

ВІДГУК

офіційного опонента 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.

Адитивне виробництво на основі плазмово-дугового порошкового наплавлення (ПДПН) забезпечує суттєве прискорення процесу виготовлення та ремонту металевих виробів, підвищує екологічність та зменшує собівартість продукції за рахунок зменшення кількості відходів. Однак, застосування адитивних плазмово-дугових технологій призводить до формування значних залишкових напружень та деформацій, зменшення геометричної точності та якості поверхонь вирощених деталей. В результаті багаторазової періодичної дії термічного циклу наплавлення зростає схильність наплавленого металу до утворення дефектів структурної будови, а характеристики якості присадного порошку, його фазовий склад, спосіб виготовлення та технологічні параметри і умови реалізації процесу ПДПН чинять визначальний вплив на фізико-механічні характеристики адитивно згенерованих виробів та виникнення зварювальних дефектів в наплавлених шарах. Проблема утворення зварювальних дефектів ускладнюється при наплавленні матеріалів, які володіють незадовільною технологічною здатністю до зварювання. Саме до таких матеріалів і відносяться жароміцні сплави на основі нікелю. Вказані недоліки обмежують можливості використання адитивних дугових технологій для виготовлення елементів конструкцій авіаційних двигунів, а тому потребують всебічного дослідження.

Дисертаційна робота Чигілейчика Сергія Леонідовича розкриває важливу проблему впливу характеристик якості дисперсних матеріалів та параметрів технологічного процесу ПДПН на формування структури та фазовий склад наплавленого металу, утворення дефектів, залишкових напружень та деформацій. Відсутність системного підходу у вирішенні зазначених питань, наявні в літературі суперечливі відомості щодо взаємозв'язку параметрів та умов ведення процесу ПДПН, впливу характеристик присадних матеріалів на формування, структурну будову та властивості отриманих наплавленням виробів підкреслює актуальність теми дисертаційної роботи, яка має значний науковий та практичний інтерес.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає у встановленні закономірності впливу характеристик порошків жароміцних нікелевих сплавів, умов їх плазмово-дугового наплавлення з використанням тепла мікроплазми на формування структури, схильність до утворення дефектів

та фізико-механічні властивості адитивно наплавленого металу, створенні на цій основі технології адитивного виробництва просторових заготовок деталей авіаційних двигунів плазово-дуговим порошковим наплавленням, зокрема:

1. На прикладі сплаву ЭП648ВИ вперше встановлено, що застосування порошків, отриманих шляхом газового розпилення розплаву інертним газом для адитивного ПДПН, у порівнянні з порошками, які виготовлені методом відцентрового плазового розпилення циліндричних заготовок, призводить до значного зниження характеристик міцності та пластичності матеріалу. Це зумовлено наявністю внутрішньої аргонової пористості в порошках, які отримані газовим розпиленням, і спричиняє формування лінійних зон скупчення пор завдовжки приблизно 2–3 мм та виникнення тріщин під час процесу генерування виробу.

2. Вперше встановлено, що при вмісті азоту більше за 0,03 % ваг. або кисню більше за 0,02 % ваг. в порошку зі сплаву ЭП-648ВИ спостерігається суттєве зменшення деформаційної здатності наплавленого металу ($\epsilon \leq 3,8\%$) при температурі 1100 °С, що сприяє утворенню гарячих тріщин під дією термічних напружень, анізотропії фізико-механічних властивостей та суттєвому погіршенню характеристик міцності і пластичності.

3. Уперше встановлено, що для забезпечення необхідних вимог щодо механічних властивостей деталей соплових апаратів, жарових труб та камер згоряння авіаційних двигунів максимальний вміст азоту або кисню в порошку зі сплаву ЭП-648ВИ при ПДПН має бути менше за 0,03 % ваг. та 0,02 % ваг. відповідно.

