

ВІДГУК

офіційного опонента с.н.с., к.т.н. Березоса В.О. 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.

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.

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 сучасні сплави на нікелевій та нікель-кобальтової основі для деталей високотемпературної зони газотурбінних двигунів є явно недостатніми.

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.

Незважаючи на досягнуті успіхи в цій галузі, питання, що стосуються впливу металургійної технології, хімічного складу початкових сплавів на їх фізико-механічні, теплофізичні та службові властивості, залишаються недостатньо вивченими. Дослідження цих та інших питань є актуальним як для наукових, так і для виробничих цілей будівництва перспективних авіадвигунів.

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

Крім того, актуальність роботи підтверджується тим, що 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 "ПІ ТЕКНОЛОДЖІ" у яких автор брав участь у якості виконавця.

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

Надана до розгляду дисертаційна робота є актуальною, а представлений матеріал наукових досліджень змістовно відповідає паспорту спеціальності 136 – Металургія.

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 на 13 сторінках і 3 додатки на 9 сторінках.

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульована мета та задачі досліджень, вказано об'єкт і предмет дослідження, визначена наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, висвітлено особистий внесок здобувача в розробку проблеми. Наведені дані про апробацію результатів, повноту їх висвітлення в публікаціях, зазначено внесок здобувача в публікаціях.

У **першому розділі** виконано аналіз жароміцних сплавів й жаростійких покриттів, що застосовуються для забезпечення експлуатаційних характеристик робочих лопаток турбін газотурбінних двигунів. На основі аналізу видів пошкоджень і руйнувань лопаток турбіни, що працюють у високотемпературному газовому потоці, запропоновані способи підвищення

їх довговічності, а саме методів виготовлення витратного матеріалу для нанесення захисних покриттів - катодів з нікелевих сплавів системи Ni-Cr-Al-Y. Проведений глибокий аналіз джерел дозволив запропонувати систему комплексного модифікування катодів ітрієм, гафнієм й лантаном з метою поліпшення їх структури та підвищення властивостей. Розглянуто сучасні, традиційні методи виплавки жароміцних сплавів та їх ефективність. Обґрунтовано і поставлено задачі дослідження виходячи з аналізу літератури й актуальності тематики.

Проведений аналіз дозволив автору коректно сформулювати мету та окреслити задачі, що потрібно вирішити у роботі для її досягнення.

У **другому розділі** докладно описано технології виплавки катодів та нанесення жаростійких покриттів, методи дослідження хімічного складу, макро- й мікроструктури покриттів із методологією обробки одержаних експериментальних даних. Описано методологію контролю якості покриттів, випробувань механічних властивостей й жаростійкості.

У **третьому розділі** наведено дані досліджень по виготовленню катодів для нанесення іонно-плазмових покриттів методами гранульної металургії, вакуумно-індукційним плавленням, електронно-променевим плавленням, вакуумно-дуговим плавленням. В усіх випадках виконано дослідження та глибокий аналіз змін хімічного складу, структури та механічних властивостей. Більш раціональними визнано катоди, що отримані методами гранульної технології та вакуумно-дуговим плавленням.

Виконано дослідження по вивченню впливу модифікаторів Y, Hf, La структуру та властивості катодів отриманих вакуумно-дуговим плавленням. Широко досліджено і розкрито питання змін структури при введенні модифікаторів й хімічного складу структурних складових.

У **четвертому розділі** наведено дані по розробці технології нанесення покриттів за допомогою катодів, що визнані раціональними виходячи з результатів проведених досліджень. Одержано результати з нанесення жароміцних захисних покриттів на робочі лопатки турбіни. Встановлено вплив модифікаторів Y, Hf, La та їх комплексів на формування структури покриття. Показано, що додавання модифікаторів Y та Hf дозволяє покращити технологічні параметри процесу нанесення покриттів на лопатки турбіни через формування рівномірної, бездефектної та дрібнодисперсної структури.

Серед отриманих результатів заслуговують уваги відомості про вплив крапельної фази на шорсткість поверхні лопаток й відповідно на їх здатність чинити опір високотемпературному газодинамічному середовищу.

Показано, що в процесі нанесення покриттів за розробленою технологією вдалося повністю позбавитись в них крупної крапельної фази, що дозволило зменшити шорсткість поверхні лопаток й відповідно покращити їх експлуатаційні характеристики. Проведено аналіз отриманих практичних результатів із глибокою науковою інтерпретацією і висновками.

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 низки 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 робочих лопаток турбіни, та дослідно-промислову технологію механічної обробки поверхневого шару градієнтного покриття віброполіруванням з реальним практичним результатом, що полягає у покращенні стану поверхні робочих лопаток. Окрім цього, проведені реальні випробування деталей з розробленим градієнтним покриттям на жаростійкість й підтверджено працездатність деталей в умовах впливу високих температур. Автором показано економічну доцільність від впровадження у виробництво розроблених технологій, котрі дозволили більш раціонально використовувати й принести економічний ефект у 3 млн. грн на рік на 2,5 т сплаву.

