

## ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, професора З.А. Дурягіної на дисертаційну роботу **Єфанова Володимира Сергійовича** на тему «Удосконалення технології виготовлення литих катодів з нікелевого сплаву для нанесення жаростійких покриттів на лопатки авіадвигунів», що представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 136 — Металургія

### **Актуальність теми дисертації.**

Вирішення задачі із підвищення надійності, довговічності і ресурсу роботи газових турбін є актуальною. Особливо це стосується матеріалів з високою вартістю, до яких відносяться жароміцні нікелеві сплави. Тому вдосконалення технології нанесення жаростійких покриттів на лопатки гарячого тракту газотурбінних установок є нагальним та своєчасним, оскільки дозволяє отримувати вироби з високими характеристиками жароміцності, жаростійкості, втомної міцності, а також фазовою та структурною стабільністю.

Робота виконувалась у відповідності 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», «Оптимізація технології вакуумно-дугових процесів для виробництва жароміцних сплавів» (№ 0121U1111988) у рамках науково-технічного співробітництва з ТОВ "ТІ ТЕКНОЛОДЖІ", у яких автор брав участь у якості виконавця. В результаті проведених досліджень, автором було розроблено технологію отримання градієнтного жаростійкого покриття на трактових поверхнях робочих лопаток турбіни й технологію механічної обробки зовнішнього шару покриття. В роботі здійснено подальший розвиток теоретичних основ впливу вихідної структури витратного матеріалу катодів на якість іонно-плазмового покриття лопаток турбін.

Метою роботи є удосконалення металургійних процесів отримання катодів нової геометрії та хімічного складу шляхом підвищення комплексу технологічних характеристик зливків.

### **Загальна характеристика роботи.**

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 та 3 додатки.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання дослідження, наведено відомості про апробацію та публікацію основних результатів дисертації.

У **першому розділі** проаналізовано різні жароміцні сплави та типи жаростійких покриттів, що застосовуються для забезпечення експлуатаційної надійності робочих лопаток турбін газотурбінних двигунів. Проаналізовано види пошкоджень і руйнувань лопаток турбіни, що працюють у високотемпературному газовому потоці, проаналізовані можливі способи підвищення їх довговічності. Це в першу чергу стосується методів виготовлення витратного матеріалу для нанесення захисних покриттів - катодів з нікелевих сплавів системи Ni-Cr-Al-Y. Аналіз літературних джерел дозволив запропонувати систему комплексного модифікування поверхні катодів ітрієм, гафнієм та лантаном з метою поліпшення їх структури та підвищення жаростійкості. Розглянуто сучасні методи

виплавлення жароміцних сплавів. Обґрунтовано основні задачі дослідження та сформульована мета роботи.

У **другому розділі** описано технології виплавлення сплавів, отримання виливків, нанесення жаростійких покриттів. Наведено методи дослідження хімічного складу, макро- і мікроструктури покриттів, контролю їх якості, визначення механічних властивостей та жаростійкості. Охарактеризована методологія обробки одержаних експериментальних даних.

У **третьому розділі** наведено результати досліджень по виготовленню катодів для нанесення іонно-плазмових покриттів методом гранульної металургії з використанням вакуумно-індукційного плавленням, електронно-променевого та вакуумно-дугового переплавлення. Слід зазначити, що для вказаних технологій виконано визначення змін хімічного складу, мікроструктури та механічних властивостей. Встановлено, що найкращим поєднанням мікроструктури та механічних властивостей володіють катоди, отримані методами гранульної мехнології та вакуумно-дугового переплавлення. Наведено результати вивчення впливу модифікаторів Y, Hf, La на мікроструктуру та властивості катодів, отриманих вакуумно-дуговим переплавленням.

У **четвертому розділі** представлені дані по розробці технології нанесення покриттів за допомогою вищевказаних катодів. Обґрунтовано вибір устаткування для нанесення жаростійких покриттів. Представлені результати нанесення захисних покриттів на робочі лопатки турбіни. Встановлено вплив модифікаторів Y, Hf, La та їх комплексів на формування мікроструктури покриття. Показано, що додавання модифікаторів Y та Hf дозволило покращити технологічні параметри процесу нанесення покриттів на лопатки турбіни через формування рівномірної, бездефектної та дрібнодисперсної структури.