4. На основі результатів моделювання теплових та термодформаційних процесів при адитивному ПДПН вперше для побудови об'ємних зразків запропонована оптимальна технологічна траєкторія типу «змійка», яка сприяє підвищенню рівномірності розподілу температур при наплавленні шарів та надійності сплавлення валиків по перерізу заготовки, що формується.

5. Вперше встановлено, що при побудові методом ПДПН за траєкторією «зигзаг» об'ємних виробів із порошку сплаву ЭП-648ВИ у поздовжньому напрямку спостерігається більш ніж дворазове зменшення міцності при мінімальній пластичності. Метал адитивно наплавлених за траєкторією «змійка» зразків демонструє високі фізико-механічні властивості, які відповідають діючим нормативним документам щодо вимог до матеріалів деталей гарячого тракту газотурбінних двигунів.

Наукова новизна отриманих результатів чітко сформульована та зрозуміло викладена, із розкриттям суті. Сформульовані автором роботи положення наукової новизни є обґрунтованими і відповідають поставленим в ній завданням. Теоретичні закономірності та практичні рекомендації підтверджені результатами чисельних експериментальних та розрахункових досліджень, доброю збіжністю результатів отриманих різними методами досліджень. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в фахових наукових виданнях та пройшли апробацію на міжнародних конференціях з матеріалознавства, Міжнародних конгресах виробників авіаційних двигунів.

Поставлене в дисертаційній роботі наукове завдання щодо встановлення закономірностей впливу характеристик порошків жароміцних нікелевих сплавів, умов їх наплавлення на формування структури, схильність до утворення дефектів та фізико-механічні властивості адитивно наплавленого металу, створення технології адитивного виробництва заготовок виробів авіаційних двигунів плазмово-дуговим порошковим наплавленням виконане в повному обсязі. При виконанні експериментальних та теоретичних досліджень здобувач продемонстрував наявність необхідних компетентностей та володіння методологією наукової діяльності повною мірою.

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

Представлена дисертаційна робота Чигілейчика Сергія Леонідовича за своїм змістом повністю відповідає стандарту вищої освіти зі спеціальності 132 Матеріалознавство галузі знань 13 Механічна інженерія та предметній області, що визначена освітньо-науковою програмою підготовки докторів філософії з Матеріалознавства.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, наведені результати та висновки свідчать про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «Створення нових матеріалів та визначення їх властивостей».

За результатами розгляду звіту подібності та перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння можна зробити висновок, що дисертаційна робота Чигілейчика Сергія Леонідовича є результатом самостійних наукових досліджень здобувача. Робота не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату, запозичень або несанкціонованого використання здобувачем результатів інших авторів. Використані здобувачем ідеї, результати та тексти інших авторів мають належні посилання на відповідні джерела.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота Чигілейчика Сергія Леонідовича написана українською мовою. Наведені в дисертаційній роботі відомості та представлені дисертантом результати досліджень логічно розподілені на окремі розділи. Структура дисертаційної роботи забезпечує можливість чітко зрозуміти послідовність етапів виконання досліджень. Наведений графічний матеріал, представлений власними фотографіями, графіками і діаграмами у повній мірі відображає результати експериментальних і розрахункових досліджень. Сутність дисертаційної роботи представлена послідовно з використанням загальноприйнятої технічної термінології, що сприяє повному розумінню наведених результатів досліджень.

Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку опрацьованої літератури і 3 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 204 сторінки, зокрема вона має 183 сторінки основного тексту, 100 рисунків, 32 таблиці, 3 додатків, перелік використаних літературних джерел із 129 бібліографічних найменувань.

У вступі наведене обґрунтування актуальності теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та задачі досліджень, а також об'єкт і предмет дослідження,

наведені відомості щодо методів досліджень, які застосовані здобувачем при виконанні роботи, сформульовані наукова новизна та практичне значення результатів дослідження, визначений особистий внесок здобувача, наведені відомості про апробацію, публікації, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі визначена актуальність роботи, наведені результати аналізу особливостей та проблем, що пов'язані з адитивним виробництвом заготовок з жароміцних сплавів. Розкрита проблема утворення дефектів при адитивному наплавленні. Проведений аналіз впливу структурної будови наплавленого металу, характеристик присадного порошку, параметрів процесу ПДПН на властивості виробів.

