

ВІДЗИВ

офіційного опонента д.т.н., проф. Квасницького В.В.

на дисертаційну роботу **Матвійчука Владислава Анатолійовича**

«Адитивні електронно-променеві технології виготовлення металевих виробів методом пошарового наплавлення із застосуванням порошкових матеріалів», що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 - Зварювання та споріднені процеси і технології

Дисертаційна робота має загальний обсяг 214 сторінок машинописного тексту, включаючи 108 рисунків, 22 таблиці, і складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків та списку використаних літературних джерел зі 127 найменувань.

Дисертація Матвійчука В.А. присвячена розробці адитивного обладнання, дослідженню впливу технологічних параметрів 3D друку на властивості виробів та створенню технології виготовлення виробів пошаровим електронно-променевим наплавленням металевих порошкових матеріалів.

Актуальність обраної теми дисертації. Сучасною проблематикою розвитку техніки є зменшення металоємності та забезпечення підвищених експлуатаційних та ресурсних показників виробів. Одним зі шляхів вирішення цієї проблеми є застосування технологій 3D друку з металевих порошкових матеріалів в вакуумі з використанням енергії електронного променя. Це надає можливість використання широкого спектру металів і сплавів, зокрема тугоплавких і хімічно активних, що широко застосовуються в транспортному та енергетичному машинобудуванні, авіаційній, космічній, оборонній галузях промисловості, біомедичній інженерії. Термічний цикл та умови формування шарів чинять визначальний вплив на структурні та фазові перетворення сформованого при адитивному наплавленні металу, які визначають комплекс фізико-механічних властивостей, рівень залишкових напружень та деформацій отриманих виробів. Однак, наведені в літературі параметри та умови ведення процесу пошарового синтезу виробів із застосуванням теплової енергії електронного променя обмежені, в наслідок залежності від застосовного обладнання мають суперечливий характер, або алгоритми зміни робочих параметрів процесів наплавлення «защиті» в програмному забезпеченні. Тому дослідження впливу умов і параметрів режимів процесів адитивного наплавлення порошкових матеріалів спрямовані на створення вітчизняних адитивних технологій та устаткування для виготовлення металевих виробів з комплексом високих характеристик якості із застосуванням пошарового електронно-променевого наплавлення є безумовно актуальними, а робота своєчасною.

Про актуальність теми роботи свідчить також її зв'язок з 7 науково-дослідними темами Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, які виконувались в період з 2014 по 2024 роки за безпосередньою участю автора в якості виконавця.

Метою роботи є розроблення обладнання для адитивного синтезу та технології виготовлення виробів методом пошарового електронно-променевого наплавлення зі застосуванням різних типів металевих порошкових матеріалів.

У **вступі** автором обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, визначено задачі досліджень, відзначені наукова новизна та практичне застосування отриманих результатів із наведенням особистого внеску автора.

У **першому розділі** показана перспективність застосування та проведений аналіз сучасного стану адитивного виробництва, визначені його переваги при виготовленні металевих виробів. На основі порівняння технологій вибіркового лазерного сплавлення (SLM) та електронно-променевого наплавлення (EBM) доведена перспективність застосування останньої. Підтверджена актуальність створення вітчизняного обладнання на базі електронно-променевих процесів із застосуванням дисперсних матеріалів.

На основі проведеного аналізу визначені основні напрямки роботи і завдання досліджень.

В **другому розділі** описане створене дослідне устаткування, системне та програмне забезпечення для адитивного електронно-променевого друку (ЕПД) виробів з дисперсних матеріалів.

Керування процесом наплавлення здійснюється зі застосуванням промислового комп'ютера, що взаємодіє з контролерами.

Для спостереження за процесом пошарового синтезу створена система візуалізації ОПК, яка за сигналом вторинної електронної емісії в режимі реального часу відображає на екрані монітору стан поверхні наплавлення.