Серед отриманих результатів заслуговують уваги дані про вплив крапельної фази на шорсткість поверхні лопаток й відповідно на їх здатність чинити опір дії високотемпературного газодинамічного середовища. Важливим моментом, на мій погляд, є те що за результатами дослідження вдалося повністю позбавитись в поверхневому шарі покриття присутності крупної крапельної фази, що дозволило зменшити шорсткість поверхні лопаток й відповідно покращити їх експлуатаційні характеристики. Автор проаналізував отримані експериментальні результати, систематизував їх та зробив узагальнюючі висновки.

У **п'ятому розділі** наведено результати промислового впровадження розроблених технологій виготовлення катодів у виробництво на авіабудівному підприємстві АТ «Мотор Січ». Практичним результатом проведених робіт є розробка технологічних процесів. Зокрема, впроваджено технологію комплексного легування жаростійкого сплаву Ni-Cr-Al-Y із заданою кількістю модифікаторів. Технологію нанесення комплексного градієнтного жаростійкого покриття на трактову поверхню лопаток турбіни та дослідно-промислову технологію механічної обробки поверхневого шару градієнтного покриття віброполіруванням. Одержано реальний практичний результат, що полягає у покращенні мікрогеометрії поверхні робочих лопаток. Проведено промислові випробування деталей з розробленим градієнтним жаростійким покриттям на підтверджено працездатність деталей за умов високотемпературної газової корозії. Автором доведено економічну доцільність від впровадження у виробництво розроблених технологій, які дозволять отримати економічний ефект у 3 млн. грн на рік із розрахунку на 2,5 т сплаву.

**Висновки** належним чином відтворюють основні результати дисертаційної роботи.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих в дисертації, їх достовірність.**

Достовірність наукових положень, точність одержаних експериментальних результатів, рекомендацій та висновків дисертаційної роботи забезпечено використанням сучасного обладнання науково-дослідних лабораторій, використанням сучасних методів вивчення мікроструктури досліджуваних у роботі матеріалів, коректною інтерпретацією

одержаних експериментальних результатів, що узгоджуються з існуючими теоретичними даними в галузі матеріалознавства та металургії.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

1. Розширені уявлення про вплив металургійних процесів виготовлення катодів на їх мікроструктуру та технологічні властивості. Визначено, що при використанні методу ВДП в структурі катода формується дрібнодисперсна структура розміром 25...90 мкм, відсутні ліквіції розміром більше 150 мкм, характерні при використанні методу ВІВ.

2. Розвинуті уявлення про закономірності впливу вихідної мікроструктури катодів на якість іонно-плазмового покриття. Встановлено, що в результаті подрібнення структури катодів, виготовлених методом ВДП, вдалося уникнути утворення у покритті крапельної фази, розміром більше 60 мкм. Це приводить до зменшення шорсткості зовнішнього шару покриття на лопатках від Ra 2,02...2,21 до Ra 1,85...1,90.

3. Вперше встановлено, що застосування рідкісноземельних елементів та їх комплексів для модифікування катодів суттєво впливає на їх мікроструктуру та швидкість випаровування матеріалу при осадженні. В таких спосіб вдалося одержати однорідну мікроструктуру покриття та поліпшити технологічні параметри процесу.

4. Вперше встановлені закономірності впливу геометричних характеристик катодів на технологію нанесення градієнтного покриття. Показано, що застосування методу ВДП дає можливість отримання катодів у формі циліндра із однорідною структурою та хімічним складом. Такі катоди можна використовувати для розробленої технології нанесення градієнтного покриття, товщиною 43 ... 95 мкм.

**Практичне значення роботи** полягає в розробці технології комплексного легування зливків жаростійкого сплаву системи Ni-Cr-Al для методу ВДП, та розробці технології отримання градієнтного жаростійкого покриття на трактових поверхнях робочих лопаток турбіни. Практичні результати підтверджені патентами.

