА катода Ni-Cr-Al-Y, отриманого ВДП

Згідно з отриманих результатів складена таблиця 3.7 з процентним позначенням елементів у вмісті сплаву.

Таблиця 3.7 - Хімічний склад катодів, виготовлених методом ВДП, мас. %

№	Елемент	Спектр 21
1	Al	13.67
2	Cr	19.10
3	Ni	67.23
4	Y	0.49

Макроструктурний аналіз показав, що матеріал катода щільний, дірчастостей, тріщин, по кількості та розмірам, перевищуючих вимоги, не виявлено.

Згідно з даними електронно-мікроскопічного дослідження (рисунок 3.14, таблиця 3.8) встановлено, що матеріал катоду представляє собою γ - твердий розчин на основі Ni з наявністю інтерметалідних Ni-Cr-Al фаз змінного складу.

Фаза з Y представлена у вигляді окремих включень, розміром менше 5 мкм (білого кольору на електронному фото структури), розподілених по матеріалу катода вздовж меж поділу окремих фаз.

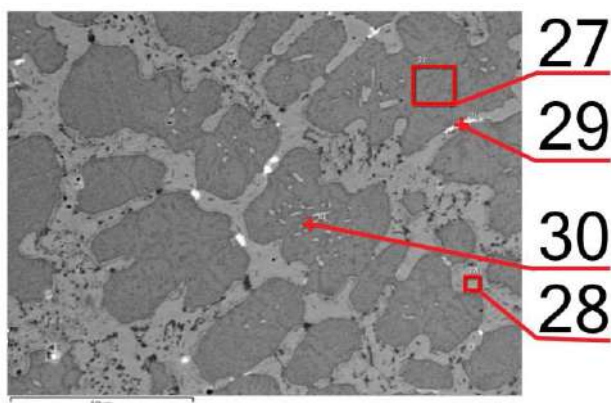


Рисунок 3.14 – Мікроструктура катода Ni-Cr-Al-Y, отриманого ВДП з позначеними зонами РСМА

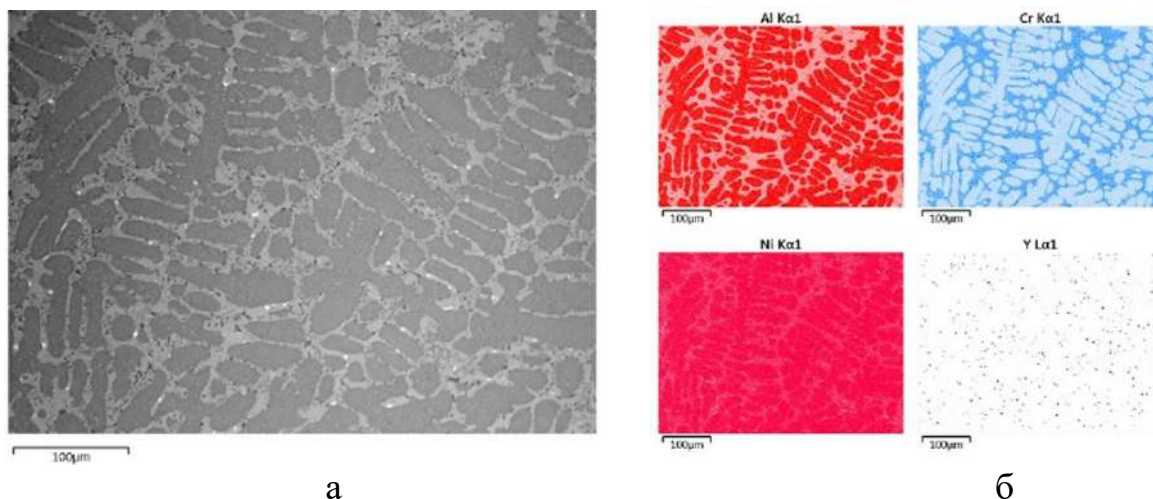
Із аналізу мікроструктури сплаву катода, отриманого ВДП встановлено, що розміри твердого розчину та інтерметалідних фаз складають від 25 до 150 мкм, розмір фаз, які містять іттрій 5 ... 10 мкм. Ці показники свідчать про добру розчинність Y у складі сплаву та рівномірність розподілу структури.

Для встановлення складу фаз проводили хімічний аналіз по зонам вказаним на рисунку 3.14. Результати аналізу представлені в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Хімічний склад в зонах, позначених на рисунку 3.14, мас. %

Елемент	Спектр			
	27	28	29	30
Al	17.59	6.01	6.21	9.66
Cr	12.39	30.52	10.10	21.50
Ni	70.02	63.47	64.61	68.83
Y	0.00	0.00	19.09	0.00

Слід відмітити високу рівномірність розподілу елементів (рисунок 3.15), що не поступається катоду, отриманого методом ГМ та дисперсність ітрієвої фази в складі структури катода, зокрема її розміри не перевищують 0,01 мм (що відповідає розміру ітрієвої фази, отриманої методом ГМ). Також слід зазначити, що катод, отриманий методом ВДП, має дрібнодисперсну структуру в цілому [90].



а - електронна фотографія зони аналізу, б - карти розподілу хімічних елементів по зоні аналізу.

Рисунок 3.15 – Розподіл елементів в об’ємі катоду, виготовленого методом ВДП

Розміри фаз, що містять алюміній та хром знаходяться в межах 10 ... 80мкм, що значно менше, ніж розмір аналогічних фаз у катодах, отриманих методами ВІВ та ЕПП. Морфологія зазначених фаз є різною. Структурні складові, що містять алюміній мають більш правильну видовжену форму без гострих кутів, що також характерно для катодів, отриманих методом ЕПП, проте зразки, отримані ВДП відрізняються більшою дисперсністю (80 мкм ВДП проти 200 мкм ЕПП), однорідністю морфології та розподілу по об’єму матеріалу. Фази з хромом навпаки характеризуються розгалуженою морфологією (як і зразки ЕПП), проте в порівнянні зі зразками, отриманими ВІВ, вони мають набагато більшу дисперсність та однорідність [90].

Таким чином застосування технології ВДП на відміну від ВІВ і ЕПП при виготовленні катодів дозволяє сформувати щільну, дисперсну макро- і мікроструктуру, що відрізняється однорідним фазовим складом і рівномірним розподілом структурних складових. Використання методу ВДП (у порівнянні з методами ВІВ та ЕПП) максимально наближає структуру, хімічний склад та властивості сплаву до катодів, отриманих методом ГМ. При цьому в структурі відсутні дірчастості, пори, тріщини, а сама структура досить дисперсна та гомогенна.

Доведено, що раціонально використовувати у серійному виробництві технологію ВДП, так як вона у рази дешевша за ГМ, а показники якості перевищують ВІВ та ЕПП методи.

3.2 Розробка технології вакуумно-дугового переплаву виготовлення катодів з додаванням різних модифікаторів

З літературних джерел [107-109] та за результатами впливу методів на формування структури сплавів і обравши метод ВДП, перейшли на наступний етап досліджень, який полягав у додаванні модифікаторів Y, Hf, La та їх поєднання і визначення впливу на структуру морфологію та властивості [108,109].

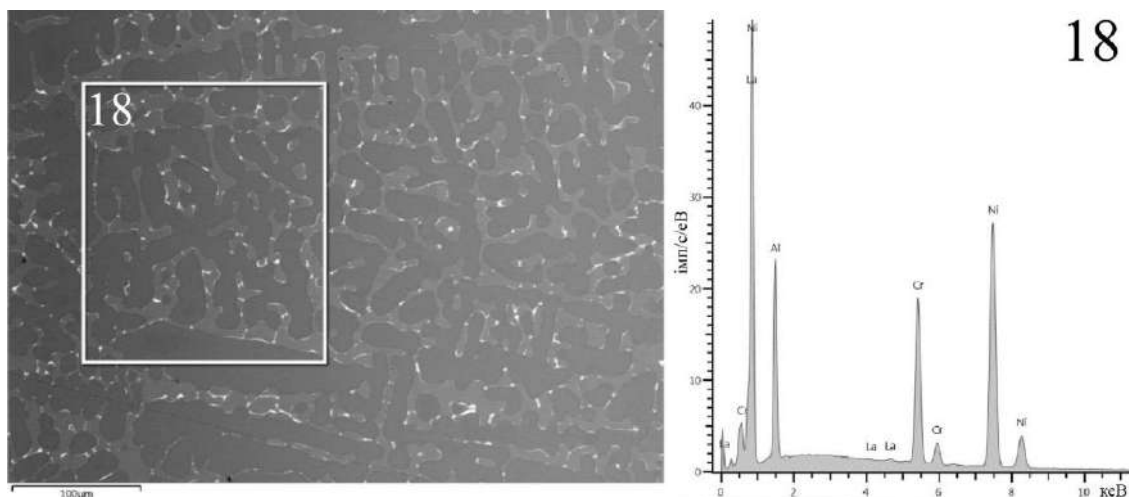
3.2.1 Дослідження катодів ВДП з модифікатором La

Додавши до складу системи Ni-Cr-Al модифікатор La, отримали більш подрібнену структуру сплаву (рисунок 3.16) [110]. Лантан розподілився по всьому об'єму зливка рівномірно. Зливка за структурою гомогенний без дефектів [91]. Хімічний склад сплава катода визначали методом хімічного аналізу та РЕМ (рисунок 3.16).

У відповідності до отриманих результатів складена таблиця 3.9 з процентним позначенням елементів у вмісті сплава.

Таблиця 3.9 - Хімічний склад катодів, легованих La, мас. %

№	Елемент	Спектр 18
1	Al	14.45
2	Cr	20.2
3	Ni	64.89
4	La	0.46



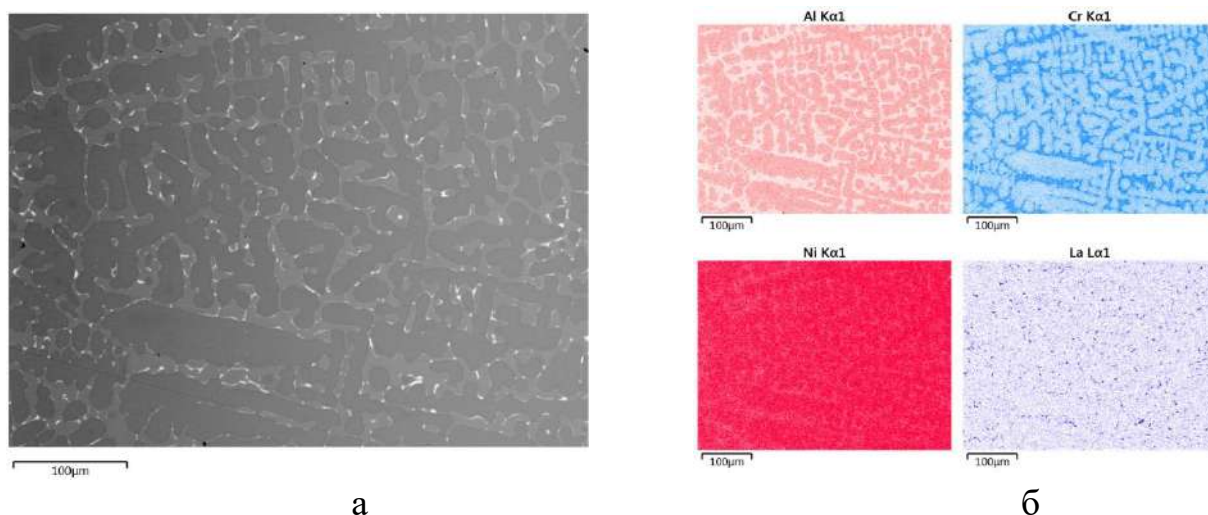
а

б

а - мікроструктура катода з позначеною зоною аналізу; б-спектрограма позначеної зони.

Рисунок 3.16 – Результати РСМА катодів, легованих La

При подальшому вивченні мікроструктури встановлено, що вона представляє собою γ - твердий розчин з наявністю інтерметалідних Ni-Cr-Al та лантанових фаз (рисунок 3.17).



а

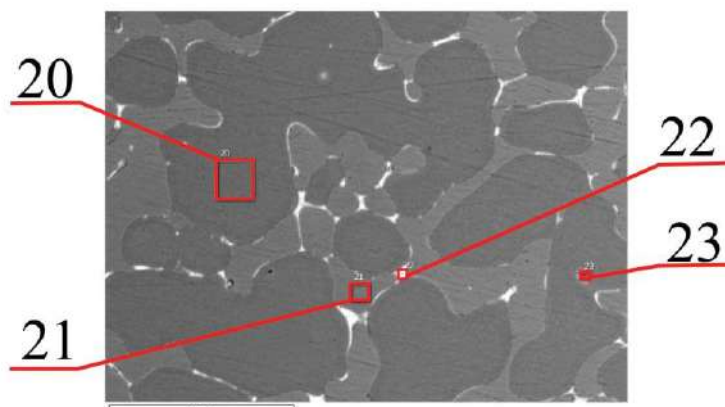
б

а - електронна фотографія зони аналізу, б - карти розподілу хімічних елементів по зоні аналізу

Рисунок 3.17 – Розподіл елементів в об'ємі катода, легваного La, виготовленого методом вакуумно-дугового переплаву

За результатами РСМА в режимі точкового аналізу встановлено наявність

Ni-Cr-Al фаз з різною концентрацією елементів. Фаза з La представлена у вигляді включень білого кольору, розподілених по матеріалу катода (рисунок 3.18, таблиця



3.10).

Рисунок 3.18 – Мікроструктура катода Ni-Cr-Al-La, отриманого ВДП з позначеними зонами РСМА аналізу

Із аналізу мікроструктури сплаву Ni-Cr-Al-La встановлено, що він складається з двох основних фаз розміром – від 10 до 150 мкм, розмір фаз, які містять La, 1 ... 12 мкм у всьому об'ємі як однієї, так і другої фази, лантан розподілено рівномірно.

Для встановлення складу фаз проводили хімічний аналіз по зонам, вказаним на рисунку 3.18. Результати аналізу представлені в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Хімічний склад в зонах, позначених на рисунку 3.18, мас. %

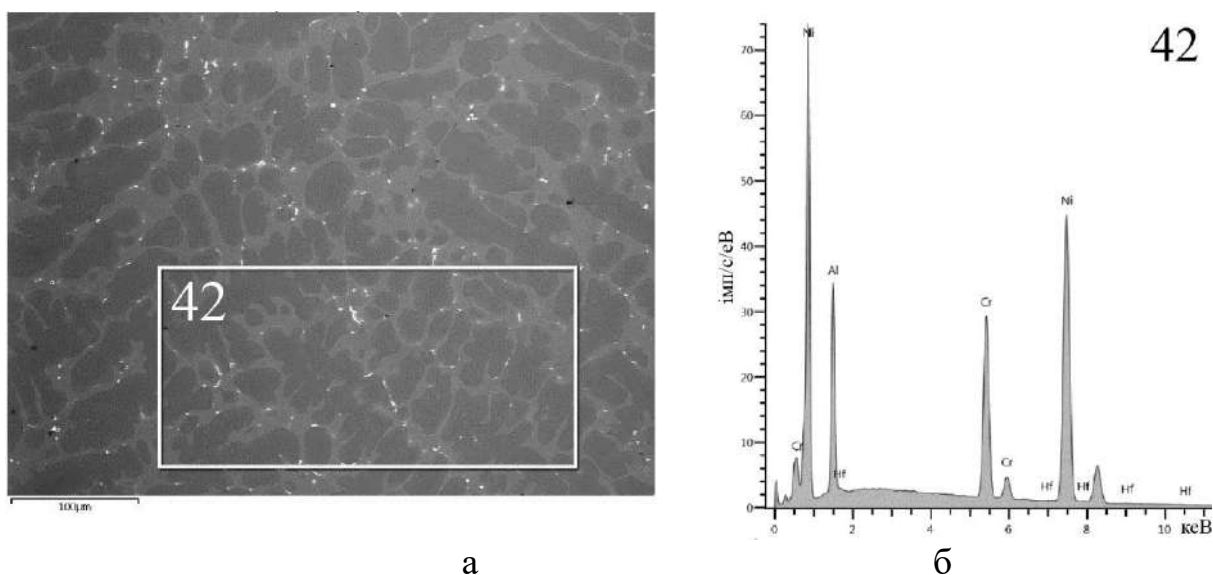
Елемент	Спектр			
	20	21	22	23
Al	17.76	6.81	4.86	6.71
Cr	14.18	33.7	5.18	32.03
Ni	68.05	59.49	55.64	61.26
La	0	0	34.32	0

Таким чином додавання модифікатора La при виготовленні сплава дозволило сформувати щільну, дисперсну макро- і мікроструктуру, що відрізняється однорідним фазовим складом і рівномірними розподілом структурних складових. При цьому в структурі відсутні дірчастості, пори,

тріщини, а сама структура досить дисперсна та гомогенна.