На основі експериментальних досліджень підтверджений значний вплив магнітного поля Землі на положення електронного променя в процесі селективного наплавлення. Для компенсації негативного впливу магнітного поля Землі створений юстувальний пристрій та розроблені методи корекції положення електронно-променевої гармати. Запропоновані методи калібрування розгортки електронного променя, що сприяє підвищенню геометричної точності положення ділянки нагріву при створенні виробів.

Наведене програмне забезпечення, яке здійснює перетворення спроектованої 3D моделі в послідовність керуючих сигналів регулювання робочих параметрів процесу адитивного наплавлення виробів, з можливістю в режимі реального часу, контролю процесу адитивного друку та корегування технологічних параметрів.

Третій розділ присвячений експериментальному визначенню та аналізу впливу порошків з титанових сплавів BT1-0 та BT20 різної дисперсності, що отримані методом гідрування-дегідрування спеченого напівфабрикату (НДН), на формування структури та властивості наплавленого металу. Встановлено, що несферична форма порошкових матеріалів не має визначального впливу на структуру наплавленого металу, структура в цілому є безпористою, дрібнодисперсною з рівномірним розподілом легуючих елементів по об'єму зразків.

При використанні порошку сплаву BT20 системи легування Ti-Mo-Al-V-Zr спостерігається зменшення вмісту алюмінію за рахунок його випаровування в процесі наплавлення в вакуумі 10^{-2} Па.

В четвертому розділі визначені базові технологічні процеси та послідовність операцій, здійснений аналіз технологічних параметрів процесу 3D друку та їх взаємозв'язок, зазначені етапи адитивного виробництва.

Як основні технологічні параметри, які чинять визначальний вплив на формування адитивнонаплавленого металу, визначені потужність електронного променя, швидкість його переміщення, фокусування і крок зміщення траєкторії наплавлення, товщина нанесеного шару порошку. Встановлено, що співвідношення між потужністю та швидкістю переміщення променя має суттєвий вплив на схильність до утворення дефектів та дисперсність структури. На геометричні розміри ділянки розплаву істотно впливають фокусування електронного променя та положення фокусу. Крок зміщення траєкторії променя визначає величину перекриття між сусідніми валиками, а траєкторія переміщення променя впливає на формування структури металу виробу.

Встановлений вплив технологічних параметрів процесу ЕПД на характеристики якості виробів зі сферичного порошку титанового сплаву системи легування Ti-6Al-4V, для випробувань надруковано партію дослідних зразків на різних режимах. Визначений вплив параметрів режиму адитивного ЕПД на характеристики шорсткості поверхонь виробів, зокрема крок нерівностей та відхилення глибини профілю.

За результатами металографічних досліджень структурної будови зразків із сферичних порошоків сплаву системи легування Ti-6Al-4V встановлено, що при адитивному ЕПД формується однорідна пластинчасто-голчаста структура металу, яка складається переважно з α' -фази з невеликою кількістю β -фази. Наплавлення зі швидкістю переміщення променя 270 мм/с за потужності 240 Вт сприяє подрібненню структури, зменшення ширини кристалітів у порівнянні з іншими дослідженими режимами знаходиться в межах від 1,17 до в 1,55 разів, а загальне підвищення мікротвердості наплавленого металу складає до 5 %.

Автором встановлені рекомендовані технологічні параметри режимів наплавлення сферичних порошоків з титанового сплаву TA15 системи легування Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V. Структура зразків дендритного типу з $\alpha'+\beta$ пластинчасто-голчастою морфологією. Форма виділень α' -фази та дисперсність структури залежить від величини питомої енергії джерела нагріву. Формування сприятливої мікроструктури металу забезпечується при ЕПД з кроком сканування 0,2 мм та енергією променя 40 Дж/мм³.

Запропонований режим ЕПД забезпечує отримання наплавленого металу виробів з вищими, у порівнянні з традиційною технологією електронно-променевої плавки, значеннями границь міцності та текучості на 27 % та 24 % відповідно і у 3,2 рази пластичністю. Дослідження опору втомі на базі $5 \cdot 10^4 \dots 2 \cdot 10^6$ циклів свідчать, що отриманий за технологією ЕПД метал на 32 % та 11 % перевищує відповідні показники для литого та деформованого сплаву.

