

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу
Чигілейчика Сергія Леонідовича
на тему «**Забезпечення механічних властивостей об'ємних виробів із жароміцних нікелевих сплавів, отриманих адитивним мікроплазмовим наплавленням для виробництва деталей авіаційних двигунів**»,
представлену на здобуття наукового ступеня
доктора філософії в галузі знань
13 Механічна інженерія
за спеціальністю **132 Матеріалознавство**

Актуальність теми дисертації

У межах сучасного виробництва авіаційної техніки, зокрема вузлів гарячого тракту газотурбінних двигунів (ГТД) – соплових апаратів, жарових труб, камер згоряння – критичною є не лише геометрична точність або хімічна стійкість матеріалу, а насамперед гарантії механічної надійності за умов екстремальних термічних та силових навантажень. Використання жароміцних нікелевих сплавів є промисловим стандартом, однак їх обробка традиційними методами (лиття, кування) має обмеження, зокрема високу трудомісткість, витрати матеріалу та низький коефіцієнт використання.

На цьому фоні актуальність вибору адитивного мікроплазмового порошкового наплавлення як досліджуваного процесу цілком обґрунтована. Метод дозволяє створювати об'ємні деталі з високим коефіцієнтом використання матеріалу, зменшуючи відходи, а також здійснювати локальний ремонт дороговартісних компонентів авіадвигунів, що вже були в експлуатації.

Особливу цінність має зосередження автора на впливі параметрів порошкових матеріалів (фракційний склад, вміст активних газів, газова пористість тощо) на формування структури та міцнісних характеристик зварювальних валиків. Вперше у вітчизняній практиці, як показано в дисертації, встановлено критичні межі вмісту кисню ($O \leq 0,02 \%$) та азоту ($N \leq 0,03 \%$) в порошках на основі сплаву ЕП648ВІ, що дозволяє уникнути гарячих тріщин та забезпечити стабільні механічні характеристики виробу.

Крім того, важливим з точки зору впровадження результатів у серійне виробництво є використання числового моделювання термодетформаційного стану за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) для визначення оптимальної траєкторії наплавлення (типу «змійка» проти «зигзаг»). Такий підхід не лише додає глибини дослідженню, а й забезпечує можливість практичного застосування розробленої технології у промисловості.

Таким чином, тема дисертаційної роботи є актуальною як з наукової, так і з прикладної точок зору. Вона полягає в поєднанні трьох взаємопов'язаних факторів – стрімкого розвитку адитивних технологій у галузі машинобудування, зокрема у виробництві авіаційних двигунів, потреби в підвищенні технологічної ефективності виготовлення деталей зі складними контурами, а також недостатньої кількості науково обґрунтованих методів

забезпечення механічних властивостей виробів, створених методом мікроплазмового порошкового наплавлення. Актуальність роботи відповідає світовим тенденціям заміни традиційних технологій на більш ефективні та екологічно обґрунтовані, а також сприяє підвищенню надійності та економічності продукції авіаційного призначення.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

У дисертації Чигілейчика С.Л. наведено повний цикл дослідження, що охоплює весь технологічний ланцюг адитивного вирощування зразків зі сплавів ЕП648ВИ і ВЖ98ВИ — від аналізу якості порошкових матеріалів до промислового впровадження технології. Автор послідовно і логічно структурує дослідження. Зокрема здійснено детальний аналіз впливу фракційного, хімічного складу порошків (зокрема вмісту активних газів: кисню та азоту) на структуру і дефекти наплавленого металу. На базі скінченно-елементного аналізу застосовано методики термомеханічного числового моделювання яке підкріплено серією натурних експериментів із вирощування зразків, проведено комплексні металографічні та механічні випробування (включаючи визначення напружено-деформованого стану та мікроструктури). Апробацію результатів здійснено у реальних виробничих умовах на підприємствах авіаційного двигунобудування.

Таким чином, усі результати дисертаційної роботи мають високу ступінь обґрунтованості завдяки системному підходу, повторюваності результатів у різних серіях експериментів та поєднанню теоретичного і прикладного аналізу.