Висновки по дисертації базуються на викладених результатах власних досліджень і літературних джерелах, та дають необхідне уявлення щодо змісту роботи та виконання поставлених в ній завдань.

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

Основні наукові положення та висновки дисертаційної роботи мають теоретичні та експериментальні підтвердження. Отримані результати не мають протиріч з існуючими теоретичними знаннями та накопиченим досвідом. Наукові положення, висновки та рекомендації узгоджуються з існуючими концепціями.

Достовірність результатів досліджень.

Достовірність наукових положень, висока точність експериментальних результатів, рекомендацій та висновків дисертаційної роботи забезпечено використанням сучасного обладнання науково-дослідних лабораторій,

використанням методів вивчення структури та фазового складу досліджуваних у роботі матеріалів, адекватною інтерпретацією одержаних експериментальних результатів, що узгоджуються з існуючими теоретичними даними в галузі матеріалознавства.

Наукова новизна одержаних 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 результатів роботи полягає в розробці технології комплексного легування зливків жаростійкого сплаву системи Ni-Cr-Al для методу ВДП, з оптимізованим модифікуючим комплексом Y+Hf+La та розробці технології отримання комплексного градієнтного жаростійкого покриття на трактових поверхнях робочих лопаток турбіни.

Впровадження результатів роботи.

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».

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

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.

Особистий внесок здобувача щодо публікацій, написаних у співавторстві відзначено в дисертації. Указані публікації, в цілому, відображають основний зміст дисертації, об'єм і характер проведених теоретичних і практичних досліджень. Аналіз друкованих праць дає підставу вважати, що наукові положення, висновки та рекомендації, які викладено в дисертаційній роботі, повністю висвітлено в наукових працях.

Загальні зауваження щодо змісту дисертації.

1. У дисертаційній роботі автор часто не дотримується узгодженості у використанні термінології. Так із назви дисертації «Удосконалення технології виготовлення литих катодів з нікелевого сплаву для нанесення жаростійких покриттів на лопатки авіадвигунів» стає зрозуміло, що мова йтиметься про катода, в той же час, окрім терміну «катод», автором для тих же заготовок застосовуються терміни «зливки катода» або «зливки».
2. Розглядаючи процес виготовлення катодів різними методами (Розділ 1), автор обмежується описом лише широко вживаних металургійних процесів для одержання саме зливків, а одержанню катодів цими методами не приділено достатньої уваги. Крім того, у меті роботи йдеться

мова про отримання катодів нової геометрії, в той же час практично не наводиться даних стосовно катодів, які вже використовуються та їх недоліки.

3. В дисертаційній роботі не обґрунтовано вибір ВДГП, тож нема порівняння із катодами, отриманими за допомогою інших способів.
4. З розділу 3 не зрозуміло, у якому вигляді та як вводили модифікатори Y, Hf, La, адже це є дуже важливою складовою технології, що пропонується.
5. Оскільки розроблені технології формують відмінний від основи матеріалу шар структури, то окрім випробування на жаростійкість бажано було б провести випробування на міцність зчеплення покриття з основою, оскільки лопатки працюють зокрема й в умовах складнонапруженого стану, а на це в значній мірі впливає на стан поверхні лопаток.
6. З розділу 5 (стор. 126) не зрозуміло, у чому полягають встановлені закономірності впливу геометричних характеристик катодів на технологію нанесення градієнтного покриття.
7. Щодо оформлення роботи є певні недоліки:
 - перелік умовних скорочень (стор. 31) необхідно було навести у відповідному розділі, а не після таблиці;
 - за текстом роботи зустрічаються термінологічні та стилістичні недоречності (наприклад замість ЕПП зустрічається ЕЛП (стор. 114, табл.4.3 та стор. 115, табл. 4.4));
 - певні півтори є в посиланнях на літературні джерела, наприклад №№ 21 та 29, 26 та 28.

Однак відзначені недоліки та зауваження не знижують загального високого рівня роботи та цінності отриманих результатів.

Загальні висновки.

У цілому дисертаційна робота Єфанова Володимира Сергійовича «Удосконалення технології виготовлення литих катодів з нікелевого сплаву для нанесення жаростійких покриттів на лопатки авіадвигунів» за своїм змістом та напрямом досліджень, становить собою самостійну завершену наукову працю та відповідає паспорту спеціальності 136 – Металургія.

Указані зауваження не мають вирішального значення щодо формулювання наукової новизни та практичної цінності роботи й не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи Єфанова В.С.

Дисертація містить науково обґрунтований великий та якісний експериментальний матеріал і, також, достовірні, суттєві та чітко сформульовані висновки, які в сукупності можуть бути охарактеризовані як успішне вирішення наукової й практичної металургійної проблеми. Дисертація відповідає вимогам передбаченим пунктом 9, 10, 11 «Тимчасового порядку присудження ступеня доктора філософії», затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 р. №167, а її автор Єфанов Володимир Сергійович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 136 – Металургія.

Офіційний опонент:

Старший науковий співробітник,
кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник відділу №30
«Металургія та зварювання титанових сплавів»
ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

 В.О. Березос

Підпис с.н.с., к.т.н. В.О. Березоса засвідчую