У п'ятому розділі описаний процес програмного перетворення цифрових моделей конкретних виробів в скориговані, з урахуванням нерівномірності розподілу температурних полів та виникаючих в процесі адитивного ЕПД напружень та деформацій, моделі для 3D друку з подальшим програмним перетворенням в керуючі сигнали, що визначають технологічні параметри процесу адитивного наплавлення. За запропонованою технологією виготовлені

дослідні вироби та зразки-свідки. Результати експериментальних досліджень по визначенню структурної будови та властивостей отриманого ЕПД наплавленого металу зразків свідчать про ефективність запропонованої технології та підтверджують результати попередніх досліджень по визначенню рекомендованих режимів адитивного електронно-променевого наплавлення порошкових матеріалів.

Ступінь обґрунтованості наукових положень і висновків дисертації

Основні наукові положення та висновки дисертаційної роботи мають теоретичні та експериментальні підтвердження. Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій роботи доведена чисельними результатами експериментальних досліджень реальних зразків, проведеними із застосуванням електронної та оптичної мікроскопії, електронної мікроскопії, що просвічує, рентгеноструктурного та рентгенофазового аналізів, дюрOMETричними дослідженнями, результатами механічних випробувань на сертифікованому обладнанні із застосуванням стандартизованих методик, точністю вимірювань, статистичним обробленням отриманих експериментальних даних, відтворюваністю результатів.

Отримані автором теоретичні закономірності не мають протиріч з існуючими теоретичними уявленнями та накопиченим досвідом. Наукові положення, висновки і рекомендації узгоджуються з існуючими концепціями. Їх достатня обґрунтованість підтверджуються визнанням на відомих міжнародних конференціях з машинобудування, зварювання та споріднених процесів, променевих та адитивних технологій.

Достовірність одержаних результатів. Основні наукові результати та висновки дисертаційної роботи мають теоретичні та експериментальні підтвердження. Про достовірність наукових положень роботи свідчить використання сучасних методів досліджень механіки руйнування твердого тіла та сертифікованого обладнання, розрахункових аналітичних методів та застосування сучасних програмних пакетів. Достовірність результатів та висновків роботи підтверджена доброю збіжністю отриманих значень експериментальних і розрахункових результатів, їх узгодженістю з наявними результатами вітчизняних та закордонних вчених.

Наукова новизна одержаних результатів:

Сукупність теоретичних положень і практичних результатів роботи може бути кваліфікована як аналіз, теоретичне узагальнення і рішення науково-прикладної задачі. Отримані в роботі результати можуть бути використані при створенні алгоритмів роботи нового вітчизняного обладнання для адитивного друку виробів з дисперсних матеріалів, розробленні технологій виготовлення виробів методом пошарового ЕПД із застосуванням різних типів металевих порошкових матеріалів.

Автором розширено уявлення щодо можливості застосування теплової енергії електронного променю для 3D друку виробів з дисперсних матеріалів, зокрема сферичних та несферичних порошків сплавів на основі титану. Вперше встановлено, що для титанових сплавів TA15 і Ti-6Al-4V раціональним є режим наплавлення з густиною енергії від 40 до 45 Дж/мм³ з кроком зміщення траєкторії 0,2 мм. Це забезпечує зменшення відхилення мікрорельєфу

поверхонь від заданого, формування однорідної бездефектної двофазної структури металу з розміром голчастих кристалів α' - фази до 1,8 мкм.

Вперше встановлено, що адитивне наплавлення порошків титанового сплаву TA15 за розробленою технологією забезпечує рівень механічних властивостей наплавленого металу вищий за значення, які характерні для деформованого. Визначена границя міцності отриманих ЕПД зразків складає 1139 МПа, що на 27% вище за характеристики деформованого металу, відносне видовження відповідає значенню 16,5 %, що на 77 % вище, визначена на базі $2 \cdot 10^6$ циклів границя витривалості наплавленого металу складає 508 МПа, що на 11% вище.

