

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 авіаційних двигунів»,**

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 13 – Механічна інженерія

за спеціальністю 132 – Матеріалознавство

Актуальність теми дисертації.

Адитивне виробництво є наразі одною із передових технологій, що розвивається у світі і має широкі перспективи щодо застосування. На відміну від традиційних видів промислових механічних обробок адитивні технології базуються на інших підходах до виготовлення виробів, а саме пошаровому додаванні та затвердінні вихідних матеріалів для формування деталей складної форми. З економічної точки зору адитивні технології дозволяють значно знизити витрати на виготовлення деталей та вузлів.

Адитивне виробництво мікроплазмовим наплавленням має важливе застосування для аерокосмічних матеріалів, зокрема для сплавів на основі нікелю. Сплав ЕП-648 ВІ, що обраний для дослідження є важливими високотехнологічними металевим матеріалом і активно використовується в промисловості завдяки своїм властивостям жароміцності та жаростійкості. Для впровадження в серійне виробництво деталей із обраного сплаву з використанням адитивних технологій головною умовою є високий рівень фізико-механічних і службових властивостей, які не поступаються заготовкам, отриманим методами лиття та кування. Тому актуальним є визначення рівня фізико-механічних властивостей заготовок, вироблених методом мікроплазмового порошкового наплавлення (МПН), а також розроблення конструктивних, металургійних та технологічних підходів, що спрямовані на підвищення міцності та службових характеристик. Для цього потрібно розробити оціночні критерії та створити на їх основі методики, за якими можна прогнозувати рівень властивостей залежно від різних конструктивних металургійних і технологічних факторів.

Отримання якісних виробів методом МПН неможливе без оцінювання присадного матеріалу порошку. Тому актуальними є результати вивчення впливу фракційного, хімічного складу, зокрема на вміст кисню та азоту, наявність дефектів (газової пористості) в присадних порошках із жаростійких сплавів на особливості формування структури й механічних властивостей наплавленого металу. Отримані результати дозволили розробити технічні вимоги до порошкових матеріалів, що використовуються для адитивного МПН.

Про актуальність представленої роботи свідчить впровадження результатів роботи у виробництво на підприємствах АТ «Мотор Січ» та АТ «Івченко-Прогрес» як при ремонті, так і при виготовленні нових заготовок. Зокрема під час ремонту кожуха соплового апарата (СА) двигуна Д18Т (акт упровадження – дивитись додаток 1), при виготовленні заготовок кільця зовнішнього жарової труби ХН60ВТ-ВІ у складі двигуна АІ-450 (акт упровадження

– дивитись додаток 2) та кільця зі сплаву ХН50ВМТЮБ-ВИ, що входить до складу турбіни двигуна АІ-222 (акт упровадження – дивитись додаток 3).

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

-отримано подальший розвиток уявлення про вплив способу виготовлення та параметрів порошків із жаростійких сплавів на фізико-механічні властивості наплавлених методом МПН зразків на прикладі сплаву ЕП-648 ВИ. Уперше встановлено, що в порошок зі сплаву ЕП-648 ВИ при вмісті азоту в кількості $[N] \geq 0,03$ ваг. % або кисню $[O] \geq 0,02$ ваг. % у наплавленому металі при температурі 1100°C фіксується значне зниження його деформаційної здатності ($\epsilon \leq 3,8$ %), що під впливом термічних напружень призводить до виникнення гарячих тріщин. Внаслідок у поздовжньому напрямі має місце значне падіння властивостей міцності та пластичності. Тобто критерієм максимального вмісту азоту та кисню в порошок зі сплаву ЕП-648 ВИ, який використовують для адитивного МПН, з погляду забезпечення необхідних вимог до механічних властивостей деталей соплових апаратів, жарових труб та камер згоряння авіаційних двигунів є вміст $[N] \leq 0,03$ ваг. %, або кисню у $[O] \leq 0,02$ ваг. %.

-на основі отриманих результатів моделювання теплових процесів та параметрів напружено-деформованого стану під час адитивного МПН вперше запропонована оптимальна технологічна схема вирощування об'ємних зразків за траєкторією «змійка», яка за рахунок рівномірного розподілу температур по всіх шарах забезпечує гарантоване сплавлення між валиками по всьому перерізу вирощеної заготовки. При цьому механічні властивості зразків, одержаних за траєкторією «змійка», мають достатньо високий рівень і відповідають вимогам до матеріалів деталей гарячого тракту газотурбінних двигунів на відміну від об'ємних виробів із порошку сплаву ЕП-648 ВИ, що отримані адитивним МПН за траєкторією «зигзаг», де у поздовжньому напрямі спостерігається більш ніж удвічі падіння властивостей міцності (що значно поступається технічним вимогам до поковок та лиття), а властивості пластичності практично відсутні.