Достовірність результатів підтверджується:

- узгодженістю результатів експериментальних досліджень із даними числового моделювання (у тому числі температурних полів і деформацій при різних траєкторіях наплавлення);

- використанням статистично значущої вибірки зразків, вирощених при різних режимах і на різних порошках, що дозволяє зробити об'єктивні висновки;

- незалежною верифікацією ефективності розроблених технологій у виробничих умовах (АТ «Мотор Січ», АТ «Івченко-Прогрес»), що підтверджено актами впровадження (Додатки А–В);

- наявністю публікацій у фахових виданнях, зокрема у міжнародному журналі, індексованому в базі Scopus, що свідчить про зовнішню експертну оцінку результатів дослідження.

У роботі чітко вказано особистий внесок здобувача, що додає прозорості та достовірності отриманим науковим даним.

У дисертаційній роботі отримано низку науково нових результатів, які мають істотне значення для подальшого розвитку адитивного виробництва в галузі матеріалознавства. Зокрема:

- уперше встановлено критичні межі вмісту азоту та кисню в порошках жароміцного сплаву ЕП648ВИ ($[N] \leq 0,03 \%$, $[O] \leq 0,02 \%$), за якими

забезпечується прийнятний рівень деформативності та виключається утворення гарячих тріщин;

- уперше обґрунтовано вплив технологічної траєкторії наплавлення (типу «змійка» проти «зигзаг») на формування термополів, які безпосередньо впливають на наявність несплавлень і, відповідно, на міцність виробу;

- запропоновано та верифіковано методику числового моделювання напружено-деформованого стану із використанням розроблених скінченно-елементних моделей, що враховують траєкторію, термохарактеристики матеріалів та умови тепловкладення;

- розроблено і впроваджено на підприємствах нові технології 3D-друку заготовок для складних вузлів авіаційних двигунів, що раніше виготовлялися лише литтям або куванням.

Наукові результати дисертаційної роботи Сергія Леонідовича Чигілейчика є обґрунтованими, достовірними та мають беззаперечну наукову новизну. Вони базуються на системному підході до вирішення актуального інженерного завдання і становлять цінний внесок у розвиток вітчизняного та світового досвіду в сфері адитивного виробництва жароміцних компонентів для авіаційної техніки.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

Зміст дисертації є логічно структурованим, технічно наповненим та тематично цілісним. Робота охоплює повний інженерно-науковий цикл – від постановки проблеми до дослідної реалізації розроблених технологій на виробництві. Структура побудована за класичною моделлю технічної дисертації:

У вступі чітко сформульовано мету, об'єкт і предмет дослідження, завдання, методи досліджень та обґрунтовано актуальність.

Розділ 1 подає ґрунтовний огляд літератури з аналізом існуючих підходів до адитивного вирощування жароміцних сплавів. Зокрема розглянуто: види дефектів у наплавленому металі (тріщини, пори); вплив мікроструктури, траєкторій наплавлення, хімічного складу порошків на механічні властивості; технологічні особливості деталей ГТД.

Розділи 2 і 3 демонструють методичну якість експериментів – охоплюють як технологічну базу наплавлення, так і обробку результатів випробувань.

Зокрема в розділі 2 наведено методики оцінки якості порошків (фракційний аналіз, вміст активних газів, мікроструктура); технологія вирощування зразків методом МПН; методика механічних і металографічних випробувань та математична основа моделювання напружено-деформованого стану.

Розділ 3 описує порівняльний аналіз порошків, отриманих газовою та плазмовою відцентровою атомізацією.

Дослідження, що наведені в розділі дозволили встановити критичні рівні вмісту кисню та азоту, зв'язки між типом дефектів у порошку і руйнуванням

зразків та межі, за яких зразки зазнають крихкого руйнування або утворення гарячих тріщин. На базі проведених досліджень обґрунтовано технічні вимоги до порошкових матеріалів.

Розділ 4 акцентовано на механіко-термічному моделюванні, що додає глибини та інженерної строгості роботі.

Розділ 5 свідчить про прикладну спрямованість роботи: наведено конкретні приклади промислового впровадження, технологічні схеми, економічні ефекти.