3.2.2 Дослідження катодів ВДП з модифікатором Hf

Легування гафнієм дозволяє підвищити опір повзучості і жароміцних сплавів [111,112]. При введенні до складу рідкісноземельних металів на рівні 0,01 ... 0,05 мас. % істотно знижується дифузія по межах зерен [113] і відповідно зростає жароміцність. Додавши до складу системи Ni-Cr-Al модифікатор Hf, отримали подрібнення структури сплаву і ряд властивостей. Гафній розподілювався по всьому об'єму зливка рівномірно. Зливок за структурою гомогенний без дефектів. Хімічний склад сплаву катода визначали методом хімічного аналізу та РЕМ (рисунок 3.19) [91].



а - мікроструктура катода з позначеною зоною аналізу; б - спектрограма позначеної зони.

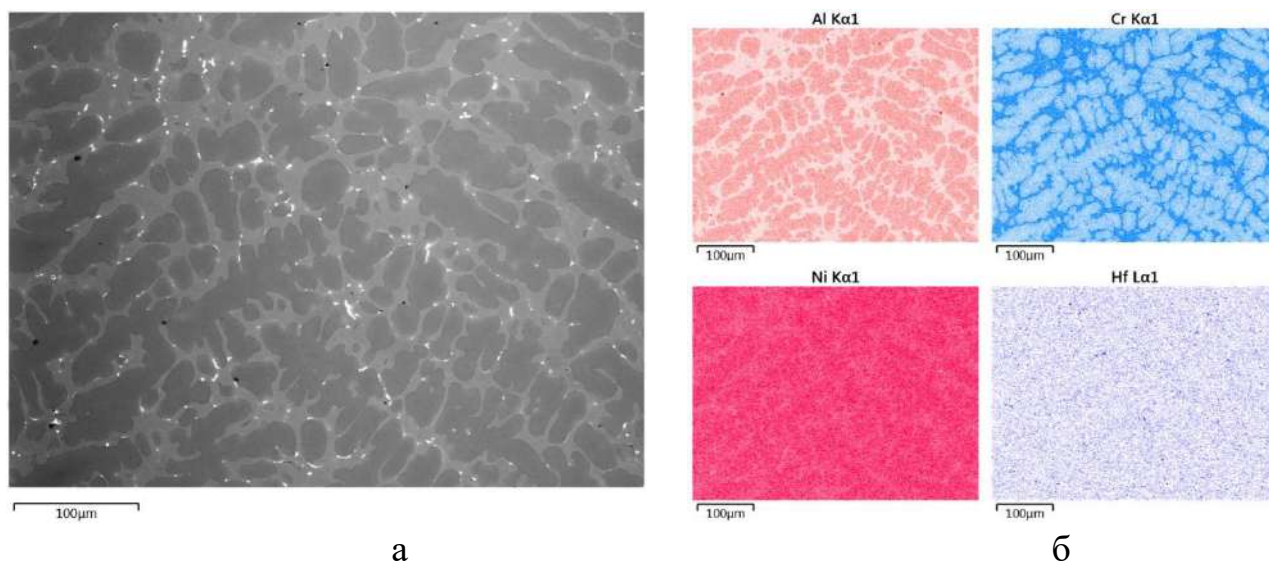
Рисунок 3.19 – Результати РСМА катодів, легуваних Hf

З отриманих результатів наведена таблиця 3.11 з процентним позначенням елементів в складі сплаву.

Таблиця 3.11 - Хімічний склад катодів, легованих Hf, мас. %

№	Елемент	Спектр 42
1	Al	12.63
2	Cr	19.54
3	Ni	67.54
4	Hf	0.3

При подальшому вивченні мікроструктури встановлено, що вона представляє собою γ - твердий розчин з наявністю інтерметалідних Ni-Cr-Al та гафнієвих фаз (рисунок 3.20).



а - електронна фотографія зони аналізу, б - карти розподілу хімічних елементів по зоні аналізу

Рисунок 3.20 – Розподіл елементів в об'ємі катоду, модифікованого Hf, виготовленого методом ВДП

За результатами РСМА в режимі точкового аналізу встановлено наявність Ni-Cr-Al фаз з різною концентрацією елементів. Фаза з Hf представлена у вигляді включень білого кольору, рівномірно розподілених по матеріалу катода (рисунок 3.21, таблиця 3.12).

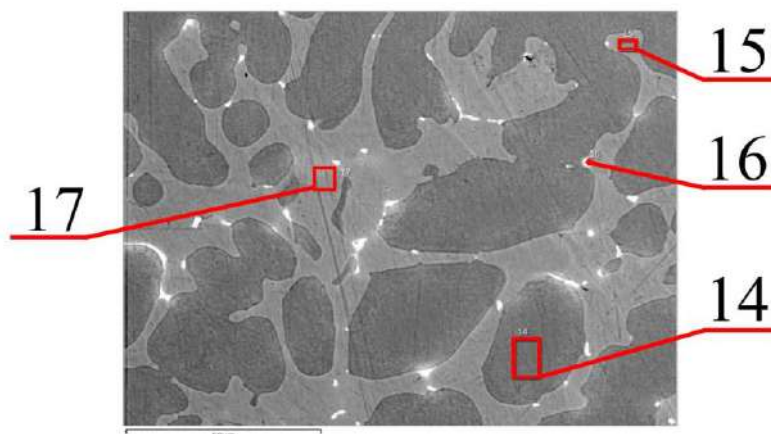


Рисунок 3.21 – Мікроструктура катода Ni-Cr-Al-Hf, отриманого ВДП з позначеними зонами РСМА

Із аналізу мікроструктури катода з модифікатором Hf, розмір фаз складає від 20 до 170 мкм, при цьому розмір фаз, які містять Hf, 0,5 ... 2 мкм, що свідчить про його дрібнодисперсність та рівномірність розподілу у складі сплаву. Крім того, гафній знаходиться як на границях фаз, так і безпосередньо в їх складі.

Для встановлення складу фаз проводили хімічний аналіз по зонам, вказаним на рисунку 3.21. Результати аналізу представлені в таблиці 3.12.

Таблиця 3.12 – Хімічний склад в зонах, позначених на рисунку 3.21, мас. %

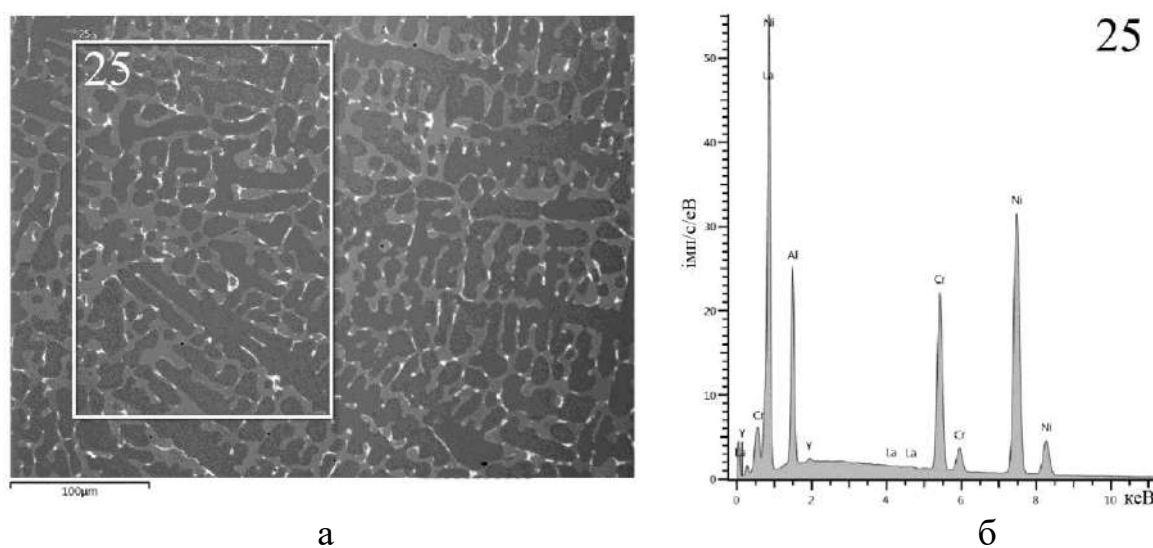
Елемент	Спектр			
	14	15	16	17
Al	15.93	6.31	4.77	6.24
Cr	12.93	30.39	13.51	31.5
Ni	71.14	63.3	26.91	62.15
Hf	0	0	54.8	0.11

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

3.2.3 Дослідження катодів ВДП з модифікатором La+Y

З літературних джерел відомо, що додавання лантану та ітрію в нікелеві сплави дозволяє збільшити жаростійкість та зменшити швидкість відшарування оксидної плівки алюмінія та хрому з поверхні покриття в процесі експлуатації [107,108].

Аналогічно до модифікування одним хімічним елементом провели модифікацію складу системи Ni-Cr-Al комплексом La+Y, отримали більш подрібнену та збалансовану структуру сплаву. Комплекс La+Y розподілювався по всьому об'єму зливка рівномірно. Зливков за структурою гомогенний без дефектів. Хімічний склад сплава катода визначали методом хімічного аналізу та РЕМ (рисунок 3.23).



а - мікроструктура катода з позначеною зоною аналізу; б-спектрограма позначеної зони.

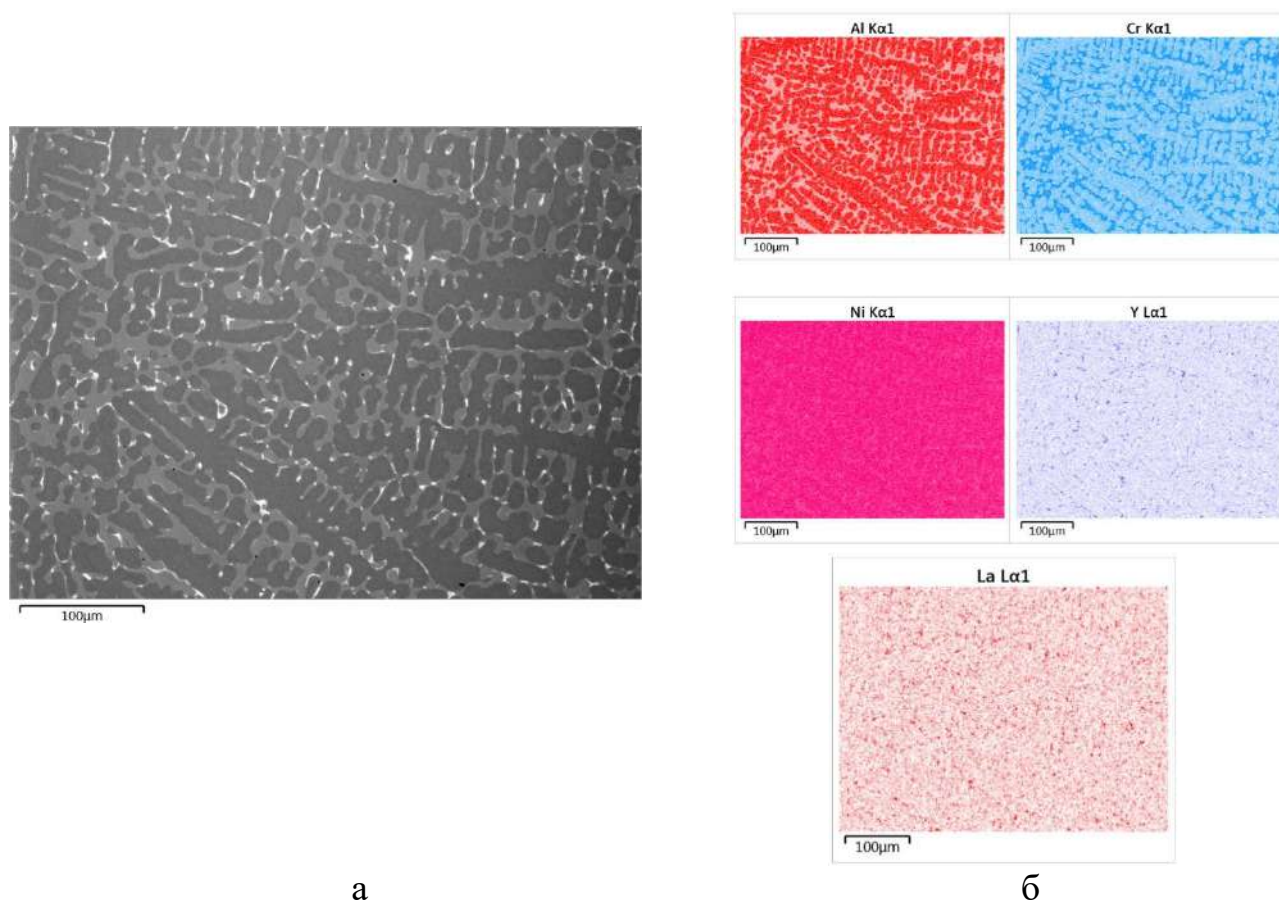
Рисунок 3.22 – Результати РСМА катодів, легованих La+Y

Згідно з отриманих результатів наведена таблиця 3.13 з процентним позначенням елементів в складі сплаву.

Таблиця 3.13 Хімічний склад катодів, легованих La+Y, мас. %

№	Елемент	Спектр 25
1	Al	13.7
2	Cr	20.5
3	Ni	65.18
4	Y	0.46
5	La	0.16

При подальшому вивченні мікроструктури встановлено, що вона представляє собою γ - твердий розчин з наявністю інтерметалідних Ni-Cr-Al фаз (рисунок 3.23). Крім того у структурі знаходяться ітрієві та лантанові фази.



а - електронна фотографія зони аналізу, б - карти розподілу хімічних елементів по зоні аналізу

Рисунок 3.23 – Розподіл елементів в об'ємі катоду, модифікованого La+Y

За результатами РСМА в режимі точкового аналізу встановлено наявність

Ni-Cr-Al фаз з різною концентрацією елементів. Фази Y та La представлені у вигляді включень білого кольору, рівномірно розподілених по матеріалу катода (рисунок 3.24, таблиця 3.14).

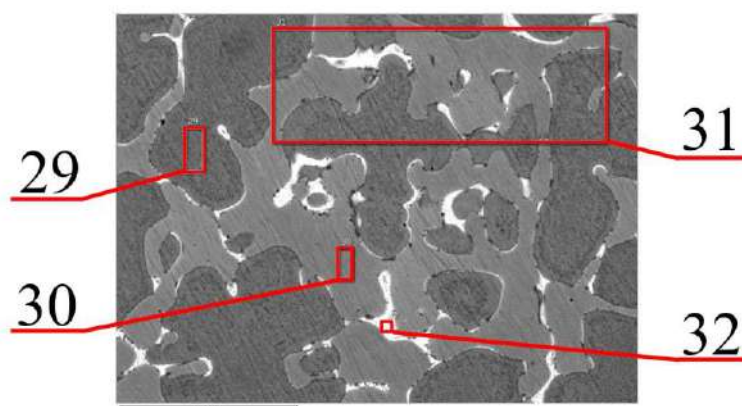


Рисунок 3.24 – Мікроструктура катода Ni-Cr-Al-La-Y, отриманого ВДП з позначеними зонами РСМА

Із аналізу мікроструктури катода Ni-Cr-Al-La-Y встановлено, що розмір твердого розчину і інтерметалідних фаз складає від 8 мкм до 140 мкм, однак є окремі конгломерати перевищуючі розмір 200 мкм. Включення фаз La та Y знаходяться здебільшого на границях розподілу, розмір фаз 4 мкм ... 10 мкм.

Для встановлення складу фаз проводили хімічний аналіз по зонам, вказаним на рисунку 3.7. Результати аналізу представлені в таблиці 3.14.

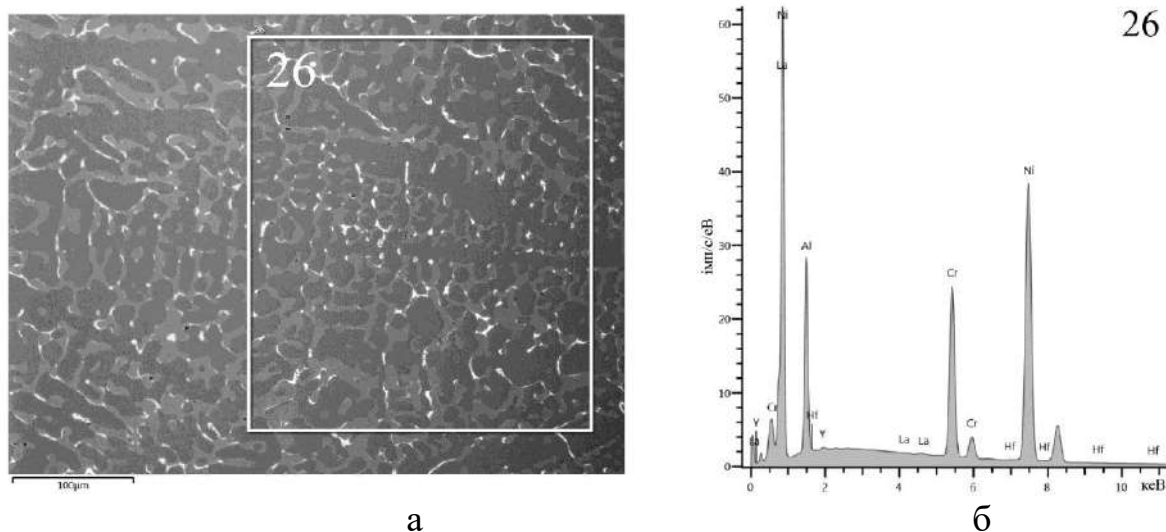
Таблиця 3.14 – Хімічний склад в зонах, позначених на рисунку 3.24, мас. %

Елемент	Спектр			
	29	30	31	32
Al	17.46	6.93	11.82	6.26
Cr	13.74	32.07	23.17	10.53
Ni	68.72	61	63.95	61.81
Y	0.08	0	0.73	14.37
La	0	0	0.33	7.03

Таким чином додавання модифікатора La та Y при виготовленні сплава дозволило сформувати щільну, дисперсну макро- і мікроструктуру, з рівномірним розподілом структурних складових. При цьому в структурі відсутні такі дефекти як: дірчастості, пори, тріщини.