На основі проведеного ретельного аналізу наявних відомостей, автором визначені мета і задачі досліджень.

У другому розділі наведений опис застосованих стандартизованих та розроблених автором методик досліджень, характеристики обраних матеріалів і технологічного обладнання для їх реалізації. Для досягнення мети та вирішення поставлених у роботі завдань запропонована методика побудови та дослідження зразків. Крім того, автором описана методика комп'ютерного моделювання компонент напружено-деформованого стану виробів наплавлених плазмодуговим способом з порошкових матеріалів.

Третій розділ дисертації присвячений аналізу впливу якості порошків, що отримані різними способами розпилення, їх геометричної форми, структурної будови та вмісту в них активних газів на формування виробів. Визначені структурна будова, фазовий склад, фізико-механічні властивості наплавленого металу. Встановлений взаємозв'язок між властивостями порошків, умовами ПДПН та схильністю до утворення дефектів, їх характером. Для заліковування мікротріщин в наплавлених заготовках з жароміцного сплаву рекомендовано застосовувати додаткову обробку методом гарячого ізостатичного пресування (ГІП). Показано, що оброблені методом ГІП заготовки демонструють суттєве підвищення рівня фізико-механічних властивостей.

Четвертий розділ дисертації присвячено поглибленому аналізу термодформаційних процесів під впливом тепла джерела нагріву присадного порошку – плазмової-дуги (мікроплазми). Наведені скінчено-елементні моделі дослідних виробів, запропоновані автором траєкторії наплавлення, хімічний склад та властивості жароміцного сплаву, який використаний в якості модельного матеріалу. Представлена модель джерела тепла, яка адекватно описує особливості теплового впливу джерела нагріву. Здійснений комплексний порівняльний аналіз параметрів та компонент залишкового напружено-деформованого стану (НДС) при наплавленні за різними стратегіями, на основі якого визначено вплив компонент НДС на схильність до утворення тріщин. Результати підтверджені експериментальними даними.

У п'ятому розділі наведені приклади промислового використання результатів роботи як при виготовленні, так і при ремонті елементів авіаційних двигунів на підприємствах АТ «Мотор Січ» та АТ «Івченко-Прогрес». За результатами досліджень запропоновані технологічні параметри процесу ПДПН заготовок деталей гарячого тракту турбіни авіаційного призначення, їх

термообробки. Запропоновані технології зварювання окремих елементів. Ефективність запропонованих технологій підтверджена результатами досліджень мікроструктури та фізико-механічних властивостей металу заготовок деталей з жароміцних сплавів на основі нікелю. Розробки здобувача підтверджені Актами впровадження, які наведені в додатках роботи.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. №40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Наукові результати дисертаційної роботи висвітлені у 14 наукових публікаціях здобувача, зокрема в 8 статтях у наукових виданнях, що включені до переліку наукових фахових видань України, з яких 1 стаття у періодичному науковому виданні, яке індексується у міжнародних наукометричних базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus. Результати дисертації пройшли апробацію на 3 міжнародних наукових фахових конференціях та конгресах.

При підготовці дисертації автор дотримувався принципів академічної доброчесності. Публікації здобувача мають достовірну наукову базу та є результатом самостійних досліджень. Наукові положення та висновки дисертації, що виносяться на захист, належать здобувачу і повністю висвітлені у його наукових публікаціях.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. Робота має деякі неточності в застосуванні термінів та помилки, наприклад, на стор. 5 «...термічних напруг...»; на стор. 31 «...високої напруги...»; на стор. 33 «...швидкість охолодження може досягати 106 К/с...»; на стор. 35 «...залишкова напруга перевершує межу міцності матеріалу при розтягуванні...»; на стор. 38 «...відсутність канавок сплавлення...»; на стор. 41 хибне посилання на рис. 2, який відсутній в роботі; на стор. 52 «...крапель електронного металу...» та «...теплової міцності дуги...»; на стор. 54 «...теплова міцність...»; на стор. 71 «...отримання присадного порошку розпорошенням литої заготовки...»; на стор. 77 «...несплошностей...»; в табл. 3.3 порівнювані величини наведені в різних одиницях виміру (МПа та кгс/мм²) та ін., хоча в цілому написана грамотно, логічно та зрозуміло.