В цілому, зміст дисертації відповідає обсягу і вимогам до кваліфікаційних наукових праць: 204 сторінки основного тексту, 28 таблиць, 93 ілюстрації та 129 джерел. Усі розділи гармонійно взаємодоповнюють один одного та логічно ведуть до висновків.

Слід зазначити, що дисертація має високий ступінь завершеності, що підтверджується:

- досягненням усіх поставлених цілей і завдань;
- кількістю проведених повноцінних експериментальних досліджень;
- наявністю сформованих критеріїв придатності порошкових матеріалів;
- розробкою верифікованих числових моделей процесу;
- апробацією розробок на провідних авіаційних підприємствах країни;
- підтвердженням практичним використанням наукової розробки.

Дисертаційна робота не обмежена лабораторними дослідженнями – результати мають рівень промислового впровадження виробництва, що значно підвищує її цінність.

Робота відповідає принципам академічної доброчесності. Так, наявні чіткі посилання на всі використані джерела в огляді літератури, теоретичних положеннях і в аналітичній частині. У вступі та анотації заявлено, що результати дослідження є власними, а ідеї інших авторів наводяться з відповідними посиланнями. У співавторських публікаціях розмежовано особистий внесок здобувача, що повністю відповідає вимогам до етики наукової праці. Верифікація результатів здійснювалась через апробацію на конференціях, публікації у фахових виданнях та Scopus-індексованому журналі свідчить про відкритість результатів до незалежної експертної оцінки.

Відсутні ознаки порушення норм щодо плагіату, маніпуляцій з результатами або фальсифікації даних. Дисертація містить усі необхідні атрибути самостійного й доброчесного наукового дослідження.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота написана українською мовою. Мова дисертації є науковою, технічно точною, лаконічною і стилістично витриманою.

Автор дотримується усіх вимог академічного письма. Про що зокрема свідчать коректне вживання термінів у відповідності до сучасної матеріалознавчої і технологічної номенклатури. Текст містить належне чергування теоретичних викладок, математичних формалізацій та опису практичних досліджень. Побудова речень чітка, без надмірної складності або

зайвого описання. Висновки та узагальнення сформульовані логічно та впливають із наведених даних, таблиць і графіків.

Автор дотепно поєднує аналітичний стиль викладу з інженерним мисленням, використовуючи графіки, моделі, експериментальні таблиці й числові приклади для обґрунтування своїх висновків. Технічна термінологія (наприклад, «коефіцієнт використання матеріалу», «залишкові напруження», «зони несплавлення», «гарячі тріщини», «скінченно-елементна модель») вживається коректно і доречно. Стиль письма виражено об'єктивний, без декларативних тверджень або непідтверджених припущень.

Кожен розділ дисертації виконує свою функцію у структурі дослідження, надаючи читачеві чітке уявлення про хід, логіку та результативність наукової роботи.

Загалом дисертація справляє враження завершеної, глибокої, технічно грамотної кваліфікаційної праці, виконаної на високому науковому рівні.

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Відповідно до вимог до оформлення дисертаційної роботи на здобуття ступеня доктора філософії, результати дослідження було широко апробовано та оприлюднено в рецензованих наукових виданнях і на конференціях, що забезпечує їхню публічність і відповідність принципам наукової комунікації.

За темою дисертації опубліковано 14 наукових праць, з них 6 статей у фахових наукових виданнях, включених до переліку МОН України та 2 наукові статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science та/або Scopus,— у співавторстві із зазначенням особистого внеску здобувача.

Представлення результатів дослідження відбувалося на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях, а також інших спеціалізованих наукових заходах у галузі матеріалознавства, авіаційного машинобудування та адитивного виробництва. У межах цих заходів було оприлюднено 6 тез доповідей.

Окрім академічного оприлюднення, дисертаційна робота має практичну апробацію на промисловому рівні. Розроблені технології та методики були впроваджені на підприємствах АТ «Мотор Січ» та АТ «Івченко-Прогрес», що підтверджено відповідними актами впровадження (додатки А–В до дисертації), зокрема: при ремонті кожуха соплового апарата двигуна Д-18Т та при виготовленні жарових кілець для двигунів AI-450 і AI-222.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

Попри загалом достатній рівень виконання дисертаційної роботи, її завершеність, практичну спрямованість та значну наукову новизну, доцільно вказати окремі недоліки та побажання, що не знижують її загального позитивного враження, але можуть бути враховані у подальших дослідженнях:

1. У дисертації основна увага зосереджена на сплаві ЕП648ВІ (та частково ВЖ98ВІ), які є типовими для авіаційної галузі, однак не охоплено ширшого спектра жароміцних нікелевих сплавів, зокрема новітніх

модифікованих систем з добавками Al, Hf, Re, що використовуються у турбінах останніх поколінь.