Автором вперше доведено, що адитивне наплавлення сучасних HDH порошків титанових сплавів BT20 дозволяє отримати вироби складної геометричної форми з безпористою дрібнодисперсною двофазною структурою металу, твердістю HV 4000 МПа та рівномірним розподілом легуючих елементів.

Отримані наукові результати застосовні при створенні технологій та обладнання для адитивного синтезу виробів з дисперсних матеріалів при застосуванні інших висококонцентрованих джерел нагріву, зокрема лазерного та плазмового.

Практичне значення роботи полягає в створенні алгоритму, методології, програмного та апаратного забезпечення і обладнання для реалізації процесу адитивного електронно-променевого наплавлення виробів складної геометричної форми зі сплавів титану.

За результатами досліджень створений промисловий зразок вітчизняного адитивного електронно-променевого устаткування для 3D друку металевих порошкових матеріалів сферичної та довільної форми, розроблена універсальна програмно-апаратна платформа для керування процесами адитивного виробництва, розроблені та експериментально перевірені технології пошарового електронно-променевого 3D друку металевих виробів.

Впровадження результатів роботи. Результати чисельних теоретичних та експериментальних досліджень автора, розроблені технології та обладнання можуть бути рекомендовані до впровадження на підприємствах газотурбобудування, оборонної промисловості, машинобудівної, авіаційної, ракетно-космічної та медичної галузей України.

Повнота викладу основних результатів роботи в наукових фахових виданнях. Основні результати досліджень дисертації опубліковано в 30 наукових роботах: 2 розділи монографії; 16 статей у наукових журналах, 14 з них – у журналах, що входять до переліку наукових фахових видань МОН України, 2 – в закордонних наукових періодичних виданнях, з яких 4 статті входять до наукометричної бази даних Scopus; 12 публікацій у матеріалах науково-технічних конференцій.

Результати роботи достатньо широко висвітлені публікаціями в вітчизняних та закордонних наукових періодичних виданнях, наприклад, журналах «Автоматичне зварювання», «Eastern-European Journal of Enterprise Technologies», «Welding in the World» та ін.

При підготовці публікацій автор неухильно дотримувався принципів академічної доброчесності. В представлений дисертації наведений перелік опублікованих за темою дисертації робіт.

Таким чином, описані в дисертаційній роботі результати повною мірою висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Висновки дисертації відображають найважливіші наукові та практичні результати роботи, у якій теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено закономірності впливу технологічних параметрів 3D друку на формування структури та властивості виробів отриманих пошаровим електронно-променевим наплавленням металевих порошкових матеріалів, алгоритми та методологія створення програмного та апаратного забезпечення для реалізації процесу адитивного ЕПД виробів складної геометричної форми зі сплавів титану.

Висновки сформульовані коректно та логічно, відповідно до змісту дисертації.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота Матвійчука В.А. написана українською мовою. Наведені в дисертаційній роботі відомості та представлені дисертантом результати досліджень логічно розподілені ним на окремі розділи. Структура дисертаційної роботи забезпечує можливість іншим дослідникам покроково чітко зрозуміти послідовність етапів виконання досліджень. Наведений графічний матеріал, який представлений власними фотографіями, скріншотами, графіками, в повній мірі відображає результати експериментальних і розрахункових досліджень. Сутність дисертаційної роботи представлена послідовно, зручно та стисло. Автором використана загальноприйнята технічна термінологія, що сприяє повному розумінню наведених результатів досліджень.

Зміст дисертації і автореферату ідентичний. Автореферат дисертації достатньо повно висвітлює наведені в дисертаційній роботі результати.

У цілому, дисертація оформлена ретельно і грамотно, побудована логічно і зрозуміло, але є деякі зауваження і коментарі.

Зауваження та коментарі по дисертації

1. Робота має деякі некоректності, неточності та описки. Наприклад, стор. 29 «...складної геометрії...»; стор. 91 «...підвищеною леткістю алюмінієвого пару...»; стор. 129 - 130, рис. 4.19 - 4.21 «Варіації мікротвердості та ін.

