

## **ВИСНОВОК**

**про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації**

**Єфанова Володимира Сергійовича**

**«Удосконалення технології виготовлення литих катодів з нікелевого сплаву для нанесення жаростійких покриттів на лопатки авіадвигунів»,  
представленої на здобуття наукового ступеню доктора філософії (PhD)**

Розглянувши дисертацію та наукові публікації, у яких висвітлено основні наукові результати дисертації, а також за результатами фахового семінару зроблено такий висновок:

1) Дисертація Єфанова В.С. є завершеною науково-дослідною роботою, направленою на вирішення науко-практичного завдання - дослідженню принципів впливу металургійних процесів на склад та структуру зливків для виготовлення катодів, вивчення впливу модифікуючих елементів на структуру та властивості жаростійких покриттів, впровадженню нової геометрії та складу катодів у технологію нанесення покриттів на лопатки газотурбінних двигунів.

Мета, яка сформульована в роботі, відповідає обраному напрямку дослідження, отримані результати мають наукову новизну та сприяють досягненню мети.

2) Наукова новизна результатів, що визначають ступень і характер новизни досліджень полягають у наступному:

1. Розширене уявлення про вплив металургійних процесів виготовлення катодів на їх якісні та технологічні властивості. Доведено, що при використанні вакуумно-дугового переплаву в структурі катода формується дрібнодисперсна структура розміром 25 ... 90 мкм, а також відсутні ліквіції розміром більше 150 мкм, характерні при методі вакуумно-індукційної виплавки.

2. Розширене уявлення про закономірності впливу вихідних типів структури катодів на якість іонно-плазмового покриття. Встановлено, що за рахунок подрібнення структури катодів, виготовлених методом вакуумно-дугового переплаву, 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 вакуумно-дугового переплаву 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.

3) Основні результати дисертації представлено у 19 наукових працях:

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.

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.

3. 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.

4. Ефанов В.С., Клочихин В.В., Педаш А.А., Шило В.Г. Влияние технологии изготовления катодов на качество покрытий лопаток турбины. *Вестник двигателестроения*. 2018. №1. С. 132-137.

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.

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.

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.

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.

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.

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

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

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

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* (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* (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* (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* (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* (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*

Україне: сборник трудов межд. конф. (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.

Серед яких 7 статей здобувача опубліковано у наукових фахових виданнях України [3,4,5,6,7,8,9], та у 2 виданнях, що входять до науково-метричних баз даних Scopus [1], WoS [2], Scopus. Отримано 2 патенти [10,11] на корисну модель та подано 1 заявку на винахід [12], тези доповідей у збірниках матеріалів міжнародних науково-практичних конференцій [13,14,15,16,17,18,19].

У працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать такі результати:

- у роботі [1] проведено металографічний та структурний аналіз сплаву катода;
- у роботі [2] проведено аналіз якості конденсаційних жаротривких покриттів;
- у роботі [3] проведено літературний огляд, металографічний, рентгеноспектральний аналіз покриття;
- у роботі [4] проведений літературний огляд та порівняльний аналіз отриманих даних мікрорентген-спектрального дослідження;
- у роботі [5] проведено аналіз впливу технології виготовлення на структуру злитків з нікелевого сплаву;
- у роботі [6] проведено порівняльний аналіз отриманих даних рентгеноспектрального аналізу;
- у роботі [7] проведено металографічний та рентгеноспектральний аналіз жаростійкого покриття;
- у роботі [8] проведений літературний огляд та побудовані графічні закономірності;
- у роботі [9] проведений літературний огляд та проведена оптимізація режимів виплавлення;

- у роботі [10] проведено порівняльний аналіз отриманих даних з впливу складу електроліту на швидкість зняття покриття;
- у роботі [11] проведено порівняльний аналіз отриманих даних з впливу складу електроліту на швидкість зняття покриття;
- у роботі [12] проведено порівняльний аналіз отриманих даних та структурного та рентгеноспектрального аналізу сплаву;
- у роботі [13] проведений літературний огляд та побудовані графічні закономірності;
- у роботі [14] проведений літературний огляд та проведена оптимізація режимів нанесення покриття;
- у роботі [15] проведено літературний огляд, металографічний, рентгеноспектральний аналіз покриття;
- у роботі [16] проведено металографічний та структурний аналіз сплаву катода;
- у роботі [17] проведено металографічний та рентгеноспектральний аналіз жаростійкого покриття;
- у роботі [18] проведено порівняльний аналіз отриманих даних з впливу режимів обробки на швидкість зняття покриття;
- у роботі [19] проведено аналіз якості конденсаційних жаротривких покриттів.

#### 4) Теоретичне значення результатів дисертації.

Теоретичне значення роботи полягає в тому, що реалізовано комплексний підхід до підвищення характеристик литих зливок катодів з новою геометрією, що використовуються для нанесення жаростійких покриттів лопаток авіадвигунів.

#### 5) Практичне значення отриманих результатів.

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 виготовленого методом вакуумно-дугового переплаву.

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 оброблюваних 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 Висновком та Актом з 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.

Основні положення роботи підтверджено Актом впровадження в навчальний процес в НУ «Запорізька політехніка». 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 - «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».

До недоліків дисертації можна віднести наступне:

1. Оскільки розроблені технології формують відмінний від основи матеріалу шар структури, то окрім випробування на жаростійкість бажано б було провести випробування на міцність зчеплення покриття з основою, оскільки лопатки працюють зокрема й в умовах складнонапруженого стану, а на це в значній мірі впливає стан поверхні лопаток.



2. В дисертаційній роботі не обґрунтовано вибір установки вакуумно-дугового гарнісажного переплава, тож нема порівняння із злитками, отриманими за допомогою інших установок.

Однак в цілому вказані зауваження не знижують наукову цінність роботи та її практичну значимість.

Дисертація відповідає вимогам передбаченим пунктом 9, 10, 11 «Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії», затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 р. №167, і рекомендується до захисту у спеціалізованій вченій раді.

Рецензенти:

д.т.н., проф.,

зав. каф. «Фізичного матеріалознавства»

В.Ю. Ольшанецький

Рецензент:

д.т.н., проф.,

проф. каф. «Обладнання та технології зварювального виробництва»

М.М. Бриков

Підпис засвідчую:

Вчений секретар

НУ «Запорізька політехніка»

канд. соц. наук, доцент

27. 04. 2021



В.В.Кузьмін