2. Наведені у Вступі методи досліджень мікроструктурної та фазової будови матеріалів, фізико-механічних випробувань було б бажано конкретизувати, хоча відомості щодо них наведені в окремих розділах роботи.

3. Наведений в розділі 1 аналіз впливу дифузійних процесів та умов кристалізації на властивості жароміцних сплавів на основі нікелю можна було б скоротити, оскільки ці питання в подальшому не досліджуються в роботі. Ретельний розгляд загальновідомих понять про формування компонент НДС (підрозділ 4.1.1) теж виглядає зайвим. Тут краще було б навести пояснення, чому в якості модельного сплаву використаного для розрахунків компонент НДС методом скінчених елементів обраний саме жароміцний сплав Inconel 718.

4. На стор. 40 автор стверджує, що «Зниження показників теплопровідності й температурного коефіцієнту лінійного розширення матеріалу призводить до підвищення рівня міжатомного зв'язку і утворення внутрішньої напруги» бажано було б додатково пояснити.

5. Наведений на стор. 46 вислів автора: «У мікроструктурах із сильною кристалографічною текстурою нетекстуровані зерна...» було б бажано пояснити.

6. Не зрозуміло, яким чином «Вивчення мікроструктури дозволяє отримати важливу інформацію про динаміку процесу усадки...», про що йдеться у висновку 5 по 1 розділу.

7. Бажано пояснити, чому «Наявність неметалевих включень і забруднень у порошках визначали шляхом зовнішнього огляду без застосування збільшувальних приборів.» про що йдеться на стор. 62. Чому була обрана саме така методика? Також бажано пояснити, чому при дослідженні зразків (схема на стор. 63) тривалу міцність визначали за температури 450 °С, а короткострокову за 800 °С.

8. Слід відзначити, що згідно класифікації процесів зварювання, наведеної в науковій літературі різними дослідниками, перехід від мікроплазмового до плазмово-дугового процесів визначається величиною електричного струму плазмової дуги і різні автори наводять значення в 20 А або 50 А. При цьому, в табл. 2.1 «Режими наплавлення» автор вказує величину струму від 55 до 60 А.

9. На стор. 79, спираючись на джерело літератури [61], автор вказує, що «Водночас слід зауважити, що у стовпі мікроплазмової дуги на струмі до 60 А нагрів до температури плавлення $T_{пл}$ усіх часток розміром 63...160 мкм є малоімовірним». Бажано пояснити, в якому стані (розплавленому або твердому) на думку здобувача мають потрапляти в зварювальну ванну частинки порошку при ПДПН жароміцного сплаву.

Однак, наведені зауваження не є визначальними та не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів роботи, не впливають на загальну позитивну оцінку представленої дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що представлена дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Чигілейчика Сергія Леонідовича на тему «Забезпечення механічних властивостей об'ємних виробів із жароміцних нікелевих сплавів, отриманих адитивним мікроплазмовим наплавленням для виробництва деталей авіаційних двигунів» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 13 Механічна інженерія. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про

присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Чигілейчик Сергій Леонідович повною мірою заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 132 – Матеріалознавство.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри зварювального виробництва
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»



Віктор КВАСНИЦЬКИЙ

Підпис офіційного опонента завідувача кафедри зварювального виробництва Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доктора технічних наук, професора Квасницького Віктора Вячеславовича засвідчую

Фахівець ВК



Світлана ПРОНЧАКОВА