3.2.4 Дослідження катодів ВДП з модифікатором Y+Hf+La

Другим модифікуючим комплексом системи Ni-Cr-Al виступає поєднання Y+Hf+La, що дало змогу отримати більш подрібнену та збалансовану структуру сплаву. Комплекс Y+Hf+La розподілився по всьому об'єму зливка рівномірно. Зливок за структурою гомогенний без дефектів. Хімічний склад сплава катода визначали методом хімічного аналізу та РЕМ (рисунок 3.25).



а - мікроструктура катода з позначеною зоною аналізу; б-спектрограма позначеної зони

Рисунок 3.25 – Результати РСМА катодів, легованих Y+Hf+La

Згідно з отриманих результатів отримана таблиця 3.15 з процентним позначенням елементів в складі сплава.

Таблиця 3.15 – Хімічний склад катодів, легованих Y+Hf+La, виготовлених методом вакуумно-дугового переплаву, мас. %

№	Елемент	Спектр 26
1	Al	13.19
2	Cr	19.06
3	Ni	67.18
4	Y	0.37
5	La	0.09
6	Hf	0.12

При подальшому вивченні мікроструктури встановлено, що вона представляє собою γ - твердий розчин з наявністю інтерметалідних Ni-Cr-Al фаз (рисунок 3.26). Крім того у структурі знаходяться ітрієві, лантанові та гафнієві фази.

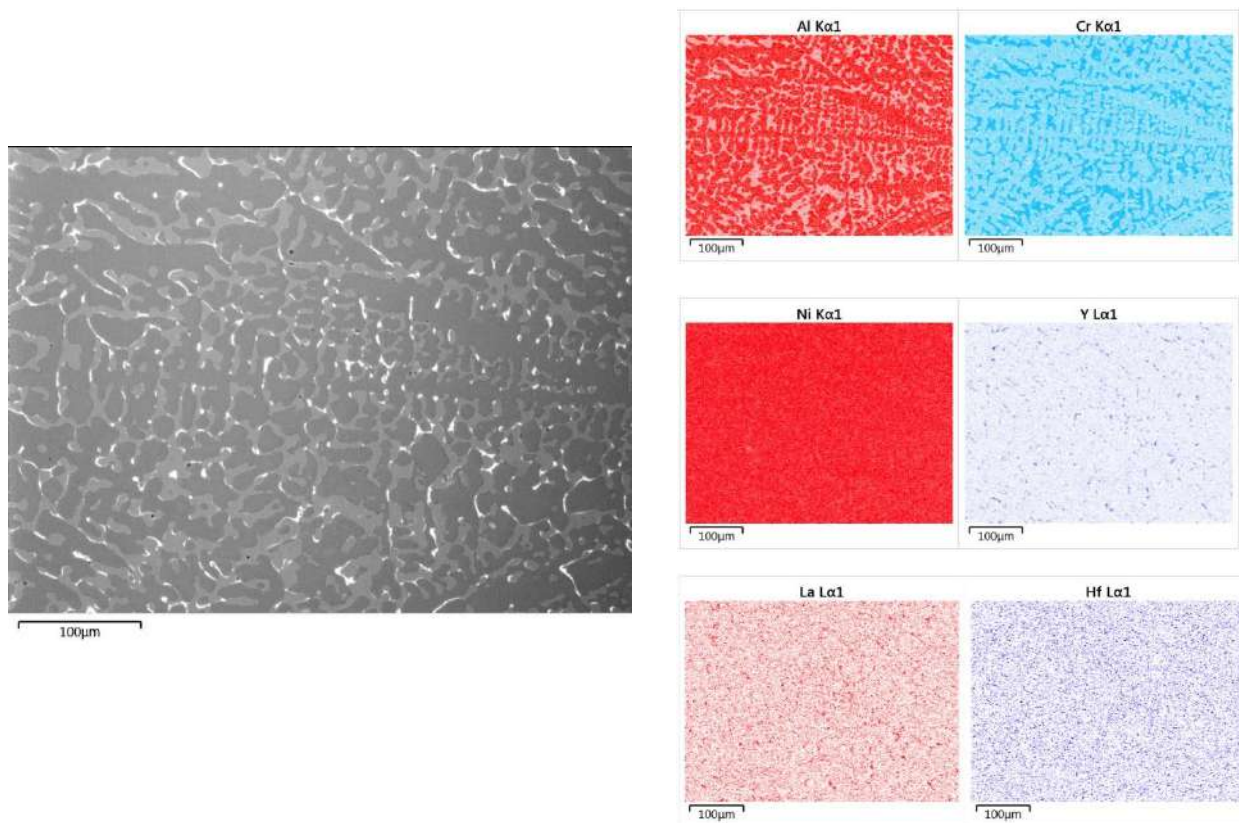


Рисунок 3.26 – Розподіл елементів в об'ємі катоду, легованого Y+Hf+La, виготовленого методом вакуумно-дугового переплаву

За результатами РСМА в режимі точкового аналізу встановлено наявність Ni-Cr-Al фаз з різною концентрацією елементів. Фази Y, Hf та La представлені у вигляді включень білого кольору, рівномірно розподілених по матеріалу катода (рисунок 3.27, таблиця 3.16).

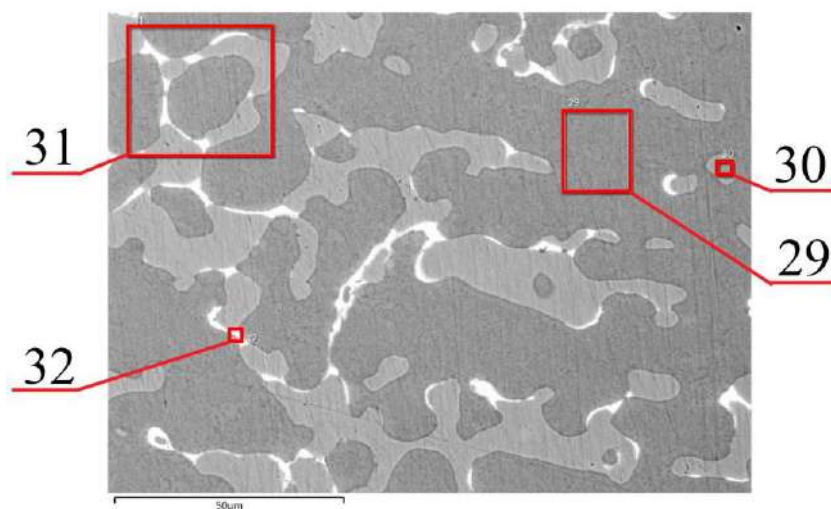


Рисунок 3.27 – Мікроструктура катода Ni-Cr-Al-Y-Hf-La, отриманого ВДП з позначеними зонами РСМА аналізу

Мікроструктурний аналіз сплаву встановив, що структура двофазна, з розміром фаз – від 90 мкм до 150 мкм, фази з Y-Hf-La розміром 2 мкм ... 10 мкм у всьому об'ємі як однієї, так і другої фази.

Для встановлення складу фаз проводили хімічний аналіз по зонам вказаним на рисунку 3.27. Результати аналізу представлені в таблиці 3.16.

Таблиця 3.16 – Хімічний склад в зонах, позначених на рисунку 3.27, мас. %

Елемент	Спектр			
	29	30	31	32
Al	15.92	6.37	13.05	5.87
Cr	14.74	30.28	18.53	6.87
Ni	68.99	63.21	67.53	65.06
Y	0	0.04	0.53	15.32
La	0	0.1	0.36	6.88
Hf	0.35	0	0	0.22

З аналізу хімічного складу встановлено, що La та Y частково розчинились у складі фаз, у той час як Hf, здебільшого, знаходиться на їх границях.

3.3 Висновки до розділу 3

1. В результаті дослідження катодів, виготовлених методом ГМ, встановлено, що вони мають високу однорідність і дисперсність усіх структурних складових. Аналіз мікроструктури сплаву показав, що він уявляє собою двофазний сплав з розміром фаз – від 10 мкм до 40 мкм, при цьому форма ітрієвої фази наближена до правильної, розміром 0,5 мкм ... 2 мкм. Однак технологія ГМ дуже затратна і її не можливо використовувати при виготовленні катодів для установки КІБ. Розміри циліндричних катодів для установки КІБ Ø127 мм, висота 45-50 мм, що унеможлиблює їх виготовлення ГМ, так як товщина матеріалу для пресування повинна не перевищувати 35 мм. Отже виникає необхідність провести дослідження різних металургійних методів виготовлення катодів і отримати катоди заданої геометрії. При цьому треба забезпечити рівномірність хімічного складу та структури аналогічним ГМ.

2. В результаті дослідження катодів, виготовлених методом ВІВ, встановлено, що розмір структурних складових знаходиться в межах від 15 мкм до 100 мкм, в окремих випадках розмір може перевищувати 100 мкм, розмір ітрієвої фази 15 мкм ... 30 мкм. Морфологія фази, збагаченої алюмінієм, наближена до правильної, натомість форма фаз з хромом має більш розгалужену структуру, що пов'язано з особливостями технології вакуумного індукційного переплаву та різними температурою та умовами кристалізації цих фаз.

Таким чином, використання технології ВІВ для виготовлення катодів призводить до збільшення структурних складових та зростанню хімічної неоднорідності, це негативно впливатиме на якість покриття.

3. В результаті дослідження катодів, виготовлених методом ЕПП, встановлено, що розмір структурних складових знаходиться в межах від 50 мкм до 300 мкм, в окремих випадках розмір може перевищувати 100 мкм, розмір ітрієвої фази 15 мкм ... 30 мкм. Розмір ітрієвої фази свідчить про погану розчинність ітрію у складі сплаву та скупчення його на границях зерен. Наявність

таких скупчень може призвести до його локального випарування в процесі напилення із-за високого потенціалу іонізації, та спричинити виникнення дефектів в покритті.

4. В результаті дослідження катодів, виготовлених методом ВДП, встановлено, що розмір структурних складових знаходиться в межах від 25 мкм до 150 мкм, в окремих випадках розмір може перевищувати 100 мкм, розмір ітрієвої фази 5 ... 10 мкм. Використання методу ВДП (у порівнянні з методами ВІВ та ЕПП) максимально наближає структуру, хімічний склад та властивості сплаву до катодів, отриманих методом ГМ.

Застосування технології ВДП на відміну від ВІВ і ЕПП при виготовленні катодів дозволяє сформувати щільну, дисперсну макро- і мікроструктуру, що відрізняється однорідним фазовим складом і рівномірним розподілом структурних складових.

Доведено, що раціонально використовувати у серійному виробництві технологію ВДП, так як вона у рази дешевша за ГМ, а показники якості перевищують ВІВ та ЕПП методи.

5. Розглянуто чотири основні металургійні методи виготовлення жаростійкого сплаву Ni-Cr-Al-Y: ВІВ, ЕПП, ВДП, ГМ.

Встановлені закономірності впливу методів на розподіл легуючих елементів та структурно-фазовий стан зливків катодів. Доведено, що при використанні методу ВДП в структурі катода формується дрібнодисперсна структура розміром 25 мкм ... 90 мкм, а також відсутні ліквації розміром більше 150 мкм. Розміри фаз, що містять алюміній та хром, знаходяться в межах 10 мкм ... 80 мкм, що значно менше, ніж розмір аналогічних фаз у катодах, отриманих методами ВІВ та ЕПП.

6. Обґрунтовано застосування технології ВДП, яка на відміну від ВІВ і ЕПП, при виготовленні катодів дозволяє сформувати щільну, дисперсну макро- і мікроструктуру, що відрізняється однорідним фазовим складом і рівномірними розподілом структурних складових. Використання методу ВДП (у порівнянні з методами ВІВ та ЕПП) максимально наближає структуру, хімічний склад та властивості сплаву до катодів, отриманих методом ГМ.

Доведено, що раціонально використовувати у серійному виробництві технологію ВДП, так як вона у рази дешевша за ГМ, а показники якості перевищують ВІВ та ЕПП методи.

7. Використовуючи метод ВДП проведено дослідження з підбору модифікаторів для поліпшення структури та властивостей сплаву.

В якості модифікаторів використовували ітрій, лантан, гафній та їх сполуки. За результатами дослідження окремого модифікування елементами встановлено, що найбільш ефективним є застосування гафнію та лантану для отримання дрібнішої структури та рівномірного розподілу елементів у складі катода. Встановлено, що зменшення кількості лантану до 0,3% та додавання 0,3% ітрію дозволяє поліпшити дисперсність, а додавання 0,2% гафнію сприяє формуванню жаростійких оксидів хрому та прискоренню утворення оксиду алюмінію в процесі експлуатації покриття. Розроблені сплави з комплексним модифікуванням: Ni-Cr-Al-Y-La та Ni-Cr-Al-Y-Hf-La.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ ДОСЛІДНИМИ КАТОДАМИ З РІЗНИХ СКЛАДІВ

4.1 Обґрунтування використання нової іонно-плазмової установки КІБ замість АПН-250

З першого погляду використання установки АПН-250 здається більш раціональним за рахунок великого об'єму катода і кількості випаровуваного з нього матеріалу, але це не так (рисунок 4.1).



а – трубний катод; б – циліндричний катод.

Рисунок 4.1 – Загальний вигляд катодів

Вага нового трубного катода 25 кг (розмір катода: зовнішній $\text{Ø}185$ мм, внутрішній $\text{Ø}140$ мм, висота 355 мм), а спрацьованого катода, який підлягає заміні, 10 кг, тобто реальне використання матеріалу тільки 15 кг. Крім того, катод у процесі роботи нерівномірно зношується, в наслідок чого, на його поверхні з'являється хвилястість, яка потребує механічної обробки, це, зазвичай, ще 2 операції з проточування, при яких він також втрачає масу, приблизно по 2,5 кг за одну обробку.

Отже кінцевим результатом можна вважати 10 кг розпиленого та осаджуваного матеріалу, 15 кг відходять у переробку. Коефіцієнт використання катода АПН-250 складає 35 .. 40%.

В установці КІБ використовують чотири циліндричні катоди масою 2,5 кг, (розмір катоду: зовнішній $\varnothing 120$ мм, висота 45 мм), що сумарно складає 10 кг матеріалу. Вага катоду, що підлягає заміні, 0,5 кг, тобто сумарно це 2 кг залишкового матеріалу [90]. Коефіцієнт використання катода КІБ складає 70 ... 80%, що у двічі перевищує коефіцієнт використання катода АПН-250. Крім того, залишок катода (замкова частина) використовується повторно, що суттєво впливає на собівартість виготовлення нового катода. Ще одним плюсом установки КІБ є кількість лопаток, що одночасно напиляються 288 проти 72 на установках АПН-250 [114].

Нанесення жаростійких покриттів.

Покриття наносилось на робочі лопатки турбіни та прямокутні зразки (рисунок 4.2), виготовлені із застосовуваного нікелевого жароміцного сплаву ЖС32-ВІ. Було нанесено, як серійне покриття (Ni-Cr-Al-Y) виготовлене різними способами), так і покриття з різними модифікуючими елементами [74, 91].



а - прямокутні зразки; б - натурні деталі

Рисунок 4.2 – Зразки та деталі для нанесення покриттів

Покриття наносилось на серійній установці КІБ, параметри технологічного процесу ідентичні для кожного з варіантів, товщина покриття при цьому становила 0,03 мкм ... 0,05 мм (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1 - Товщина вимірювання шару покриття на поверхні лопатки

Метод виготовлення катодів	Товщина покриття, мкм				
	вх. кромка	вих. кромка	спинка	корито	Полиця хвостовика
Лиття	37 ... 40	36 ... 40	40 ... 45	35 ... 42	25 ... 35
ГМ	38 ... 42	37 ... 41	41 ... 45	36 ... 44	27 ... 35
ВДП	38 ... 40	36 ... 38	40 ... 43	37 ... 42	27 ... 33
ЕПП	40 ... 42	38 ... 42	41 ... 43	36 ... 41	26 ... 32

Слід зазначити, що шорсткість поверхні лопаток та зразків з покриттям Ni-Cr-Al-Y обумовлюється наявністю крапельної фази, яка є невід'ємною частиною плазмового потоку при електродуговому розпиленні матеріалу катода.

Величина і розміри крапельної фази залежать від багатьох параметрів процесу (матеріалу катода, струму дуги, відстані до поверхні, що оброблюється, залишкового тиску в об'ємі камери і т.д.). В даному випадку, при аналогічних параметрах процесу нанесення, розмір і кількість крапельної фази на поверхні лопатки залежить тільки від стану матеріалу, який випаровується з катодів, тобто в кінцевому підсумку від технології їх отримання.

Аналіз отриманих результатів показує, що в усіх варіантах покриттів тріщин і відшарувань не виявлено. Хімічний склад і кількісний вміст елементів по кожному з варіантів представлений в таблиці 4.2. Зчеплення шару покриття з поверхнею лопаток міцне.

Таблиця 4.2 - Хімічний склад і кількісний вміст елементів [91]

№ зони	Елемент, мас. %											
	ГМ			ВІВ			ВДП			ЕПП		
	Al	Cr	Ni	Al	Cr	Ni	Al	Cr	Ni	Al	Cr	Ni
1	6,40	5,38	63,32	6,13	5,39	62,58	6,22	5,55	64,35	7,15	6,78	65,65
2	8,68	11,11	69,47	7,62	9,44	67,67	10,68	10,25	67,45	9,56	9,55	65,35
3	7,19	24,98	59,31	8,65	22,62	60,67	8,19	23,75	59,31	8,55	22,73	57,85
4	7,75	19,05	68,28	7,54	19,98	67,05	7,45	18,82	68,28	7,68	19,54	66,25

Примітка: зона 1 – поверхня покриття, зона 2 – зона на глибині 10 мкм від поверхні, зона 3 – зона на глибині 20 мкм від поверхні, зона 4 – зона на глибині 30 мкм від поверхні.

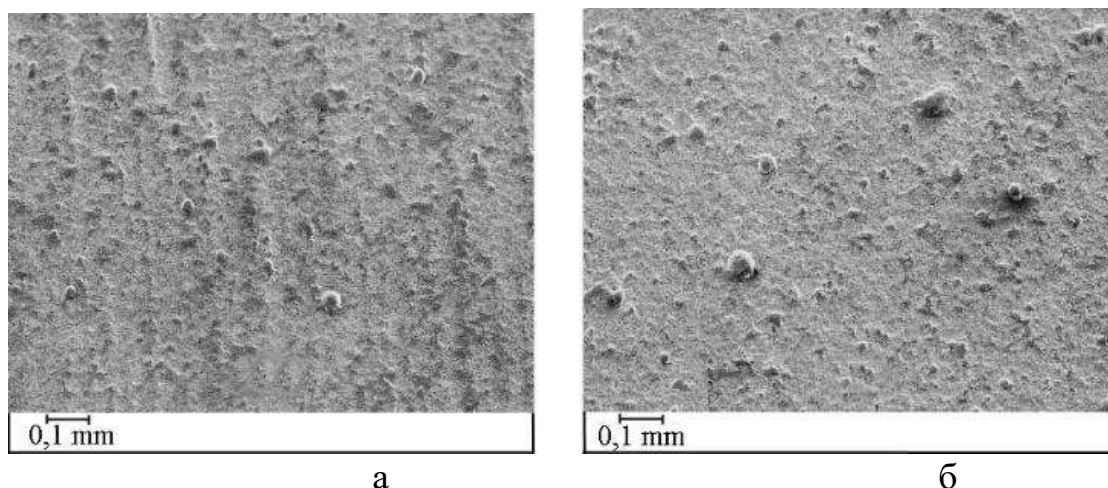
За допомогою скануючої растрової електронної мікроскопії оцінювали якість поверхні лопаток з покриттям Ni-Cr-Al-Y, нанесеним із застосуванням досліджуваних катодів і проводили кількісну оцінку крапельної фази з розбивкою по фракціям на фіксованій площі кожної з порівнюваних зразків-лопаток (таблиця 4.3)

Таблиця 4.3 Кількість і розміри крапельної фази на поверхні покриття [91]

Метод виготовлення	Розмір фракції, шт.			
	0.010 ... 0.025 мм	0.025 ... 0.045 мм	0.045 ... 0.060 мм	0.060 ... 0.080 мм
ГМ	79	44	4	0
Литий	142	84	3	2
ВДП	64	58	3	0
ЕЛП	123	105	4	5

З таблиці 4.3 випливає, що покриття отримані із застосуванням методів ГМ та ВДП для виготовлення катодів, мають в два рази менше крапельної фази розміром 0,01 ... 0,045 мм і повну відсутність крапельної фази розміром більше 0,065 мм, порівняно з катодами, виготовленими методами ВІВ та ЕПП. Зменшення крапельної фази забезпечує більш низьку шорсткість поверхні лопаток і, відповідно, кращу якість поверхні лопатки в цілому [18,115].

На рисунку 4.4 представлена поверхня лопатки з крапельною фазою.



а - з використанням гранульного катода; б - з використанням ВДП катода.

Рисунок 4.4 – Зовнішній вигляд крапельної фази на поверхні лопатки після нанесення покриття [74]

Слід відзначити, що від шорсткості поверхні лопаток залежить опір газодинамічного середовища. Таким чином при зменшенні шорсткості, збільшується КПД двигуна.

Таблиця 4.4 – Результати виміру шорсткості лопаток після нанесення покриттів

Метод виготовлення катодів	Шорсткість пера лопатки Ra, мкм	
	Спинка	Корито
Лиття	2,21	2,02
ГМ	1,56	1,31
ВДП	1,90	1,85
ЕЛП	2,35	2,2

Також слід зазначити, що в процесі експлуатації катоди, виготовлені методами ГМ, та ВДП показали рівномірніше припрацювання поверхні, що забезпечило збільшення кількості циклів роботи катода.

Цей ефект викликано із-за меншого розміру матеріалу структури в катоді, що впливає на процес випаровування матеріалу.

4.2 Дослідження покриття, нанесеного катодом ВДП, легованим Y

Нижче представлено покриття нанесене методом ВДП (рисунок 4.5) з модифікатором Y.

При нанесенні покриття складу Ni-Cr-Al-Y, його структура рівномірна, дефектів, таких як пористість, тріщини та відшарування, не виявлено.

Є незначні дефекти зони переходу основного матеріалу та покриття, але це є допустимим. В процесі нанесення катода випаровувались стабільно, горіння дуги рівномірне [91].

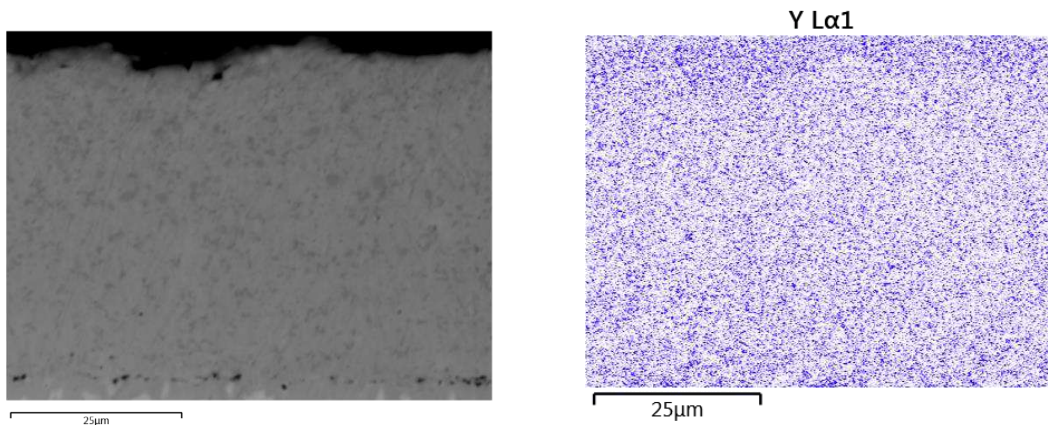


Рисунок 4.5 – Покриття, нанесене катодом, легованим Y [91]

З рисунку 4.5 ми бачимо, що модифікатор Y розподілений рівномірно по всій товщині покриття. Це обумовить рівномірність властивостей в процесі його експлуатації.

4.3 Дослідження покриття, нанесеного катодом ВДП, легованим La

При нанесенні покриття складу Ni-Cr-Al-La, його структура рівномірна, дефектів, таких як пористість, тріщини та відшарування, не виявлено.

Є незначні дефекти зони переходу основного матеріалу та покриття, але це є допустимим. В процесі нанесення катода випаровувались дуже нестабільно, мало місце короткочасне локальне горіння дуги, але на якість самого покриття це не вплинуло [91,110].

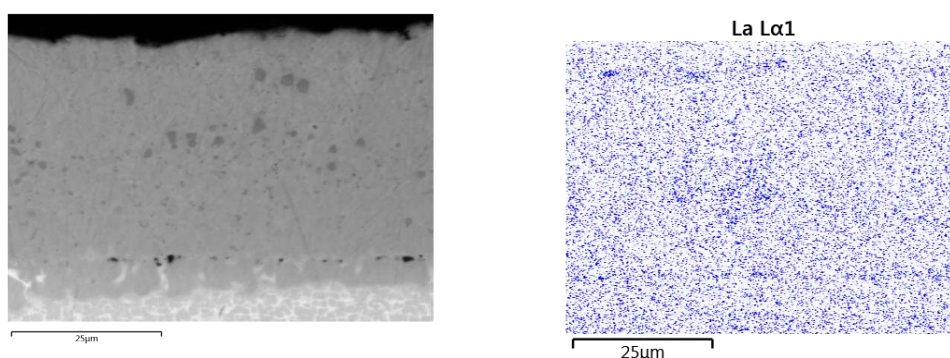


Рисунок 4.6 – Покриття, нанесене катодом, легованим La [91]

З рисунку 4.6 видно, що модифікатор La розподілений рівномірно по всій товщині покриття. Це обумовить рівномірність властивостей в процесі його експлуатації. Також слід зазначити, що наявність лантану у структурі збільшило розміри поєднань з хромом, це може негативно вплинути на подальшу експлуатацію покриття.

4.4 Дослідження покриття, нанесеного катодом ВДП, легованим Hf

При нанесенні покриття складу Ni-Cr-Al-Hf, його структура рівномірна дефектів, таких як пористість, тріщини та відшарування, не виявлено.

Є незначні дефекти зони переходу основного матеріалу та покриття, але це є допустимим. В процесі нанесення катоди випаровувались стабільно, горіння дуги рівномірне [91].

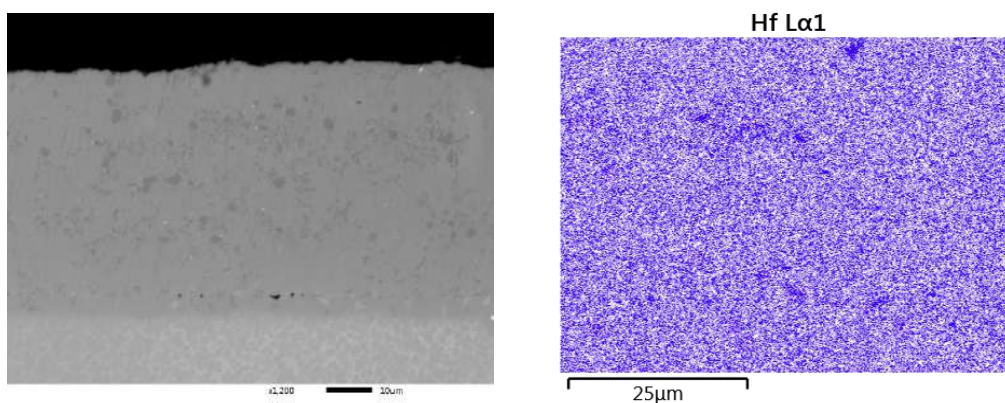


Рисунок 4.7 – Покриття, нанесене катодом, легованим Hf [91]

З рисунку 4.7 бачимо, що модифікатор Hf розподілений рівномірно по всій товщині покриття. Але є місця вкраплення великої кількості Hf в самому покритті, це обумовлено тим, що гафній коагулюється в покритті після нанесення. Ці вкраплення розміром менше за 0,001 мм і розподілені рівномірно.

4.5 Дослідження покриття, нанесене катодом ВДП, легованим La + Y

При нанесенні покриття складу Ni-Cr-Al-La-Y, його структура рівномірна, дефектів, таких як пористість, тріщини та відшарування, не виявлено.

Майже відсутні дефектні зони переходу основного матеріалу. В процесі нанесення катоди випаровувались стабільно, горіння дуги рівномірне, але гірше за Ni-Cr-Al-Y.

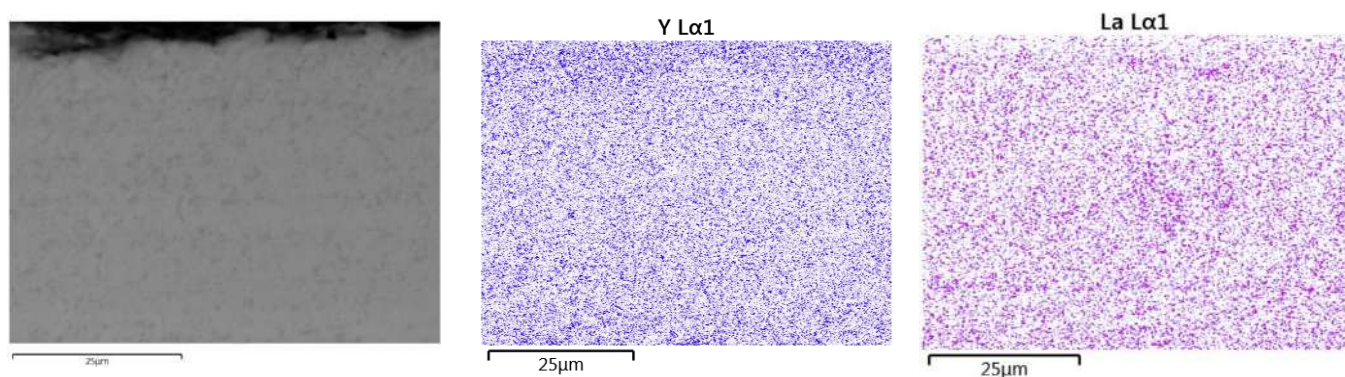


Рисунок 4.8 – Покриття, нанесене катодом, легованим La+Y

З рисунку 4.8 видно, що комплекс модифікаторів La-Y розподілено рівномірно по всій товщині покриття, скупчення модифікуючих елементів відсутні.

4.6 Дослідження покриття, нанесене катодом ВДП, легованим Y + Hf+La

При нанесенні покриття складу Ni-Cr-Al-Y-Hf-La, його структура рівномірна, дефектів, таких як пористість, тріщини та відшарування, не виявлено.

Є незначні допустимі дефекти зони переходу основного матеріалу та покриття, але це є допустимим. В процесі нанесення катоди випаровувались стабільно, горіння дуги рівномірне.

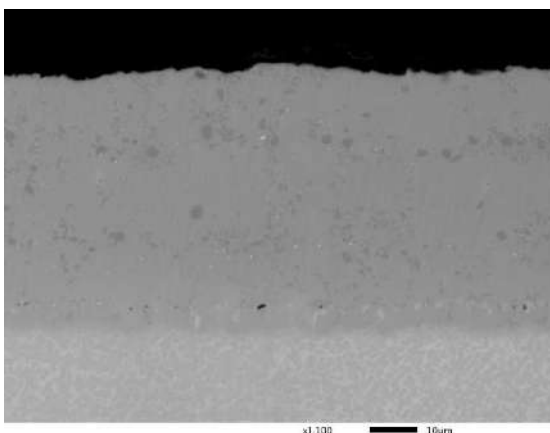


Рисунок 4.9 – Покриття, нанесене катодом, легованим $Y + Hf + La$

З рисунку 4.9 видно, що комплекс модифікаторів $Y + Hf + La$ розподілено рівномірно по всій товщині покриття. Це обумовить рівномірність властивостей в процесі його експлуатації.

4.7 Порівняння властивостей отриманих покриттів з СДП-2

Нанесення усіх видів покриттів з різними модифікаторами показало суттєвий вплив структури на формування розміру крапельної фази.

Визначено, що La , хоча і подрібнює структуру катода найліпше з усіх варіантів, має найгірший показник горіння дуги та переносу, це виключає його, як самостійного модифікатора сплаву. Раціонально використовувати La тільки у комплексі з іншими модифікаторами.

Ітрій, що серійно використовується, має добрий показник горіння та середні показники крапельної фази та подрібнення структури катода. Його використання є раціональним при нанесенні покриттів з невеликими вимогами до шорсткості.

Додавання Hf дозволило максимально зменшити крапельну фазу по відношенню до Y або La .

Встановлено, що за рахунок подрібнення структури сплаву в катодах, виготовлених методом ВДП, вдалося повністю позбавитись в покритті крапельної фази розміром більше 60 мкм. Це дозволило зменшити шорсткість поверхні

лопатки з Ra 2,02...2,21 до 1,85...1,90.

4.8 Висновки до розділу 4

1. Доведено, що структура катодів впливає на технологію нанесення покриття та застосування різних рідкісноземельних елементів або їх комплексів для модифікування катодів, параметри випаровування матеріалу при осадженні та забезпечення властивості покриття. Механізм дії модифікаторів полягає у подрібненні структури, блокуванні домішок на міжзеренних і міжфазних межах. У поєднанні вони сприяють створенню однорідної структури фазового стану, та поліпшують технологічні властивості процесу, а саме стабільність горіння дуги та процесу випаровування завдяки зменшенню розміру структурних складових та підвищенню їх гомогенності за хімічним складом.

2. Встановлено вплив модифікаторів Y, Hf, La та їх комплексів на формування структури покриття. Визначено, що La, хоча і подрібнює структуру катода найліпше з усіх варіантів, має найгірший показник горіння дуги, структура отриманого покриття рівномірна, бездефектна. Додавання модифікаторів Y та Hf дозволило підвищити показники стабільності горіння дуги. Доведено, що оптимізований склад Ni-Cr-Al-Y-Hf-La (Ni-осн., Cr - 18 ... 22, Al - 11 ... 13, Y - 0,2 ... 0,3, Hf - 0,2 ... 0,3, La - 0,1 ... 0,2) забезпечує оптимальну структуру покриття.

3. Встановлено, що за рахунок зменшення структури сплаву в катодах, виготовлених методом ВДП, вдалося повністю позбавитись в покритті крапельної фази розміром більше 60 мкм. Це дозволило зменшити шорсткість поверхні лопатки з Ra 2,02...2,21 до 1,85...1,90.

РОЗДІЛ 5

ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЛОПАТОК ТУРБИНИ З ЖАРОСТІЙКИМ ПОКРИТТЯМ ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ КАТОДІВ, ОТРИМАНИХ ЗА НОВИМ МЕТАЛУРГІЙНИМ ПРОЦЕСОМ

5.1 Технологія нанесення градієнтного покриття; зменшення шорсткості поверхні

В процесі експлуатації лопаток турбіни мають місце пошкодження вхідної кромки пера лопатки з покриттям ГЦП + СДП-2 (ГЦП - газоциркуляційне покриття CrAl, СДП-2 - жаростійкий сплав системи Ni-Cr-Al-Y) (рисунок 5.1). Пошкодження лопаток кваліфіковані як ерозійно-корозійний знос в умовах дії робочих температур, при цьому перегріву матеріалу самої лопатки (ЖС32-ВІ) під час експлуатації не виявлено.

Аналіз характеру і місць виникнення дефектів дозволив розглянути необхідність застосування нового покриття зі збільшеним захисним шаром на вхідній кромці пера лопатки [109,116].

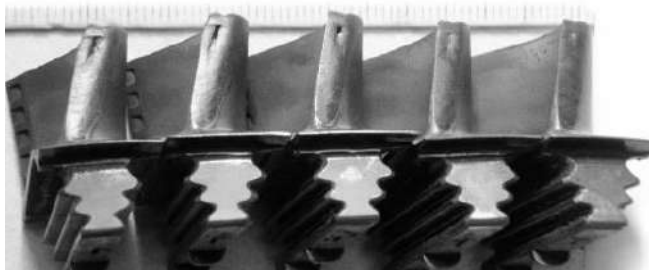


Рисунок 5.1 – Ерозійно-корозійний знос вхідної кромки пера лопаток з серійним покриттям ГЦП + СДП-2 [109]

Покриття повинне враховувати навантаження та знос в різних зонах пера лопатки. Так, на вхідній кромці лопатки потрібна додаткова товщина покриття, щоб збільшити час роботи. Для забезпечення цих вимог розроблене градієнтне покриття з локальним нанесенням додаткових шарів [109,117].

В якості заміни існуючого покриття ГЦП + СДП-2 запропоноване градієнтне покриття ГЦП + СДП-2 + СДП-2, при цьому останній додатковий шар СДП-2 наносять лише на вхідну кромку пера лопатки (рисунок 5.2).

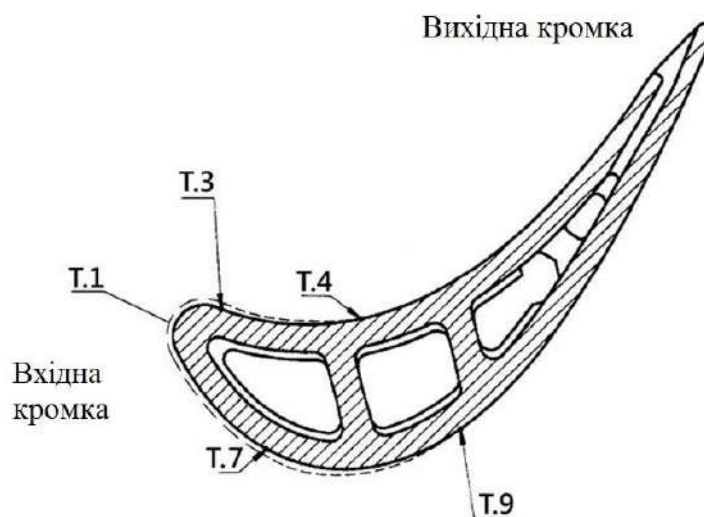


Рисунок 5.2 – Схема нанесення додаткового шару покриття (додатковий шар покриття вказано пунктиром) [109]

Згідно зі схемою (рисунок 5.2) товщина додаткових шарів в точці T.1 повинна бути максимальною, а в точках T.4 і T.9 мінімальною. З огляду на ці вимоги підібрані режими нанесення. Так як на установці КІБ можливе включення кожного з 4 катодів окремо, то катоди, які розташовані зі сторони вихідної кромки пера лопатки були знеструмлені, а катоди з боку вхідної кромки продовжували працювати. Це забезпечило нанесення градієнтного за товщиною шару покриття і виконання вимог схеми диференційованого розподілу товщини (рисунок 5.2).

Для відпрацювання технології нанесення і формування диференційованих шарів покриттів СДП-2 використовувалися лопатки без попередньо нанесеного покриття ГЦП. Контроль товщини сформованого диференційованого шару проводився в точках згідно схеми (рисунок 5.3) [109,118].

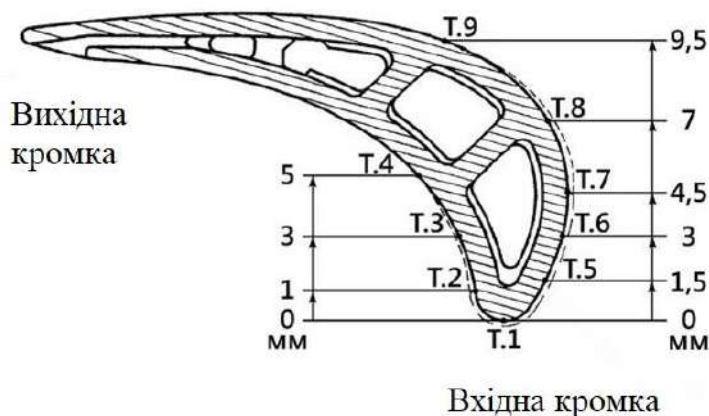


Рисунок 5.3 – Схема розташування контрольних точок (Т.1 ... Т.9) вимірювань товщини покриття [109]

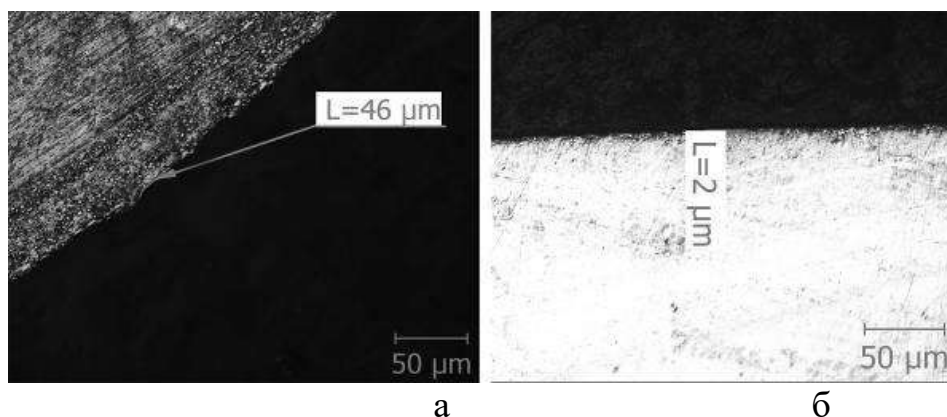
Результати вимірювань товщини шару покриття СДП-2, нанесеного на вхідну кромку згідно рисунка 5.3, представлені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Результати вимірювань товщини покриття СДП-2 в контрольних точках (рисунок 5.3) [109]

Зраз. №	Товщина шару покриття, мкм								
	T.1	T.2	T.3	T.4	T.5	T.6	T.7	T.8	T.9
1	50	44	19	6	50	46	42	8	2
2	48	42	17	3	47	42	40	7	1
3	48	44	19	4	48	45	41	5	2

З таблиці 5.1 видно, що максимальна товщина покриття СДП-2 в точці Т.1 – 48 мкм ... 50 мкм, а мінімальна 1 мкм ... 6 мкм в точках Т.4 і Т.9. Встановлено рівномірне зменшення товщини покриття від Т.1 до Т.9 і Т.4.

Мікроструктурний аналіз шліфів покриття СДП-2 в точках Т.4 і Т.9 (рисунок 5.4) встановив, що зчеплення шару з поверхнею лопатки досить міцне, без дефектів, відшарувань не виявлено.



а - точка Т.4; б - точка Т.9 (рисунок 5.3)

Рисунок 5.4 – Мікроструктура шару покриття СДП-2 [109]

Із отриманих результатів вимірювань товщини покриття СДП-2 за профілем пера лопатки (таблиця 5.1) можна зробити висновок, що використання спеціалізованої оснастки забезпечило формування диференційованих шарів покриття необхідних величин.

Технологія нанесення градієнтного жаростійкого покриття ГЦП + СДП-2 + (СДП-2 на вхідну кромку) вимагала попереднього нанесення шару покриття ГЦП + СДП-2 товщиною 40 мкм ... 50 мкм по всьому периметру пера лопатки.

Результати вимірювань товщини шару ГЦП + СДП-2 + (СДП-2 на вхідний кромці), що здійснювалося за схемою (рисунок 5.3) в контрольних точках в двох перетинах (рисунок 5.5) представлені в таблиці 5.2.

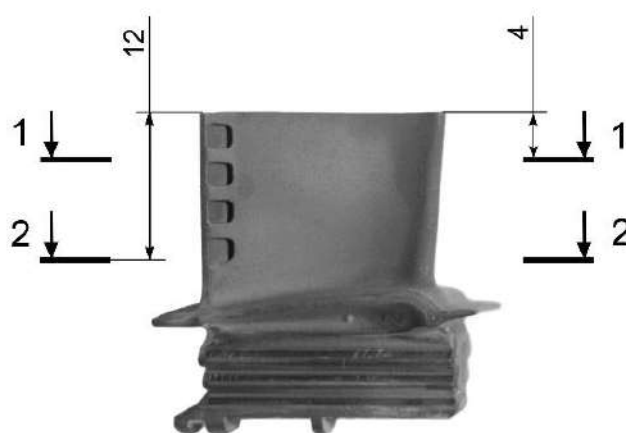


Рисунок 5.5 – Схема місць виготовлення мікрошліфів для виміру товщини покриття [109]

Таблиця 5.2 – Результати вимірювань товщини шару ГЦП + СДП-2 + (СДП-2 на вхідну кромку лопатки) в перерізі 1-1 і перерізі 2-2 [109].

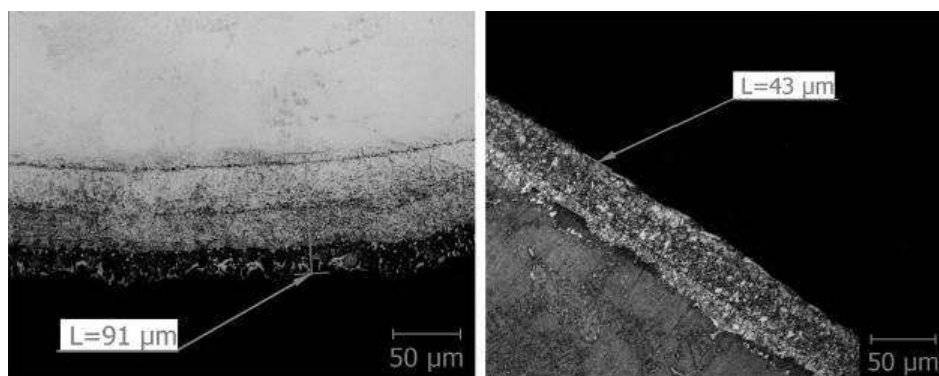
Зразок к. №	Товщина шару покриття, мкм								
	T.1	T.2	T.3	T.4	T.5	T.6	T.7	T.8	T.9
Переріз 1-1									
7	92	84	57	46	91	92	82	47	45
8	95	87	58	45	93	94	84	49	47
9	93	86	58	44	90	89	81	46	44
Переріз 2-2									
7	91	80	50	45	84	88	83	57	43
8	94	85	53	46	87	90	86	56	45
9	93	83	51	45	84	84	82	55	43

З таблиці 5.2 видно, що максимальна товщина багатошарового покриття доводиться в точці Т.1 - 91 ... 95 мкм, мінімальна – 43 мкм ... 47 мкм в точках Т.4 і Т.9.

Встановлено рівномірне зменшення товщини покриття від Т.1 до Т.9 і Т.4.

Мікроструктурний аналіз шліфів (рисунок 5.6) покриття ГЦП + СДП-2 + (СДП-2) дозволив встановити, що:

- шари ГЦП повністю продифундували до матеріалу лопатки;
- шар СДП-2 рівномірно нанесений на всі трактові поверхні і має товщину 40 мкм ... 45 мкм;



а

б

а - точка Т.1; б - точка Т.9 (рисунок 5.5) в перерізі 2-2

Рисунок 5.6 – Мікроструктура багатошарового покриття [109]

- додатковий шар СДП-2 має диференційований розподіл товщини з

максимальним її значенням в 45 мкм (сумарно з товщиною 1 шару СДП-2 до 95 мкм) на вхідний кромці, а мінімальне в середній зоні спинки і корита;

Всі шари покриття високої якості, тріщини, пори або відшарування не виявлені.

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 [118,119].

Спираючись на результати механічної обробки, можна зробити висновок, що велика і середня за розмірами крапельна фаза повністю відсутня. Лунки на поверхні покриття - це сліди ударів вібротіл та залишки кратерів після відриву крапель.

Встановлені закономірності впливу геометричних характеристик катодів на технологію нанесення градієнтного покриття. Доведено, що застосування металургійного методу ВДП дає можливість отримання катодів у формі циліндра з оптимальною структурою та хімічним складом. Це забезпечило можливість його використання для нової технології нанесення градієнтного покриття в діапазоні товщин 43 мкм ... 95 мкм.

5.2 Випробування модифікованих покриттів на жаростійкість

Наступним етапом роботи було випробування отриманих покриттів на жаростійкість [120], для чого використовували лабораторну електропіч SNOL 6,7/1300 та методику, представлену в розділі 2.6.1.

Кожен із варіантів покриття наносили на зразок зі сплаву ЖС-32 і нагрівали до температури 1050 °С та витримували впродовж 100 ... 400 годин. Результати вимірювання маси зразків представлені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Результати вимірювання маси зразків

Сплав	Час витримки, год			
	100	200	300	400
	Втрата маси, г/м ²			
Без покриття	-60	-	-	-
Ni-Cr-Al-Y	9	15	5	-4
Ni-Cr-Al-La	10	16	4	-5
Ni-Cr-Al-Hf	8	12	5	-1
Ni-Cr-Al-Y-La	9	15	3	-4
Ni-Cr-Al-Y-Hf-La	8	13	5	-3

Слід відмітити що спочатку маса зразків збільшується тому, що відбувається поглинання металом кисню, а вже потім маса зменшується.

Із результатів вимірювання втрати маси зразків в процесі випробувань можна зробити висновок, що найкращого результату вдалося досягти додаванням гафнію у склад сплаву. Обидва сплави з гафнієм показали зменшення втрати маси у процесі жаростійких випробувань. Встановлено, що введенням в покриття мікролегуючих елементів (Y, Hf, La) підвищується жаростійкість сплаву на основі Ni-Cr-Al при температурі 1050 °C на 2%. Визначальним фактором у механізмі підвищення жаростійкості сплаву при високих температурах є утворення алюмінідів та сполук, прискорюючих їх формування. Також в процесі впливу високих температур наявність модифікаторів покращує опірність покриття до відшарування з поверхні лопатки.