2. Описану в підрозділах 1.4 та 1.5 «Класифікацію адитивних технологій» можна було б скоротити, оскільки в подальшому розглядається лише технологія електронно-променевого наплавлення.

3. На стор. 54 вказано, що «Дослідження на адитивному устаткуванні виявили значний вплив магнітного поля Землі на положення електронного променя в процесі наплавлення, що не дає можливості забезпечити необхідну точність побудови виробів (до $\pm 0,3$ мм)», бажано пояснити чому саме таке значення точності виготовлення було обрано автором.

4. Бажано було б сформулювати окремий розділ роботи «Матеріали та методики досліджень». Такий підхід дозволив би зменшити загальний обсяг дисертаційної роботи, спростити її структуру і не наводити на початку окремих

підрозділів, зокрема 4.3.3, 4.3.3.1, 4.4.3, 4.4.4 та ін. застосовні матеріали та методики підготовки зразків, зокрема до металографічних досліджень.

5. На стор. 102, рис. 4.4 наведені «Стратегії сканування...». Бажано додатково пояснити, що має на увазі автор коли характеризує рис. 4.4,б, як двоспрямоване змійчасте сканування.

6. Відомості наведені в підрозділі 4.3.1. «Аналіз літературних даних та постановка проблеми», аналогічних йому підрозділах 4.4.1, 4.5.1, краще було б представити в розділі 1 дисертаційної роботи.

7. На стор. 133 автор стверджує, що «Варіації мікротвердості в залежності від параметрів друку у дослідних зразках пов'язані із структурно-фазовими складовими: змінами внутрішньої (тонкої) структури кристалітів, а саме субструктури; розмірами дисперсних голчасто-пластинчастих складових α' -фази; рівнем щільності дислокацій», але в роботі відомості щодо щільності дислокацій та їх розподілу не наведені.

8. В розділі 5 при описі роботи програмного забезпечення та застосування програм Materialise Magics, Simufact Additive бажано було б навести конкретні значення параметрів які задавав автор. Також не зрозуміло яким чином здійснювалася «...компенсація залишкових деформацій... та ... корекція моделі виробу з урахуванням очікуваних деформацій».

9. На стор. 168 вказано, що «Створюється регулярна сітка, яка використовується для моделювання пошарового друку деталі», бажано навести параметри створеної сітки та принци її побудови.

10. На стор. 172 автор вказує, що «Деформації усадки визначались за другим більш загальним підходом аналізу термопластичного деформування матеріалу. Тобто, процедура калібрування деформацій усадки для вокселів матеріалу не проводилась, а виконувався аналіз кінетики температурної задачі нагріву виробу при пошаровому формуванні і зв'язаний термопластичний аналіз визначення напружено-деформованого стану», але в чому саме полягає згаданий підхід та як виконувався аналіз і визначення напружено-деформованого стану залишаються не зрозумілими.

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

Загальний висновок. Розглянуті вище результати дають підстави вважати, що дисертаційна робота Матвійчука В.А. є завершеною науково-дослідною розробкою, яка присвячена актуальній проблемі створення адитивного обладнання та технології виготовлення виробів методом пошарового електронно-променевого наплавлення із застосуванням різних типів металевих порошкових матеріалів.

Дисертаційна робота виконана на високому науковому рівні, вона не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує актуальне науково-технічне завдання.

Дисертація відповідає вимогам Департаменту атестації кадрів МОН України. Назва та зміст дисертації відповідають паспорту спеціальності 05.03.06 - Зварювання та споріднені процеси і технології, як за формулою спеціальності, так і за напрямками досліджень.

За обсягом виконаних досліджень, їх новизною, науковою та практичною значимістю одержаних результатів та їх рівнем представлена робота відповідає вимогам п. 9, 11 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» щодо кандидатських дисертацій, а її автор **Матвійчук Владислав Анатолійович** заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 - Зварювання та споріднені процеси і технології.

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



Віктор КВАСНИЦЬКИЙ

Підпис завідувача кафедри зварювального виробництва Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», д.т.н, професора Квасницького В.В. засвідчую:



Факівська ВК  Фронцова С.Г.