### **Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях.**

Основні результати роботи знайшли відображення в 20 публікаціях, з них: 10 статей в наукових журналах, з яких 2 статті входять до наукометричної бази даних Scopus, в 7 матеріалах тез конференцій та 3 патентах.

**Висновки дисертації** відображають найважливіші теоретичні та практичні результати роботи, сформульовані коректно, логічно, відповідають змісту дисертації.

### **Оцінка мови та стилю дисертації. Відповідність дисертації спеціальності 136 – Металургія.**

Дисертаційна робота викладена логічно, послідовно та професійно. Матеріали досліджень систематизовані та коректно оформлені. За змістом дисертація відповідає паспорту спеціальності 136 – Металургія. Анотація дисертації відтворює основні результати дисертаційної роботи.

### **Зауваження до дисертації та автореферату.**

1. В табл. 2.7 наведено хімічний склад матеріалу нанесених покриттів. Розглянуті варіанти модифікування ітрієм, лантаном, гафнієм, як окремо, так і комплексно в системах Y+La+Hf та Y+La. Проте, немає даних щодо використання комплексів систем Y+Hf, La+Hf. Для розширення інформативності експериментальної бази даних бажано б було провести дослідження і цих варіантів модифікування. В назві таблиці відсутній обраний спосіб отримання цих катодів – ВДП.
2. На мій погляд, оскільки робочі лопатки працюють не тільки за умов повзучості, а і за умов дії відцентрованих сил і знакозмінних навантажень, доцільно було б провести

випробування лопаток турбін на втому з визначенням числа циклів до руйнування  $N_c$  і границі витривалості  $\sigma_{-1}$ .

3. При якісно виконаному РСМА матеріалу катодів різних систем легування з картами розподілу елементного складу, автор не зовсім коректно інтерпретує сформовану мікроструктуру. Дана методика передбачає визначення тільки елементного складу сплаву, а по картам (за інтенсивністю кольору) можна якісно встановити питому частку того чи іншого елемента і його характер розподілу. Провести фазовий аналіз цей метод не дає можливості. В той же час автор говорить про присутність різних фаз, в тому числі інтерметалідних змінного складу. Це не вірно, оскільки ідентифікація фаз потребує РФА при одночасному аналізі відповідних діаграм стану, як подвійних, так і багатокомпонентних. При цьому, як правило, ще визначають термодинамічну ймовірність утворення окремих фаз.
4. Враховуючи сказане в зауваженні №3, назви усіх таблиць, що наведені у розділі 3 коректніше назвати «Елементний склад...».
5. У висновках до розділу 3 зазначається про поліпшення структури та властивостей сплаву при отриманні катодів методом ВДП. Проте жодних даних про зміну будь-яких властивостей не наведено. Розглянуто лише зміни мікроструктури.

Однак слід підкреслити, що зроблені зауваження не знижують цінності досягнутих результатів, наукового та практичного рівня дисертаційної роботи.

#### **Оцінка змісту дисертації, її завершеність у цілому.**

Вважаю, що за актуальністю, важливістю проведених експериментальних досліджень, їхньою науковою новизною та практичною цінністю, дисертація **Єфанова Володимира Сергійовича** на тему «Удосконалення технології виготовлення литих катодів з нікелевого сплаву для нанесення жаростійких покриттів на лопатки авіадвигунів» є завершеним науковим дослідженням, відповідає вимогам МОНУ та «Порядку присудження наукових ступенів», а її автор заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора філософії (PhD) **за спеціальністю 136 – Металургія.**

#### **Офіційний опонент**

Завідувач кафедри  
матеріалознавства та інженерії матеріалів  
Національного університету «Львівська  
політехніка», професор, д.т.н.

**З. А. Дурягіна**

Підпис професора Дурягіної З. А. засвідчую

Вчений секретар Національного  
університету «Львівська політехніка»,  
доцент, к.т.н.



**Р. Б. Брилинський**