5.3 Відпрацювання технології зняття градієнтного покриття методом електронно-плазмового полірування

Згідно ідей, закладених у патенті по зняттю нітриду титана [121], розроблена та запатентована [122] технологія зняття жаростійких покриттів з поверхні лопаток.

При ремонті робочих лопаток турбін для видалення залишків покриття з їх

поверхні використовують хіміко-механічні, хімічні і механічні способи обробки [123]. У процесі відновлення лопаток турбіни основною проблемою є складність рівномірного видалення пошкодженого жароміцного покриття.

Найбільш прогресивним методом зняття залишкових покриттів є їх поєднання, при цьому можливе максимально ефективне управління всіма процесами.

При застосуванні хімічних методів використовують концентровані водні розчини кислот (азотна, фтористоводнева та ін.). Процес рихління та зняття покриття може тривати від декількох хвилин до декількох годин в залежності від хімічного складу та товщини покриття [124].

Слід враховувати, що при використанні електрохімічних та хімічних методів видалення покриттів відбувається травлення поверхні. Досягти повного знання відпрацьованого покриття лопатки, як правило, не вдається, тому що воно часто має різну товщину шару по висоті і контуру пера. За технічними вимогами допускається залишкове покриття у кількості 10..20% [125, 126].

У дисертаційній роботі було застосовано метод хімічної та електролітно-плазмової обробки (ЕПО) поверхні металів і сплавів.

Однак, зважаючи на складну і точну конфігурацію лопаток турбіни, жорстких допусків геометричних розмірів, при застосуванні методу видалення покриття ЕПО виникає додаткова проблема - пошкодження основного матеріалу по гострим кромкам та іншим виступаючим елементам [127, 128].

Для вирішення цієї проблеми було розроблено технологію, що включає проведення металографічних досліджень з виміром товщини шару покриття, що залишився в контрольних точках, згідно ескізу (рисунок 5.7), а також спеціальне оснащення — екран, що дає можливість контролювати швидкість зняття покриття у різних зонах лопатки [129]. Слід зазначити, що для відновлення лопаток з рівномірно нанесеним покриттям спеціальне оснащення не потрібне, а у випадку з диференційним (градієнтним) покриттям, відповідно, необхідне застосування екрану. Схема розташування екрану представлена на рисунку 5.8.

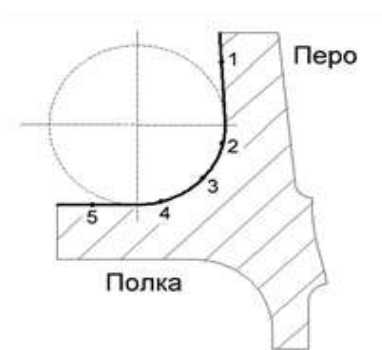


Рисунок 5.7 – Схема розміщення контрольних точок для виміру товщини покриття [129]

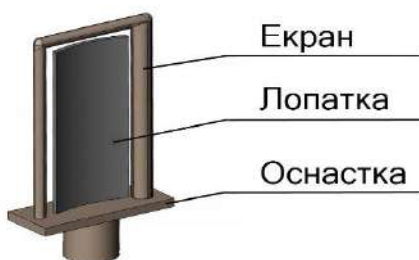


Рисунок 5.8 – Схема розташування розвантажувального екрану по відношенню до лопатки [129,130]

Цей екран в процесі ЕПО знаходиться безпосередньо біля гострих кромek лопатки (1 ... 2 мм). При цьому енергія розряду розподіляється між екраном і поверхнею лопатки, що знижує інтенсивність руйнування матеріалу в прилеглий до нього зоні. Застосування такого екрану істотно сповільнює обробку гострих кромek і малих радіусів вхідної і вихідної кромek пера [129]. Однак, додатково виникає проблема швидкого руйнування екрану в результаті його розтривлення. Експериментально було встановлено, що його заміну слід проводити після 60-ти циклів обробки.

На основі проведених досліджень було розроблено технологію обробки лопатки:

1. Розрихлення покриття проводили методом хімічного травлення. Замок лопатки та зовнішню поверхню бандажної полиці ізолювали лаком ХВ-5179.

Параметри розрихлення покриття [122,130]:

Кислота азотна 350 ... 390 г/дц³;

Кислота фтористоводнева 9 ... 11 г/дц³;

Залізний порошок ПЖ-4М 2 ... 4 г/дц³;

Час витримки 60 хв;

Температура 35 ... 42 °С;

Нейтралізація (склад розчину):

Сода кальцінована 30 ... 50г/дц³;

Температура 18 ... 25 °С;

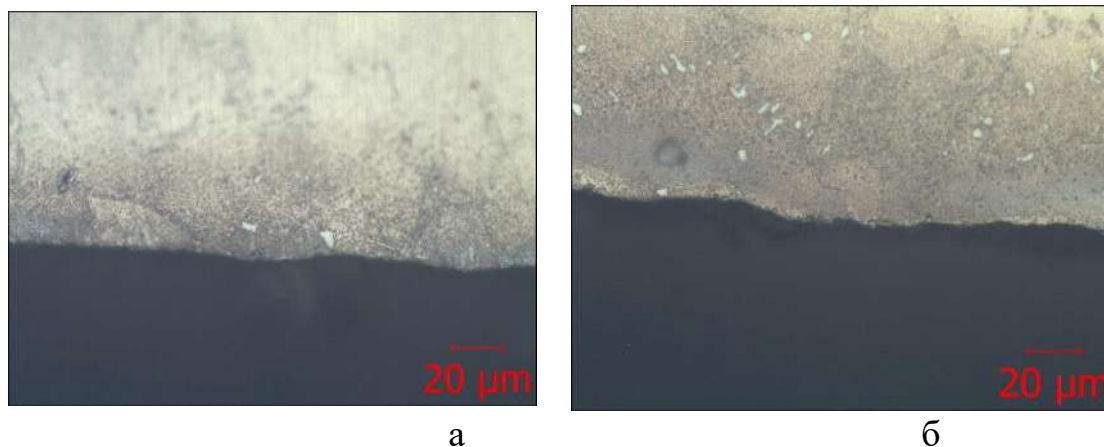
Час витримки 2 ... 3 хв.

2. Після розрихлення покриття, лопатку обдували мікропорошком електрокорунду F400, при тиску повітря 1,5 МПа для видалення нальоту.

3. Видалення залишків покриття проводили електролітно-плазмовим методом (ЕПО) в фтористоводневому розчині електроліту (NH_4F -3% + KF -1% + NaSiF_6 -3% + H_2O) протягом 7 хвилин, при цьому ізоляційний лак не видаляли.

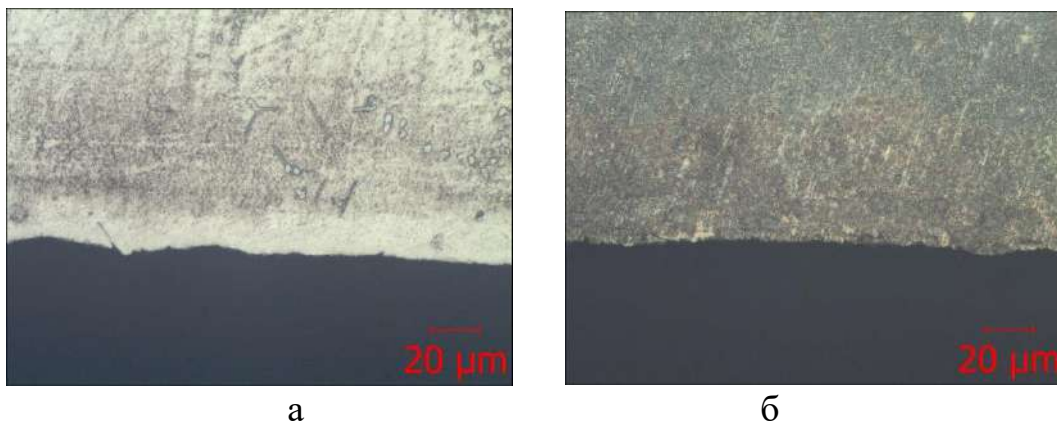
Проведено металографічні дослідження на наявність залишків покриття і розрихлення основного матеріалу.

Фотографії мікрошліфів лопаток наведені нижче (рисунок 5.9, рисунок 5.10).



а – з боку спинки; б – з боку корита

Рисунок 5.9 – Мікрошліф пера лопаток



а – з боку полки замка до корита; б – з боку полки замка до спинки.

Рисунок 5.10 – Мікрошліф пера лопаток

На фотографіях мікрошліфів (рисунок 5.9, рисунок 5.10), покриття на лопатці повністю відсутнє.

Згідно проведеного порівняльного аналізу вимірів геометричних розмірів після видалення покриття встановлено, що остаточно оброблені поверхні змінилися незначно в межах допуску, а поверхні, підлягаючі видаленню покриття, ближче до значень розмірів лопатки без покриття [130].

Лопатка має залишки покриття на площі не більше 25%, що допустимо згідно ремонтної технології.

5.4 Використання отриманих результатів досліджень у авіадвигунобудуванні для підвищення ресурсу лопаток турбіни газотурбінних двигунів

На підставі проведених металургійних досліджень було отримане практичне значення результатів (Додаток А, Додаток Б, Додаток В):

1. Розроблено технологію комплексного легування жаростійкого сплаву Ni-Cr-Al із заданою кількістю легуючих елементів і їх рівномірним розподілом по всьому об'єму катода.
2. Розроблено технологію нанесення комплексного градієнтного

жаростійкого покриття на трактову поверхню робочих лопаток турбіни.

3. Розроблено дослідно-промислову технологію механічної обробки поверхневого шару градієнтного покриття віброполіруванням із забезпеченням рівномірності знімання покриття, що дозволило підвищити клас шорсткості більш ніж в 2 рази.

4. Проведено випробування деталей з модифікованим градієнтним покриттям на жаростійкість, підтверджено працездатність деталей в умовах впливу високих температур.

5. Адаптована до нанесення жаростійких покриттів установка КІБ, яка знаходиться в АТ «МОТОР СІЧ» (м. Запоріжжя, Україна).

Очікуваний економічний ефект від використання установки КІБ включає:

- збільшення завантаження за один цикл нанесення покриття лопатками в тричі;

- збільшення раціонального використання матеріалу катоду на 35 ... 40%, що складає економічний ефект більше 3 млн. грн на рік на 2,5 т сплаву;

- можливість розширення технологічних прийомів нанесення покриття.

Підтверджено актом випробування на АТ «МОТОР СІЧ» (Додаток Б).

6. Основні положення роботи впроваджені в навчальний процес при викладанні в НУ «Запорізька політехніка»

Вид та об'єм впровадження (Додаток В):

- класифікація жароміцних покриттів та дослідні данні фізико-механічних і службових властивостей іонно-плазмових покриттів впроваджені в лекційний курс «Матеріали для наплавлення та напилення»;

- способи виробництва витратних електродів для іонно-плазмових покриттів впроваджені в лекційний курс «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 впроваджені в лекційний курс «Контроль якості покриттів»;

- залежність якості іонно-плазмових покриттів від параметрів режиму напилення впроваджена до дисципліни «Контроль якості покриттів»;

- процеси на границі контакту метал-покриття впроваджені в лекційний курс «Поверхневі фізико-хімічні процеси».

Таким чином комплексне дослідження металургійних методів показало, що вакуумно-дуговий переплав є найбільш раціональним методом для отримання заготовок катодів нової геометрії замість ВІВ метода, приблизивши при цьому рівномірність складу та дрібнодисперсність структури до ГМ метода.

Оптимізація складу катодів нової геометрії шляхом комплексного модифікування Y, Hf, La забезпечило підвищення якості отриманого покриття, дозволило впровадити принципово нову градієнтну схему нанесення покриттів, забезпечило збільшення ресурсу турбінних лопаток і можливість застосування модифікованих покриттів в авіадвигунах 5-го покоління.

5.5 Висновки до розділу 5

1. Використовуючи катоди розробленого складу та нової геометрії, виготовлені методом ВДП, та промислову установку КІБ, нанесено градієнтне покриття на лопатки турбіни з підвищеною товщиною з 50 мкм до 95 мкм на вхідній кромці, в середній частині профілю лопатки та вихідній кромці товщина покриття не змінилась ~ 43 мкм. Використання такого градієнтного нанесення зі збільшеною товщиною забезпечує підвищення ресурсу робочої лопатки турбіни мінімум у два рази.

2. Розроблено дослідно-промислову технологію механічної обробки вібротілами поверхні градієнтного покриття, клас чистоти поверхні збільшився у 4 рази, а велика і середня за розмірами крапельна фаза повністю відсутня на проточній поверхні лопатки. Забезпечено рівномірне контрольоване зняття покриття, а значення шорсткості підвищилось з Ra 3,2 до Ra 0,4. (Додаток А)

3. Проведене дослідження впливу модифікаторів Y, Hf, La на жаростійкість сплаву. Встановлено, що комплексне модифікування Y+Hf+La при температурі 1050 °C дозволяє збільшити жаростійкість на 2%. Визначальним фактором у механізмі підвищення жаростійкості сплаву при високих температурах є утворення алюмінідів та сполук, прискорюючих їх формування. Також в процесі впливу високих температур наявність модифікаторів покращує опірність покриття до відшаровування з поверхні лопатки.

4. Для збільшення ремонтпридатності лопаток розроблена та запатентована технологія зняття жаротривкого покриття методом електролітно-плазмової обробки. Технологія дозволяє видаляти покриття на основі нікелю з металеві підкладки з мінімальним пошкодженням 0,01 ...0,02 мм, що гарантує збереження геометричних розмірів турбінних лопаток при ремонті.

5. Комплексним дослідженням металургійних методів встановлено, що вакуумно-дуговий переплав є найбільш раціональним методом для отримання заготовок катодів нової геометрії замість ВІВ метода, приблизивши при цьому рівномірність складу та дрібнодисперсність структури до ГМ метода.

Оптимізація складу катодів шляхом комплексного модифікування Y, Hf, La забезпечила підвищення якості отриманого покриття, дозволила впровадити принципово нову градієнтну схему нанесення покриттів, призвела до збільшення ресурсу турбінних лопаток і можливості застосування модифікованих покриттів в авіадвигунах 5-го покоління. (Додаток Б)

ВИСНОВКИ

За результатами дослідження можуть бути зроблені наступні висновки:

1. Аналіз технічної літератури та сучасного стану питання показав, що роботи присвячені удосконаленню металургійних процесів отримання катодів для нанесення жаростійких покриттів з новою геометрією та складом, шляхом підвищення комплексу якісних та технологічних характеристик зливків, є актуальними та потребують подальшого розвитку.

2. Проведений комплексний аналіз матеріально-технічної бази для вирішення цілей та задач, поставлених у дисертаційній роботі. На підставі сучасних методів досліджень та випробувань обрані металургійні методи виготовлення катодів для застосування на установках КІБ. З використанням сучасних перевірених методик і обладнання визначали хімічний склад, структуру і фізико-механічні властивості сплавів та покриттів, відносна похибка не більше 3%.

Все це дозволило отримати залежності зміни якісних показників досліджуваних сплавів і встановити взаємозв'язок між ними.

3. Отримані результати впливу металургійних процесів ГМ, ЕПП, ВІВ, ВДП виготовлення катодів на їх якісні та технологічні властивості. Доведено, що при використанні методу ВДП в структурі катода формується дрібнодисперсна структура розміром 25 ... 90 мкм, а також відсутні ліквації розміром більше 150 мкм, це дає змогу обрати його як найбільш прийнятний для виготовлення катодів у виробничих умовах.

4. Доведено, що застосування в якості модифікаторів ітрію, лантана, гафнію та їх сполук є найбільш ефективним для отримання дрібнішої структури та рівномірного розподілу елементів у складі катода. Ці елементи активно взаємодіють з домішками - елементами впровадження і можуть утворювати стабільні карбіди і оксиди на границях розділу структури. Також вони формують нанорозмірні виділення фаз, які стабілізують структуру сплаву і підвищують його

властивості.

5. Розглянуті параметри покриття Ni-Cr-Al-Y-Hf-La (Ni-осн., Cr - 18 ... 22, Al - 11 ... 13, Y - 0,2 ... 0,3, Hf - 0,2 ... 0,3, La - 0,1 ... 0,2), отриманого при осадженні з модифікованих катодів та забезпечення заданих властивостей. Розглянутий механізм дії модифікаторів на структуру покриття. Забезпечено утворення однорідної структури фазового стану та поліпшені технологічні властивості процесу, а саме, стабільність горіння дуги та процесу випаровування завдяки зменшенню розміру структурних складових та підвищення їх гомогенності за хімічним складом.

6. Отримана закономірність впливу вихідних типів структури сплавів катодів на шорсткість іонно-плазмового покриття. Так катод отриманий ВДП методом має розмір твердого розчину та інтерметалідних фаз 25 ... 150 мкм, фаз з включенням Y - 5 ... 10 мкм, а катод отриманий ВІВ методом, має розмір твердого розчину і інтерметалідних фаз – від 50 ... 200 мкм, фази з включенням Y - 15 ... 30 мкм. Покриття, нанесене із ВДП катодів, має в два рази менше крапельної фази розміром 0,01 ... 0,045 мм і повну відсутність крапельної фази розміром більше 0,065 мм, порівняно покриттям, отриманим з катодів виготовленими методами ВІВ. Це дозволило зменшити шорсткість поверхні лопатки з Ra 2,02 ... 2,21 до 1,85 ... 1,90.

Зменшення крапельної фази забезпечує більш низьку шорсткість поверхні лопаток і, відповідно, кращу якість поверхні лопатки в цілому.

7. Встановлені закономірності впливу геометричних характеристик катодів та хімічного складу на технологію нанесення градієнтного покриття. Використовуючи катоди дослідного складу Ni-Cr-Al-Y-Hf-La нової геометрії, виготовлені методом ВДП, та промислової установки КІБ, замість АПН-250, вдалося збільшити кількість лопаток, що одночасно напиляються з 72 до 288 шт.. Реалізовано нанесення градієнтного покриття на лопатки турбіни з підвищенням товщини слою на вхідній кромці до ~ 95 мкм, а в середній частині профілю лопатки та вихідній кромці ~ 43 мкм. Використання такого градієнтного нанесення зі збільшеною товщиною забезпечує підвищення ресурсу робочої

лопатки турбіни мінімум у два рази.

8. Проведене дослідження впливу мікролегуючих елементів Y, Hf, La на підвищення жаростійкості сплаву. Встановлено, що комплексне модифікування Y+Hf+La при температурі 1050 °C дозволяє збільшити жаростійкість на 2%. Визначальним фактором у механізмі підвищення жаростійкості сплаву при високих температурах є утворення алюмінідів та сполук, прискорюючих їх формування. Доведено, що в процесі впливу високих температур наявність модифікаторів покращує опірність покриття до відшарування з поверхні лопатки.

9. Розроблено дослідно-промислову технологію механічної обробки поверхневого шару градієнтного покриття віброполіруванням із забезпеченням рівномірності знімання покриття, що дозволяє значно підвищити шорсткість з Ra 3,2 до Ra 0,4.

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

10. Проведено комплексне дослідження металургійних методів, яке показало, що вакуумно-дуговий переплав є найбільш раціональним методом для отримання заготовок катодів нової геометрії замість ВІВ метода, приблизивши при цьому рівномірність складу та дрібнодисперсність структури до ГМ метода.

Оптимізація складу катодів нової геометрії шляхом комплексного модифікування Y, Hf, La забезпечила підвищення якості отриманого покриття, дозволила впровадити принципово нову градієнтну схему нанесення покриттів, призвела до збільшення ресурсу турбінних лопаток і можливості застосування модифікованих покриттів в авіадвигунах 5-го покоління.

Таким чином, була досягнута мета: відпрацювання металургійних процесів отримання катодів нової геометрії та складу, шляхом підвищення комплексу якісних та технологічних характеристик зливків.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. Пермь: «Авиадвигатель», 2006. 1202 с.
2. Скибин В.А., Солонин В.И., Палкин В.А. и др. Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний по созданию перспективных авиационных двигателей. М.: ЦИАМ, 2004. 424 с.
3. Бакулев В.И., Голубев В.А., Крылов Б.А. и др. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. М.: Издательство МАИ, 2003. 688 с.
4. Дмитриев В.Г. Проблемы создания перспективной авиационно-космической техники.– М.: ФИЗМАЛИТ, 2005. 645 с.
5. 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* (Запорожье, 19-20 мая 2015г.). Запорожье: АО «МОТОР СИЧ», 2015. С. 20-22.
6. Александров В.Г., Базанов Б.И. Справочник по авиационным материалам и технологии их применения. М.: Транспорт, 1979. 263 с.
7. Абраимов Н.В. Высокотемпературные материалы и покрытия для газовых турбин. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
8. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Сб.научн. трудов. Авиационные материалы и технологии: Юбилейный научн.-техн. сб. (приложение к журналу Авиационные материалы и технологии). М.: ВИАМ, 2012. 475 с.
9. Захаров М.В., Захаров А.М. Жаропрочные сплавы. – М.: Металлургия. – 1976. – 230 с.
10. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия. Москва: 2-е изд. - М. : Наука, 2006. - 632 с.

11. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В. Светлов И.Л., Демонис И.М. Литейные жаропрочные сплавы для перспективных авиационных ГТД. *Технология легких сплавов*. 2007. №2. С. 6-16.

12. Павленко Д.В. Исследование способов управления гранулометрическим составом металлических порошков при их получении методом газодинамического распыления сплавов. *Косм. наука технол.* 2002. №8. С.132-135.

13. Гарибов Г.С., Гриц Н.М., Добаткин В.И. Металлургия гранул жаропрочных никелевых сплавов. *Технология легких сплавов*. 2015. №2. С. 34–9.

14. Береснев А.Г., Логунов А.В., Логачева А.И. Проблемы повышения качества жаропрочных сплавов, получаемых методом металлургии гранул. *Вестник МАИ*. 2008. Т. 15. №3. С.83–89.

15. Терновой Ю.Ф. Получение микрогранул сферической формы без сателлитов при диспергировании металлических расплавов инертным газом. *Металургія*. Випуск 2 (40). 2018. С. 28-32

16. Терновой Ю.Ф., Пашетнева Н.Н., Воденников С.А. Полуфабрикаты и изделия из распыленных металлических порошков. Запорожье: Изд-во ЗГИА, 2010. 184 с.

17. R.M. German «Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing», США, 2005. – 540 с.

18. 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.

19. Лупінос С. М. Сучасні тенденції розвитку гранульної металургії / С. М. Лупінос, Д. В. Прутцьков, Д. О. Листопад, В. О. Панова, Р. І. Безпалов, Р. М. Воляр *Металургія*. 2017. Вип. 2. - С. 33-37.

20. Казачков Е.А., Чепурной А.Д. Электронно-лучевой переплав. Раздел курса «Специальные процессы электроплавки». Мариуполь: ПГТУ, 1993. 38 с.

21. Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высокорреакционных металлов / Б.Е. Патон, Н.П. Тригуб, С.В. Анохин.- Киев: Наук.думка, 2008. - 312 с.

22. Готвянський Ю.Я., Рокожиця Н.М. Електронно-променевої переплав: можливості і перспективи розвитку (огляд)// Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра: Збірник праць співробітників і студентів кафедри «Фізико-хімічні основи технології металів». – К.: ІВЦ „Видавництво «Політехніка»”, 2009. – С. 54-58.

23. Электронно-лучевая плавка в литейном производстве / Под ред. С. В. Ладохина– К.: Изд-во «Сталь», 2007. – 626 с.

24. Березос В.О. Розробка обладнання та технології отримання порожнистих зливків великого діаметру з титанових сплавів методом електронно-променевої плавки : дис... канд. техн. наук: 05.16.07 / НАН України; Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона. - К., 2006. -128 с.

25. Тихоновский А.Л., Тур А.А. Рафинирование металлов и сплавов методом электронно-лучевой плавки.- Киев:Наукова думка, 1984.-272с.

26. Мовчан Б.А. Электронно-лучевая плавка и рафинирование металлов и сплавов / Б.А. Мовчан, А.Л. Тихоновский, Ю.А. Куринов. – К.: Наукова думка, 1973. –237 с

27. Электронно-лучевая плавка / Б.Е. Патон, Н.П. Тригуб, Д.А. Козлитин и др. – К. : Наук. думка, 1997. – 268 с

28. Мовчан Б.А., Тихоновский А.Л., Курапов Ю.А. Электронно-лучевая плавка и рафинирование металлов и сплавов. Киев: Наук. Думка, 1973. 238 с.

29. Патон Б.Е. Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высокорекреационных металлов / Б.Е. Патон, Н.П. Тригуб, С.В. Ахонин. – К. : Наук. думка, 2008. – 312 с

30. Вольф О.О. Дослідження впливу електронно-променевого переплаву на хімічний склад та механічні властивості титанових сплавів//Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра: Збірник праць співробітників і студентів кафедри «Фізико-хімічні основи технології металів». – К.: ІВЦ „Видавництво «Політехніка»”, 2010. – С. 52-56.

31. Электрометаллургия стали и ферросплавов / Д.Я. Поволоцкий, В.Е. Роцин, М.А. Рысс и др.: под ред. Д.Я. Поволоцкого. М.: Металлургия, 1984.-

568 с.

32. Фомин Н.И., Затуловский Л.М. Электрические печи и установки индукционного нагрева. — М.: Metallurgy, 1979.-247 с.

33. Костяков В.Н. Плазменно-индукционная плавка. - Киев: Наукова Думка, 1991.-207 с.

34. Свенчанский А.Д. Электротехнологические промышленные установки Учебник для вузов/ И.П. Евтюкова, Л.С. Кацевич, Н.М. Некрасова, А.Д. Свенчанский; Под ред. А.Д. Свенчанского. - М.: Энергоиздат, 1982. - 400 с.

35. Электрометаллургия стали и ферросплавов / Д.Я. Поволоцкий, В.Е. Рощин, М.А. Рысс и др. : под ред. Д.Я. Поволоцкого. М.: Metallurgy, 1984.-568 с.

36. Кудрин В.А. Теория и технология производства стали. -М.: Мир, 2003. - 528 с.

37. Бородулин Г.М., Мошкевич Е.И. Нержавеющая сталь. М.: Metallurgy, 1973. - 319 с.

38. Плавка и литье титановых сплавов / А.Л. Андреев и др.; М.: Metallurgy, 1994. 368 с.

39. Институту электросварки – 75! Состояние и перспективы развития специальной электрометаллургии / В.Я. Саенко // Современная электрометаллургия. — 2009. — № 3 (96). — С. 3-8.

40. Применение электрошлакового и вакуумно-дугового переделов для повышения качества металла цельнокатанных железнодорожных колес / М.И. Гасик, Ю.С. Пройдак // Современная электрометаллургия. - 2019. - № 1. - С. 35-45

41. Свойства сплавов на основе алюминидов титана $\gamma\text{-TiAl}/\alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al}$ при комплексном легировании / С.А. Фирстов, И.Д. Горная, Ю.Н. Подрезов, А.А. Бондарь, А.В. Шереметьев // Современная электрометаллургия. — 2018. — № 3 (132). — С. 32-38.

42. Структурные и технологические аспекты получения качественных полуфабрикатов из жаропрочного интерметаллидного сплава на основе Ti_2AlNb с высоким комплексом свойств / С.В. Скворцова, А.А. Ильин, М.Г. Штуца, А.В. Александров, А.В. Андреев, О.З. Умарова // Металлофизика и новейшие

технологии. — 2015. — Т. 37, № 10. — С. 1313-1324.

43. Вакуумно-дуговой способ получения трубной заготовки из сплава Zr1Nb / В.М. Ажажа, А.Ф. Болков, Б.В. Борц, И.Н. Бутенко, А.Ф. Ванжа, В.Н. Воеводин, Н.П. Вьюгов, П.Н. Вьюгов, Л.В. Горожанкина, И.Б. Доля, О.Е. Кожевников, С.Д. Лавриненко, В.В. Левенец, К.А. Линдт, И.М. Неклюдов, Н.Н. Пилипенко, В.Н. Пельх, В.И. Попов, Г.Р. Семенов, В.А. Щетинин // Вопросы атомной науки и техники. — 2005. — № 5. — С. 110-114.

44. Борнацкий И.И., Михневич В.Ф., Яргин С.А. Производство стали, М.: Металлургия, 1991. - 400 с.

45. Корнилов И. И. Титан. М.: Наука, 1975. 305 с.

46. Слиток вакуумно-дугового передела. Швед Ф.И. - Челябинск. ООО «Издательство Татьяны Лурье», 2009. -428 с.

47. Анализ повреждений лопаток газотурбинных двигателей / Ю. С. Налимов // Металл и литье Украины, 2014. -№ 12 (259). С 17-22.

48. Диаграммы состояния двойных металлических систем ред. Лякишева Н.П. Машиностроение, 2001, - 872с.

49. Высокотемпературные материалы и покрытия на основе интерметаллидов системы никель-алюминий / К.И. Портной и др. *Порошковая металлургия*. 1980. №2 (206). С. 33-39.

50. Мовчан Б.А., Малашенко И.С. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме / Под ред. Б.Е. Патона. К.: Наук, думка. 1983. 232 с.

51. Сисм Ч., Столлов Н., Хагель В. Суперсплавы II /Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / пер. с англ. / Под ред. Р. Е. Шалина. М.: Металлургия, 1995. 384 с.

52. Ющенко К.А. Анализ разрушения и долговечности лопаток турбин с защитным покрытием / Ющенко К.А. Малашенко И.С. Яровицын А. В. Кушнарера Т. Н. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2015. №1. С. 117-124.

53. Каблов Е., Мубояджан С. Защитные покрытия лопаток турбин перспективных ГТД. *Газотурбинные технологии*. 2001. №3. С.30-32.

54. Фролов В.А., Поклад В.А., Викторенков Д.В. Технологии нанесения

термозащитных покрытий методами газотермического напыления (обзор). *Технология машиностроения*. 2005. №2. С. 47-51.

55. Трощенко В.Т., Матвеев В.В., Грязнов Б.А. и др. Несущая способность рабочих лопаток ГТД при вибрационных нагружения. – Киев: Наук. думка, 1981. – 314 с.

56. Кузнецов Н.Д., Цейтлин В.И. Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1976. – 212 с

57. Богуслаев В.А., Яценко В.К., Притченко В.Ф. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД. – Киев: Изд-вая фирма «Манускрипт». – 1993. – 332 с.

58. Влияние температурно-временных факторов на повреждение металла и характеристики выносливости рабочих лопаток ГТД / В.Т. Трощенко, Б.А. Грязнов, И.А. Маковецкая и др. *Промышленная теплотехника*. 1982. – No 4, No 2, – С. 65-68.

59. Гецов Л.Б. Материалы и прочность деталей газовых тур-бин / Л.Б. Гецов. – М.: Надра, 1996. – 591 с.

60. Майнер Р. В. Усталость. Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок: в 2-х т. / р. В. Майнер. – М.: Металлургия, 1995. – т.1. – с. 336–372

61. Анализ разрушения и долговечности лопаток турбин с защитным покрытием / К.А. Ющенко и др. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2015. №1 (77). С.117-124. ISSN 2306-8744.

62. S. Durham, S.M. Meier, D.K. Gupta, K.D. Sheffler. Ceramic Thermal Barrier Coatings. *Advances in High Temperature Coatings and Protective Coatings*. National Res. Council of Canada, 1994. P. 226-236.

63. Прогнозирование ресурса комплекса «жаропрочный сплав жаростойкое покрытие» на основе оценки структурной стабильности / Н.А. Зайцев, А.В. Логунов, В.М. Самойленко, А.А. Шатульский. *Материаловедение. Серия техника и технология*. 2012. № 2. С. 5-11.

64. Darolia R. NiAl Alloys for high temperature structural applications // *J. Met.*

1991. V.43, N3. P.44-49.

65. Dey G.R., Sekhar J.A. Micropyretic synthesis of tough NiAl alloys // Metall. Mater. Trans. B28. 1997. P.905.

66. Мубояджян С.А., Галоян А.Г. (2012) Диффузионные алюминиевые покрытия для защиты поверхности внутренней полосы лопаток турбин. *Металлы*, 5, 4–13.

67. Спосіб захисту алітуванням металевих деталей турбомашин, які мають канали і порожнини: пат. 77525 Україна. №2002108052, заяв. 09.10.2002, опубл.15.12.2006, Бюл. № 12, 2006 р

68. Аршук М. В. Дифузійне хромоалітування сталі 12Х18Н10Т з попередньо нанесеним шаром нітриду титану / М. В. Аршук, В. Г. Хижняк, М. В. Карпець // *Металознавство та обробка металів*. - 2011. - № 4. - С. 20-24.

69. Коломыцев П.Т. Жаростойкие диффузионные покрытия. *Металлургия*, М. 1979. - 272 с.

70. Семенов А.П., Коломыцев П.Т., Жук И.Н. Исследование процессов происходящих при испарении и конденсации керамических материалов в вакууме при формировании теплозащитного покрытия на поверхности лопаток // *Защитные покрытия*. М.: Изд. ВВИА им. Е.Н. Жуковского, 1993. С. 200-207.

71. Абраимов Н.В., Терехин А.М., Шкретов Ю.П. Структурные изменения в алюминидном покрытии на сплаве ЖС32 при баротермической обработке. *Коррозия: материалы, защита*. 2008. № 9. С.23-29.