2. У дисертації належним чином досліджено механічні властивості в початковому стані, однак не охоплено аналізу довготривалої термостійкості, повзучості та опору циклічним навантаженням, що є критичним для гарячих зон авіаційних двигунів.

3. У роботі не приділено уваги потенціалу екологічної переваги адитивного мікроплазмового наплавлення над традиційними технологіями в контексті ресурсозбереження, викидів CO₂, або утилізації порошків.

4. У деяких місцях роботи трапляються повторення окремих фраз або надмірно довгі речення, що частково ускладнює їх сприйняття.

5. Список літератури потребує уніфікації стилю оформлення джерел зокрема наявний різний підхід до подання назв журналів.

Слід зазначити, що наведені зауваження мають переважно методичний, пояснювальний або редакційний характер і не знижують наукової цінності, завершеності чи обґрунтованості дисертаційної роботи. Вони можуть бути корисними орієнтирами для подальшої наукової діяльності здобувача у сфері адитивного матеріалознавства та технологій машинобудування.

Висновок про дисертаційну роботу.

Дисертаційна робота Чигілейчика Сергія Леонідовича присвячена вирішенню актуального науково-технічного завдання – забезпечення належного рівня механічних властивостей об'ємних виробів із жароміцних нікелевих сплавів, виготовлених методом адитивного мікроплазмового порошкового наплавлення, для застосування у вузлах авіаційних газотурбінних двигунів.

У роботі автором реалізовано повний цикл фундаментальних і прикладних досліджень, що охоплює:

- системний аналіз впливу складу, дефектності та структури порошкових матеріалів на якість сформованих виробів;
- моделювання термонапружених станів у процесі пошарового наплавлення з урахуванням геометричних і теплових факторів;
- розроблення технічних вимог до порошкової сировини та критеріїв оцінки придатності траєкторій наплавлення;
- дослідно-промислову перевірку розроблених технологій на підприємствах авіаційного машинобудування України.

Наукова новизна роботи підтверджується вперше встановленими критеріями допустимого вмісту активних газів у порошках, верифікованими числовими моделями теплового процесу, а також запропонованими технологічними схемами, що забезпечують підвищення міцності та відсутність зони несплавлення. Практичне значення підтверджено впровадженням розробок на провідних підприємствах галузі (АТ «Мотор Січ», АТ «Івченко-Прогрес»).

Результати дисертації пройшли апробацію на міжнародних наукових конференціях, оприлюднені в достатній кількості публікацій, включаючи

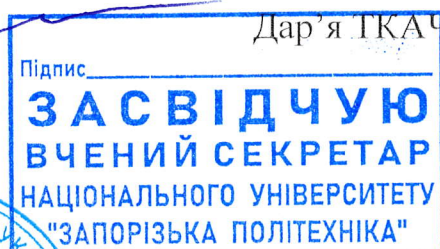
статтю в журналі, що індексується у базі Scopus. В роботі дотримано принципів академічної доброчесності, всі джерела належно процитовано, обсяг і структура роботи повністю відповідають вимогам до кваліфікаційної наукової праці.

Дисертаційна робота є завершеним самостійним науковим дослідженням, що має як фундаментальне значення для подальшого розвитку теорії адитивного матеріалознавства, так і прикладне значення для авіаційного та енергетичного машинобудування.

Таким чином, за змістом, рівнем наукової новизни, обґрунтованістю результатів і практичною цінністю, робота Чигілейчика С.Л. відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 – Матеріалознавство, а її автор заслуговує на присудження цього ступеня.

Рецензент:

канд. техн. наук, доцент кафедри
фізичного матеріалознавства
Національного університету
«Запорізька політехніка»



В. Кузьмін
15.06.25