Про достовірність результатів свідчить впровадження технологій що досліджені у виробництво. Результати роботи С. Чигілейчика впроваджені в виробництва у вигляді уточнення на конструкторську ремонтну документацію. Економічний ефект складає 139 тис. грн від впровадження технології ремонту кожуха СА двигуна Д-18 прямим вирощуванням стінки методом мікроплазмового наплавлення порошком ЕП-648 ВИ. Випущена модифікація креслення деталі із заготовок кільця зовнішнього жарової труби зі сплаву ХН60ВТ-ВИ у складі двигуна АІ-450, що вирощені методом МПН з економічним ефектом 135 тис. грн. Випущена модифікація креслення деталі із заготовки, що вирощена методом МПН кільця зі сплаву ХН50ВМТЮБ-ВИ, що входить до складу турбіни двигуна АІ-222 з економічним ефектом 143 тис. грн.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене науково-технічне завдання виконане повністю, а здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

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

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Чигілейчика С.Л. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 132 – Матеріалознавство та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми «Матеріалознавство».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, наведені в ній результати та висновки свідчать про наявність особистого внеску здобувача у розвиток наукового напрямку з Матеріалознавства.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Чигілейчика Сергія Леонідовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота написана українською мовою, всі інформаційні матеріали і результати досліджень викладені в логічній послідовності, форма викладення доступна для фахівців з даної тематики, використана термінологія відповідає загальноприйнятій в галузі Механічної інженерії, напрямках механіки суцільного середовища і теорії зварювальних напружень і деформацій.

Дисертація складається зі вступу, п'ятих розділів, загальних висновків, списку літератури і трьох додатків (Актів упровадження науково-дослідних робіт). Загальний обсяг дисертації 204 сторінки машинописного тексту. Робота містить 93 рисунка, 28 таблиць, список літератури із 129 найменувань.

У вступі розкрита і обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та задачі дослідження, які необхідно виконати для досягнення мети роботи, приведені основні методи дослідження, представлені наукова новизна та практична цінність.

У першому розділі роботи наведені результати проведеного аналітичного огляду сучасних уявлень про процес адитивного вирощування заготовок із жароміцних нікелевих сплавів. Проаналізовано стан дефектів наплавленого металу, вірогідності їх виникнення та можливості виправити. Розглянуто структуру наплавки в залежності від якості присадного порошку та параметрів адитивного процесу. Особливу увагу приділено проблемі збереження механічних та експлуатаційних властивостей вирощених заготовок, впливу на них мікроструктури, параметрів процесу вирощування, стану присадного матеріалу. На основі проведеного аналізу сформовано мету та завдання роботи.

У другому розділі представлена методика проведення досліджень.

На початку представлені методики дослідження порошків з жароміцного сплаву на нікелевій основі ХН50ВМТЮБ-ВИ (ЭП-648 ВИ), з якого виконували наплавлення: аналізу хімічного складу, неметалічних включень, металографічного аналізу.

Потім показаний метод вирощування зразків і методики дослідження, включаючи хімічний, металографічний аналізи та оцінювання механічних властивостей.

Окремо показана методика моделювання напружено-деформованого стану при МПН згідно траєкторій «змійка» та «зигзаг».

У третьому розділі розглянуто властивості порошку, що виготовлений трьома різними способами з точки зору доцільності використання при МПН. Оцінено вплив якості порошку на формування структури та механічних властивостей заготовок, що вирощені МПН. Показано обмеженість застосування порошку, отриманого газовою атомізацією холодним струменем інертного газу із-за значного падіння властивостей міцності та пластичності та необхідності використання ГП для забезпечення щільності металу і механічних властивостей. Для визначення впливу активних газів на механічні властивості отриманих заготовок проведено дослідження на порошках різних плавень. Металографічний та фрактографічний аналізи вирощених порошками з різним вмістом газів зразків показали, що вміст у порошку активних газів ([O] та [N]) має суттєвий вплив на тріщиностійкість та механічні властивості отриманих заготовок методом плазмового адитивного вирощування. Показана можливість «заліковування» внутрішніх тріщин у процесі операції ГП.

У четвертому розділі показані результати аналізу термдеформаційних процесів при адитивному МПН жароміцних сплавів. На початку приведені основні поняття про напружено-деформований стан та методика моделювання напружено-деформованого стану з використанням математичного апарату методу скінченних елементів для розв'язання задач про напружено-деформований стан зварних з'єднань. Під час моделювання процесу наплавлення враховували, як хімічний склад матеріалів основи (сталь класу С235) та наплавлених шарів (INCONEL 718) так і зміну теплофізичних і механічних властивостей цих матеріалів під час нагрівання та охолодження. Визначено закономірності керування формою наплавленого валика, обґрунтовано технологічні критерії вибору режимів адитивного багатоплазмового мікроплазмового порошкового наплавлення для адитивних технологій 3D-вирощування.