72. Применение керамических покрытий для защиты деталей ГТД, работающих в условияхэкстремальновысоких температур / В.Л. Грешта. *Вестник двигателестроения*. 2015. № 1. С. 168-171.

73. Чубаров Д.А., Матвеев П.В Новые керамические материалы для теплозащитных покрытий рабочих лопаток ГТД. *Авиационные материалы и технологии*, №4,- 2013. С.48-52.

74. 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.

75. Локтев Д. Методы и оборудование для нанесения износостойких покрытий / Д. Локтев, Е. Ямашкин. *Наноиндустрия*. 2007. №4. С. 18-24.

76. Сагалович А.В. Нанесение покрытий на сложнопрофильные прецизионные поверхности газозофазным методом (CVD) / А.В. Сагалович, А.В. Григорьев, А.В. Кононыхин, В.В. Попов, В.В. Сагалович. *Фізична інженерія поверхні*. - 2011. - Т. 9, № 3. - С. 229-236.

77. Пономаренко А.М. Технологія зміцнення деталей машин покриттями, синтезованими з газової фази / А.М. Пономаренко, М.В. Хандюк. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2017. №2. С.62-65.

78. Мубояджян С.А., Будиновский С.А. Промышленная установка МАП-1 для нанесения защитных покрытий различного назначения. *Авиационная промышленность*. 1995. №7-8. С. 44-48.

79. Мубояджян С.А., Каблов Е.Н., Будиновский С.А., Помелов Я.А. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей. *Конверсия в машиностроении*. 1999. №2. С. 72-76.

80. Nasıy, O. V. (2018). Розвиток технології вакуумного йонно-плазмового напилення та напрями її вдосконалення. *Науковий вісник НЛТУ України*, 28(10), 85-91.

81. Хансен М. Структуры двойных сплавов. В 2 т. Т. 1 / М. Хансен, К. Андерко. М. : Металлургиздат, 1962. 1188 с.

82. Эллиот Р. П. Структуры двойных сплавов. В 2 т. Т. 2 / Р. П. Эллиот. М.: Металлургия, 1970. 472 с.

83. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник. В 3т. Т. 1 / под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1996. - 992 с.

84. Robertson I.M., Wayma C. M. Ni_5Al_3 and the nickel-aluminum binary phase diagram. *Metallography*. 1984. № 17. P. 43–55.

85. ASM Handbook Committee: ASM Handbook, Alloy Phase Diagrams, ASM International, Materials Park, OH. 1999. V. 3. P. 249.

86. Okamoto H. Al-Ni (Aluminum-Nickel). *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. 2004. Volume 25. № 4. P. 394.

87. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т.: Т. 1 / Под общ. ред. Н.П. Лякишева. - М.: Машиностроение, 1996. - 992 с:
88. J. O. Andersson, J. Agren, Models for Numerical Treatment of Multicomponent Diffusion in Simple phases. *Journal of Applied Physics*, 72 (1992). P. 1350-1355.
89. J.O. Andersson, T. Helander, L. Höglund, P.F. Shi, and B. Sundman, ThermoCalc and DICTRA, Computational tools for materials science. *Calphad*, 26 (2002). P. 273-312.
90. 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 металла. Днепр*, 2019. №3(86). С. 45-51.
91. 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.
92. 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.
93. 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.
94. Ямпольский А.М. Травление металлов. М. -Л. : Машиностроение, 1964. 112 с.
95. Способы металлографического травления: Справочное издание.: Пер. с нем. / Беккерт М., Клемм Х. 2-е изд., перераб. доп. М. : Metallurgia, 1988. 400 с.
96. Богомолова Н.В. Практическая металлография. М. : Metallurgia, 1986. 230 с.

97. 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.

98. ДСТУ 12706 Якість продукції. Неруйнівний контроль. Капілярні методи.

99. ДСТУ EN571-1-2001 (Неруйнівний. Капілярної методи. Загальні вимоги)

100. 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* (Запорожье, 16-18 мая 2016г.). Запорожье: АО «МОТОР СИЧ», 2016. С.106-107.

101. П. Кофстад. Высокотемпературное окисление металлов // пер. с англ. М.: Мир, 1969. 392 с.

102. Биркс Н., Майер Дж. Введение в высокотемпературное окисление металлов // пер. с англ. М.: Metallurgia, 1987. 392 с.

103. D. Monceau and B. Prieggi. Determination of parabolic rate constant from a local analysis of mass-gain curves // *Cristallochemistry, Reactivity and Protection of Materials*, 1998. P. 477-493.

104. Масленков С.Б. Справочник жаропрочных сталей и сплавов. Москва: Metallurgia. 1983. 192 с.

105. Горюнов А.В., Ригин В.Е. Современная технология получения литейных жаропрочных никелевых сплавов. *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № 2. С. 3-7.

106. 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. 1888-1892 pp.

107. Сидоров В.В., Петрушин Н.В., Макеев А.В., Чабина Е.Б., Калмыкова Н.А. Влияние лантана и иттрия на жаростойкость монокристаллов из жаропрочных высокорениевых никелевых сплавов. *Авиационные материалы и*

технологии. 2005. №1. С. 7-15.

108. Уиттл Д.П. Высокотемпературное окисление жаропрочных сплавов // В сб.: Жаропрочные сплавы для газовых турбин / Под ред. Р.Е. Шалина.– М.: Металлургия. 1981. с. 44–58.

109. 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.

110. Склад сплаву для нанесения покрытия: заявка на винахід № u2020 05296 МПК (2020) C23C 30/00, C23C 14/14, C22C 19/05; заявл.17.08.2020.

111. Hoffelher, W. Untersuchung des Mikrogefüges Hf-hältiger Ni-Basis-Superlegierungen / W. Hoffelher, E. Kny, R. Stickler // *Mikrochim. Acta.* – 1977. –№7. – P. 429-439.

112. Бурова, Н. П. Структурные особенности никелевых сплавов, легированных титаном / Н. П. Бурова, С. Б. Маслеников // *Металловедение и термическая обработка металлов.* –1979. – № 5. – С. 19- 22.

113. Бокштейн, С. З. Строение и свойства металлических сплавов / С. З. Бокштейн, М. Л. Бернштейн. – Москва: Наука, 1971. – 498 с.

114. 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* (Запорожье, 20-23 мая 2019г.). Запорожье: АО «МОТОР СИЧ», 2019. С.91-94.

115. 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* (Запорожье, 14-17 мая 2018г.). Запорожье: АО «МОТОР СИЧ», 2018. С.130-132.

116. Градиентные комплексные защитные покрытия для монокристаллических турбинных лопаток теплонагруженных ГТД / В.П. Кузнецов, В.П. Лесников, И.П. Конакова и др. / *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2007. № 5.

С. 441-48.

117. Разработка ионно-плазменных жаростойких металлических слоев теплозащитных покрытий для охлаждаемых рабочих лопаток турбин / С.А. Будиновский, С.А. Мубояджян, А.М. Гаямов и др. / *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2013. №12. С.16-21.

118. Ефанов В.С., Овчинников А.В., Петрик И.А., Мыленко А.А. Снижение шероховатости многослойных жаростойких покрытий на проточных поверхностях лопаток ГТД. *Вестник двигателестроения*. 2018. №1. С. 138-143.

119. 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* (Запорожье, 15-17 мая 2017г.). Запорожье: АО «МОТОР СИЧ», 2017. С.107-109.

120. Игнатов, Д.В. О механизме окисления сплавов на основе никеля и хрома / Д.В. Игнатов, Р.Д. Шаигунова. – Москва: Издательство министерства наук СССР, 1960. – 107 с.

121. 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.

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

123. Куликов И.С., Ващенко С.В., Каменев А.Я. Электролитно-плазменная обработка материалов. Минск: Беларуская наука, 2010. 132 с.

124. Елисеев Ю.С., Абраимов Н.В., Крылов В.В. Химико-термическая обработка и защитные покрытия в авиадвигателестроении. М.: Высшая школа, 1999. 525 с.

125. Быбин А.А., Невьянцева Р.Р., Парфенов Е.В. Закономерности удаления внешней и внутренней зон жаростойкого алюминидного покрытия с длительной наработкой при ремонте лопаток ТВД. *Вестник УГАТУ*. 2008. № 1(26). С. 127–130.

126. Лесников В.П., Кузнецов В.П., Коротких А.В. Технология

восстановительного ремонта турбинных лопаток ГТД. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2004. №7(15). С. 236–239.

127. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Под общ. ред. В. А. Волосатова. Л.: Машиностроение, 1988. 719 с.

128. Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М. Удаление жаростойких покрытий с поверхности пера лопаток турбин в водных малоцентрированных растворах неорганических кислот. *Технология металлов*. 2006. № 11. С. 40–45.

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

130. Yefanov V.S, Ovchinnikov A.N., Petrik I.A., Mylenko A.A. Electrolyte-plasma processing of turbine blades for heat-resistant coating removal. *Технологические системы*. 2018. №2. С. 59-65.

Додаток А - Акт впровадження результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з НР та МД
 НУ «Запорізька політехніка»
 д-р. техн. наук, проф.



В.В. Наумик
 2020 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник голови ради директорів,
 технічний директор
 АТ «Мотор Січ», канд. техн. наук.



П.Д. Жеманюк
 2020 р.

ВИСНОВОК

АТ «Мотор Січ» щодо практичної цінності дисертаційної роботи
 Єфанова В.С.

Дисертаційна робота аспіранта НУ «Запорізька політехніка», який є ведучим інженером-технологом АТ «Мотор Січ», Єфанова В.С. присвячена питанням збільшення довговічності високотемпературних деталей газотурбінних двигунів шляхом підвищення фізико-механічних і службових властивостей іонно-плазмових покриттів деталей ГТД, через вдосконалення їх складу, структури та технології нанесення.

На підставі розпоряджень (3шт.) та плану заходів (2шт.) 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.

На підставі проведених досліджень розроблено технологію комплексного модифікування жаростійкого сплаву на основі Ni-Cr-Al із заданою кількістю легуючих елементів та їх рівномірним розподілом по всьому об'єму катода, що дозволило підвищити жаротривкість лопаток турбіни.

Технологія нанесення випробувана на установках КІБ розробки АТ «Мотор Січ», що є актуальним питанням при імпортозаміщенні.

Розроблено дослідно-промислову технологію механічної обробки поверхневого шару градієнтного покриття віброполіруванням із забезпеченням

рівномірності знімання покриття, що дозволяє значно підвищити шорсткість з $\Delta 5$ до $\Delta 8$ класу.

Розроблена технологія зняття жаротривкого покриття методом електrolітно-плазмової обробки.

Окремі положення дисертаційної роботи вже впровадженні у серійне виробництво лопаток робочих турбіни з високим температурно-срозійним навантаженням на малогабаритних авіаційних двигунах.

Покриття, отримані за розробленою технологією, мають практичну цінність як для авіадвигунобудування, так і турбобудування.

Робота представляє великий науковий і практичний інтерес і може бути впроваджена в практику серійного виробництва перспективних авіаційних двигунів. Запропоновані технології з отримання покриттів стосуються актуальних питань підвищення довговічності деталей газотурбінних двигунів. Впровадження перспективних технологій у серійне виробництво буде сприяти підвищенню довговічності і конкурентноздатності нашої продукції. При отриманні позитивних результатів атестаційних заходів, проведених у відповідності з вимогами, що пред'являються до авіаційних матеріалів, АТ «Мотор Січ» буде зацікавлена в упровадженні такого типу покриття у власне виробництво.

Головний металург АТ «Мотор Січ»  В.В. Ключихін

Головний зварювальник АТ «Мотор Січ»

канд. техн. наук.

 І.А. Петрик

Нач. бюро УВП УГМет АТ «Мотор Січ»

 Б.Д. Сокол

Додаток Б - Акт впровадження результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ



Головний інженер АТ «Мотор Січ»

К.Б. Балушок

07 2020 р.

м. Запоріжжя

АКТ

Випробування науково-дослідницької роботи

Комісія у складі:

Голова комісії:

Головний інженер АТ «Мотор Січ» - К.Б. Балушок.

Члени комісії:

Зам. Головного інженера АТ «Мотор Січ» - Д.А. Деміденко;

Головний металург АТ «Мотор Січ» - В.В. Клочихін;

Головний зварник АТ «Мотор Січ» - І.А. Петрик;

Аспірант НУ «Запорізька політехніка» - В.С. Єфанов.

Комісія провела аналіз впровадження результатів дослідницької роботи з випробування катодів отриманих за новою металургійною технологією на основі методу вакуумно-дугового переплаву для отримання з них жаростійкого покриття лопаток. Покриття наносили на робочі лопатки турбіни авіаційних двигунів, іонно-плазмовим методом, з використанням установок розробки АТ «Мотор Січ».

Розроблено технологію виготовлення литих катодів нового жаростійкого складу та геометрії на основі нікелю із заданою кількістю модифікуючих елементів та їх рівномірним розподілом по всьому об'єму катода, що дозволило підвищити жаротривкість покриття лопаток турбіни.

Розроблені технічні режими та випущена тимчасова технологія для нанесення покриттів з використанням дослідних литих катодів методом іонно-плазмового осадження на установках КІБ розробки АТ «Мотор Січ», що забезпечують оптимальну якість отриманого жаростійкого покриття. Представлені основні принципи підбору режимів нанесення покриттів на установках КІБ та

закладені основи для подальшої можливості їх використання. Показана можливість адаптації установок у серійне виробництво з високим завантаженням та збільшення раціонального використання матеріалу катодів. Данні режими були випробувані при нанесенні покриття складу Ni-Cr-Al-Y та нового складу Ni-Cr-Al-Y-La-Hf виготовлених методом вакуумно-дугового переплаву на робочі лопатки ТК АИ-450 та МС-500.

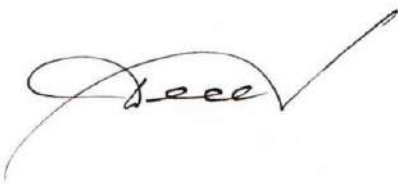
Металографічними та металофізичними дослідженням підтверджено, що отримані покриття відповідають вимогам за хімічним складом та не мають дефектів перевищуючих допустимі нормативною документацією. Зменшено крапельну фазу жаростійкого покриття в 2 рази, що призвело до зниження середньої шорсткості поверхні лопаток.

Результати дисертаційної роботи Єфанова В.С. були використані при створенні покриттів перспективних авіаційних двигунів V і VI покоління.

Очікувані технологічний та економічний ефект від використання установки КІБ розробки АТ «Мотор Січ»:

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

Зам. Головного інженера
АТ «Мотор Січ»



Д.А. Деміденко

Головний металург АТ «Мотор Січ»



В.В. Ключихін

Головний зварювальник
АТ «Мотор Січ»



І.А. Петрик

Аспірант НУ «Запорізька політехніка»



В.С. Єфанов

Додаток В - Акт впровадження результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з НР та МД

НУ «Запорізька політехніка»

В.В. Наумик09. 2020 р.

АКТ

впровадження результатів НДР

«01» 09. 2020 р.

м. Запоріжжя

Складено комісією у складі:

Голови зав. каф. «Обладнання та технології зварювального виробництва»,
д-ра техн. наук, проф. Овчинникова О.В.

Члени комісії:

доц. каф. «Обладнання та технології зварювального виробництва», канд. техн. наук
Ю.М. Савонов;

доц. каф. «Обладнання та технології зварювального виробництва», канд. техн. наук
М.І. Андрущенко;

доц. каф. «Обладнання та технології зварювального виробництва»
О.Є. Капустян.

Комісія провела роботу по визначенню фактичного впровадження результатів дисертаційної роботи аспіранта кафедри «Обладнання та технології зварювального виробництва» Єфанова Володимира Сергійовича «Удосконалення технології виготовлення литих катодів з нікелевого сплаву для нанесення жаростійких покриттів на лопатки авіадвигунів».

Вид та об'єм впровадження: Класифікація жаростійких покриттів, та матеріалів 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 впроваджені в лекційний курс «Контроль якості покриттів», залежність якості іонно-плазмових покриттів від параметрів режиму напылення в лабораторні роботи дисципліни «Контроль якості покриттів», процеси на границі контакту метал-покриття в лекційний курс «Поверхневі фізико-хімічні процеси». Досягнуті технічні результати, їх рівень – підвищення якості підготовки студентів спеціальності 131 Прикладна механіка.

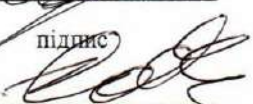
Голова комісії



О.В. Овчинникова

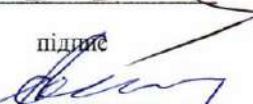
(П.І.Б.)

Члени комісії



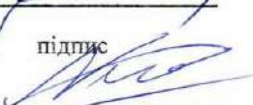
Ю.М. Савонов

(П.І.Б.)



М.І. Андрущенко

(П.І.Б.)



О.Є. Капустян

(П.І.Б.)