Для апробації одержаних результатів моделювання виростили 2 зразки з застосуванням коливальних рухів плазмотрона за 2-ма траєкторіями – «змійка» і «зигзаг» із сплаву ЭП-648 ВИ, що є аналогом сплаву INCONEL 718. Результати попереднього моделювання напружено-деформованого стану в комплексі з результатами експерименту показали особливу важливість розрахунку не тільки розподілу і рівні напружень, але особливо температурних полів для отримання вирощених деталей без дефектів.

По результатам дослідження була обрана технологія вирощування по траєкторії «змійка».

У п'ятому розділі, враховуючи закономірності керування формою наплавленого валика, що отримані в розділі 4, обґрунтовано технологічні критерії вибору режимів адитивного багатоплазмового МПН для адитивних технологій 3D-вирощування. При впровадженні у виробництво технології адитивного вирощування методом мікроплазмового наплавлення об'ємних заготовок із нікелевих жаростійких сплавів дібрали оптимальні режими за траєкторією «змійка», що забезпечують належний рівень фізико-механічних властивостей матеріалів деталей гарячого тракту ГТД заготовок соплових апаратів, жарових труб та камер згоряння авіаційних двигунів.

У результаті проведеного комплексу досліджень реальних вирощених зразків методом МПН за технологією, аналогічною до технології вирощування заготовки,

встановлено: хімічний склад та мікроструктура наплавленого металу відповідає нормальному термообробленому стану сплаву ЭП 648 ВИ (ХНВМТЮБ-ВИ); рівень механічних властивостей вирощених зразків з наступною серійною термічною обробкою відповідає вимогам технічних умов.

Впроваджено у виробництво у вигляді: модифікації креслення деталі із заготовки, вирощеної методом мікроплазмового порошкового наплавлення.

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Наукові результати дисертації висвітлені у 8 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 6 статей у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 2 статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, з яких 1 стаття у виданні, віднесеному до третього квартилю (Q3) і 1 стаття у виданні, віднесеному до четвертого квартилю (Q4) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports.

В списку публікацій здобувача на тему дисертації є посилання на всі зазначені вище праці. При підготовці публікацій автор неухильно дотримувався принципів академічної доброчесності. В тексті дисертації зроблені відповідні посилання. У більшості публікацій особистим внеском автора зазначені проведення чисельних розрахунків та аналіз результатів. Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повною мірою висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. Стор. 5. Із п. 1. наукової новизни не дуже зрозуміло який спосіб виготовлення кращий для наплавлених методом МПН зразків на прикладі сплаву ЭП-648 ВИ. Але при прочитанні роботи це становиться зрозумілим.

2. На мою думку в науковій новизні ще могло б бути відмічене, що новизною є числовий аналіз впливу технологічних факторів зокрема і траєкторія вирощування, що може значно скоротити підбір оптимальних режимів виготовлення об'ємних заготовок.

3. Окрім ескізу підкладки для вирощування зразків та схеми наплавлення можна було б дати схему або зовнішній вигляд наплавленого зразка, але це не є помилкою.

4. В роботі вказано, що хімічний склад та мікроструктура наплавленого металу відповідає нормальному термообробленому стану сплаву ЭП-648 ВИ (ХНВМТЮБ-ВИ), але ніде немає поелементного складу, як результату спектрального аналізу наплавки, так і складу сплаву ЭП-648 ВИ, в той час як в гл. 4. дана таблиця з складом сплаву INCONEL 718. Тому в главі 2, наприклад, можна було б такі дані привести

5. В розділі 3 на стор. 80 указано, що мікроструктура наплавки досліджувалась після термообробки, але не вказано режим, в главі 2 вказано, що режимів було 2.

6. На стор. 93 не вірно дане посилання на рисунок з поодинокими раковинами та окисними включеннями розміром до ~77 мкм (рис. 3.14), а треба 3.16.

7. В роботі вказано, що по межах зерен наплавки розміщуються карбиди. Цікаво було б дізнатись склад таких карбідів, тому що склад карбідів відіграє не аби яку роль в міцності меж зерен.

8. В списку опублікованих робіт автора є неточність у вихідних даних видання під номером 3.

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

Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що 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 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, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу №19 «Металургія і технологія зварювання високолегованих сталей і сплавів» Інституту Електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

Ганна ЗВЯГІНЦЕВА

Підпис офіційного опонента провідного наукового співробітника Інституту Електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, доктора технічних наук, старшого наукового співробітника Ганни Віталіївни Звягінцевої засвідчую:

