

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ІМ. Є.О. ПАТОНА**

**МАТВІЙЧУК
ВЛАДИСЛАВ АНАТОЛІЙОВИЧ**



УДК 621.791.92

**АДИТИВНІ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ
МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ МЕТОДОМ ПОШАРОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ ІЗ
ЗАСТОСУВАННЯМ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ**

05.03.06 – зварювання та споріднені процеси і технології

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2025

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

Науковий керівник: член-корр. НАНУ, доктор технічних наук
Нестеренков Володимир Михайлович,
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,
м. Київ, завідувач відділу фізичних процесів, техніки і устаткування для електронно-променевого і лазерного зварювання

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Квасницький Віктор В'ячеславович
завідувач кафедри зварювального виробництва
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»
МОН України, м. Київ

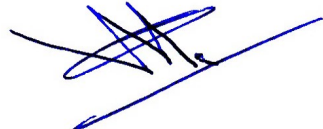
кандидат технічних наук
Петрик Ігор Андрійович
головний зварювальник АТ «Мотор Січ»,
Україна, м. Запоріжжя

Захист відбудеться “12” березня 2025 р. о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.182.01 при Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України за адресою: 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України за адресою: 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.
Електронні версії матеріалів дисертації розміщено на офіційному вебсайті Інституту:
<https://paton.org.ua/category/materialy-zaxistiv-kandydatskih-disertacij/>

Автореферат розісланий “7” лютого 2025

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д26.182.01
доктор технічних наук



Олег МАХНЕНКО

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Інноваційні технології виготовлення металевих виробів методом швидкого прототипування надають нові можливості для виробництва деталей заданої форми і структури із заздальгідь прогнозованими властивостями. Процес виробництва таким методом із застосуванням електронного променя відносно новий, але вже успішно показав значні перспективи для виготовлення широкої номенклатури деталей та вузлів в таких галузях, як авіакосмічна індустрія, енергетичне машинобудування, оборонна промисловість, біомедична інженерія.

В його основу покладена операція пошарового сплавлення металевого порошку в вакуумі за допомогою електронного променя. Цей підхід відрізняє швидкий перехід до виробництва тривимірних об'єктів безпосередньо від системи автоматизованого проектування з можливістю використання широкого спектру металів і сплавів, в тому числі тугоплавких і хімічно активних, таких як сплави титану.

В останнє десятиліття адитивні технології набули широкого комерційного і промислового поширення за кордоном. Устаткування вітчизняної розробки, які серійно виробляються, не існує. При цьому закордонні виробники поставляють технологію «під ключ», тобто технологічне устаткування, номенклатуру матеріалів і режими їх обробки, що забезпечує лише деякі з можливих характеристик міцності і не дозволяє повноцінно впровадити методи адитивних технологій в промисловість. Технологічні режими часто невідомі, бо приховані в програмному забезпеченні, що не надає гнучкості виробництва в частині можливої заміни сировини і технологічного обладнання на аналоги.

Таким чином, у вітчизняній промисловості склалася проблема імпортозаміщення обладнання і технологій адитивного виробництва, а також забезпечення сировинною. Актуальним завданням є розробка установок на базі електронно-променевих процесів із застосуванням саме вітчизняних порошкових матеріалів, які будуть сертифіковані та орієнтовані для впровадження на вітчизняних підприємствах.

Оскільки вітчизняних електронно-променевих установок для 3D друку не існує, актуальним є створення в Україні обладнання та програмного забезпечення до нього для реалізації адитивного електронно-променевого виробництва, вільного від імпортової сировини, орієнтованого для впровадження на підприємствах авіакосмічної промисловості і турбінобудування: ДП «КБ «Південне», АТ «Мотор Січ», ДП НВКГ «Зоря» - «Машпроект», ДП «ЛРЗ «Мотор».

В умовах воєнного стану в Україні надзвичайно актуальним і гострим є забезпечення медичної галузі надійними, конкурентоспроможними вітчизняними імплантатами та протезами для проведення повноцінної реконструктивно-відновлювальної хірургії. Адитивні методи є найбільш ефективними для виробництва індивідуальних медичних засобів.

Зазначені проблеми зумовлюють необхідність започаткування наукових досліджень за темою дисертації «Адитивні електронно-променеві технології виготовлення металевих виробів методом пошарового наплавлення із застосуванням порошкових матеріалів».

Дослідженнями передбачається створити адитивні технології та устаткування з виготовлення металевих виробів для потреб оборонної промисловості, авіакосмічної галузі та турбінобудування. Значним потенціалом для розвитку адитивного виробництва має медична галузь.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України в рамках державних науково-технічних програм, в яких автор брав участь в якості відповідального виконавця за темами: цільова науково-технічна програма оборонних досліджень 57,30/58 (0124U000019д) «Розробка адитивних технологій та їх застосування при виготовленні деталей малогабаритних авіаційних двигунів, що виробляються з титанових сплавів. Міцнісні випробування отриманих заготовок» (2024); цільова програма наукових досліджень 30.21.57/37 (0123U100870) «Розробка технологій одержання новітніх титанових сплавів методом електронно-променевого плавлення та виробів з них методом прокатки і 3D друку для потреб оборони та медицини» (2023-2024); цільова програма наукових досліджень 1.6.2.8.21.57.36 (0122U000895) «Розробка адитивних технологій отримання об'ємних виробів промислового та біомедичного призначення із сплавів та біметалів методами плазово-дугового та електронно-променевого наплавлення» (2022); програмно-цільова та конкурсна тематика НАН України 1.6.2.8.57.35 (0120U100534) «Розробка адитивного електронно-променевого обладнання для виготовлення металевих виробів із порошкових матеріалів методом пошарового наплавлення» (2020-2021); цільова програма наукових досліджень 1.6.1.1.57.34 (0118U005297) «Розробка програмно-апаратної платформи управління адитивним електронно-променевим обладнанням для виготовлення металевих виробів із порошкових матеріалів» (2018-2019); цільова програма наукових досліджень 1.6.1.1.57.31 (0117U001264) «Розробка адитивних електронно-променевих технологій виготовлення і ремонту виробів авіакосмічної промисловості і турбінобудування» (2017-2021); цільова програма наукових досліджень 1.6.1.1.57.4 (0114U003510) «Розробка системи цифрової обробки та передачі сигналу вторинної електронної емісії для відображення в режимі реального часу процесів електронно-променевого зварювання та растрового мікроскопування» (2014-2015).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розроблення адитивного обладнання та технології виготовлення виробів методом пошарового електронно-променевого наплавлення із застосуванням різних типів металевих порошкових матеріалів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Розробити дослідне устаткування.
2. Створити програмно-апаратну платформу управління адитивним виробничим процесом.
3. Дослідити застосування перспективних металевих порошкових матеріалів.
4. Визначити вплив технологічних параметрів друку на властивості виробів.
5. Розробити цифрові моделі, надрукувати та дослідити властивості виробів для потреб авіації і медицини.

Об'єкт дослідження: процеси, що відбуваються при створенні виробів методом пошарового електронно-променевого наплавлення.

Предмет дослідження: адитивна електронно-променева технологія, обладнання, матеріали, методи виробництва та вироби.

Методи дослідження: сканівна електронна та оптична мікроскопія, просвітлювальна електронна мікроскопія, рентгеноструктурний та рентгенофазовий аналізи, дюрومتрія (мікротвердість), механічні випробування за статичного навантаження, випробування на короткочасну міцність і пластичність, втомні дослідження на циклічний розтяг.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Розширено уявлення щодо застосовності електронного променя для 3Д друку виробів з порошкових матеріалів титанових сплавів. 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, який забезпечує мінімальні параметри мікрорельєфу поверхонь, однорідну, бездефектну, двофазну структуру металу з розміром голчастих кристалів α' - фази до 1,8 мкм.

2. Вперше встановлено, що адитивне наплавлення з титанового сплаву TA15 за розробленою технологією забезпечує механічні властивості вищі ніж у деформованого металу, а саме: границю міцності на рівні 1139 МПа, що на 27% вище; значення відносного видовження 16,5%, що на 77% вище; обмежену границю витривалості на базі 2 мільйонів циклів на рівні 508 МПа, що на 11% вище.

3. Вперше показано, що адитивне наплавлення з новітніх HDH порошоків титанових сплавів VT20 дозволяє отримати вироби складної форми з безпористою, дрібнодисперсною, двофазною структурою металу із твердістю HV 4000 МПа та рівномірним розподілом легуючих елементів.

Практичне значення отриманих результатів.

Встановлені в роботі закономірності процесу електронно-променевого наплавлення, а також вимоги до умов їх реалізації, дозволили розробити рекомендації для створення обладнання, яке забезпечує адитивне виробництво компонентів із металевих порошкових матеріалів. Практична цінність роботи полягає в наступному:

1) створено промисловий зразок вітчизняного адитивного електронно-променевого устаткування з використанням металевих порошкових матеріалів сферичної та довільної форми;

2) розроблена універсальна програмно-апаратна платформа управління адитивними виробничими процесами;

3) розроблені та експериментально перевірені технології пошарового електронно-променевого 3Д друку металевих виробів.

Достовірність та обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечено дотриманням правил застосування сучасних методів експериментальних досліджень, точністю вимірювань, статистичним обробленням отриманих експериментальних даних, графічним представленням результатів досліджень, забезпеченням та контролем параметрів процесу адитивного електронно-променевого наплавлення, відтворюваністю результатів оброблення, узгодженістю отриманих аналітичних та експериментальних результатів з наявними результатами вітчизняних та зарубіжних авторів.

Особистий внесок здобувача. В дисертаційній роботі постановка і обґрунтування завдання досліджень, обрання наукових підходів і методів, аналіз і узагальнення отриманих експериментальних даних, формулювання наукової новизни, висновків і рекомендацій здійснено безпосередньо автором. Наукові і практичні положення, що винесені на захист дисертаційної роботи, отримані автором самостійно або в співавторстві у відповідності до наведеного списку опублікованих наукових праць. Основні результати роботи одержано здобувачем самостійно. При проведенні досліджень, результати яких опубліковано у співавторстві, автору належить постановка завдання досліджень, аналіз і узагальнення літературних джерел та отриманих результатів, формулювання висновків. У робо-

тах, які було опубліковано у співавторстві, здобувачем виконано наступне: у [1,2,3,9,10,11,12,13,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,27] - ідея та обґрунтування концепції експериментів, аналіз експериментальних даних, аналіз і узагальнення літературних даних, підготовка рукописів публікацій; [4,14,26] - розробка технологічних режимів, узагальнення експериментальних даних, підготовка рукописів публікацій; [5,6,7] - ідея і розробка концепції математичного моделювання, перевірка адекватності моделювання, формулювання висновків.

Структура та обсяг дисертаційної роботи обговорювались спільно з науковим керівником член-корр. НАНУ, д.т.н. Нестеренковим В.М. Дисертаційна робота виконана у Відділі фізичних процесів, техніки і устаткування для електронно-променевого і лазерного зварювання ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.

Апробація результатів роботи. Основні результати та положення доповідались та обговорювались на наукових конференціях, в тому числі на: Міжнародній конференції «Сучасні технології зварювання» 13-15 червня 2016 р., м. Київ, Україна; IV міжнародній науково-практичній конференції «Титан 2016: виробництво та використання в авіабудуванні» 3-4 листопада 2016 р., м. Запоріжжя, Україна; VIII міжнародній конференції «Променеві технології у зварюванні та обробці матеріалів» 11-15 вересня 2017 р., м. Одеса, Україна; XVI Міжнародній конференції «Ti-2018 в СНД», 18-21 квітня 2018 р., м. Мінськ, Білорусь; XIII International conference on electron beam technologies “EBT 2018”, 18-22 червня 2018 р., м. Варна, Болгарія; IX міжнародній конференції «Променеві технології у зварюванні та обробці матеріалів» 9-13 вересня 2019р., м. Одеса, Україна; X Міжнародній конференції «Променеві технології в зварюванні та обробці матеріалів», 6-10 вересня 2021 р., м. Одеса, Україна; онлайн The 8th Asian Welding Technology & Application Forum «2021 Welding and Surfacing & Additive Manufacturing Technology Remote International Forum», 18 квітня 2021 р., м. Нінбо, Китай; онлайн міжнародній конференції «Досягнення адитивних технологій для відбудови української промисловості, науки та інжинірингу: Надихаємо українську технологічну революцію», 7-8 грудня 2022 р., м. Київ, Україна; науково-технічній конференції «Сучасні напрями розвитку адитивних технологій» 27 листопада 2023 р., м. Київ, Україна; VII International conference on welding and related technologies (WRT 2024), 7-10 жовтня 2024 р., м. Яремче, Україна.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 30 наукових праць: 2 розділи у книзі; 16 статей у наукових журналах (14 – у журналах, що входять до переліку наукових фахових видань МОН України, 2 – в іноземному виданні), з яких 4 статті входять до наукометричної бази даних Scopus; 12 публікацій у матеріалах науково-технічних конференцій.

Обсяг і структура роботи.

Дисертаційна робота викладена на 214 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Обсяг основного тексту дисертації складає 196 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 22 таблицями, 108 рисунками. Список використаних джерел містить 127 найменувань.

Основний зміст роботи.

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовані мета й основні завдання, які необхідно вирішити для її досягнення, описано об'єкт, предмет і методи дослідження. Відзначено наукову новизну й практичне значення отриманих результатів

із зазначенням особистого внеску автора. Наведено відомості про апробацію, публікації по темі дисертації, структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У **першому розділі** проведено аналіз сучасного стану адитивного виробництва, визначені переваги адитивних технологій, надано термінологію адитивного виробництва, здійснено класифікацію та аналіз адитивних технологій виготовлення виробів із металу. Визначені особливості застосування технологій вибіркового лазерного сплавлення SLM та електронно-променевого наплавлення ЕВМ, здійснено їх порівняльний аналіз. Зазначені переваги адитивної електронно-променевої технології для виробництва широкої номенклатури деталей та вузлів в таких галузях, як авіакосмічна індустрія, енергетичне машинобудування, оборонна промисловість, біомедична інженерія.

Зазначено, що у вітчизняній промисловості склалася проблема імпортозаміщення обладнання і технологій адитивного виробництва, а також забезпечення сировинною. Актуальним завданням є розробка установок на базі електронно-променевих процесів із застосуванням порошкових матеріалів, які будуть сертифіковані та орієнтовані для впровадження на вітчизняних підприємствах.

Зазначені проблеми зумовлюють необхідність започаткування наукових досліджень за темою дисертації.

У **другому розділі** описане створене дослідне адитивне устаткування.

Процес наплавлення відбувався у вакуумній камері 1 (рис. 1). Металевий порошок розплавляється під впливом електронного променя, який створюється електронно-променевою гарматою 2. Вакуумна система устаткування забезпечує тиск в камері до 10^{-2} Па. Елементи системи управління обладнанням розташовані в шафах 3, де знаходяться блоки управління високовольтним джерелом, вакуумною системою та управляючий контролер МСР. Високовольтне джерело 4 дозволяє отримати регульовану напругу 60 кВ і струм пучка електронів до 100 мА. Технічні характеристики обладнання надані в табл. 1.

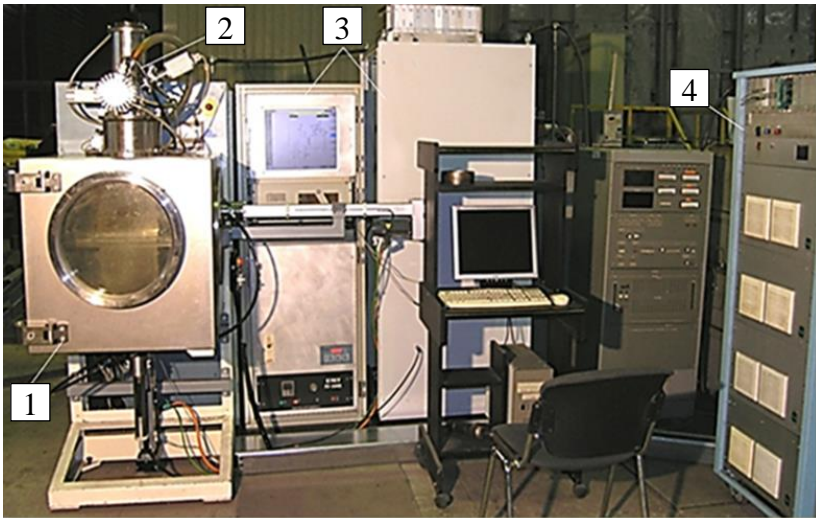


Рис. 1. Адитивне устаткування:
1 – вакуумна камера; 2 – електронно-променева гармата; 3 – шафи управління; 4 – високовольтне джерело

Система управління адитивним процесом побудована на основі апаратного контролера МСР, що управляє струмом пучка електронів, його розгортками, фокусуванням та механізмами переміщень. Контролер взаємодіє з промисловим комп'ютером, який управляє вакуумною системою та високовольтним джерелом живлення.

Створена система візуалізації ОПК, яка за сигналом вторинної електронної емісії в режимі реального часу відображає на екрані монітору стан поверхні наплавлення.

Табл. 1. Технічні характеристики адитивного устаткування

Параметр	Значення
Внутрішні розміри вакуумної камери, мм (W x D x H)	640*640*640
Розміри зони побудови виробу, мм (W x D x H)	200*200*180
Прискорююча напруга, кВ	60
Потужність електронного пучка, кВт, до	6
Діаметр пучка електронів, мм, від	0,2
Швидкість переміщення променя, мм/с, до	300 000
Робочий тиск в вакуумній камері, Па, краще ніж	10^{-2}
Продуктивність, см ³ /год, до	80

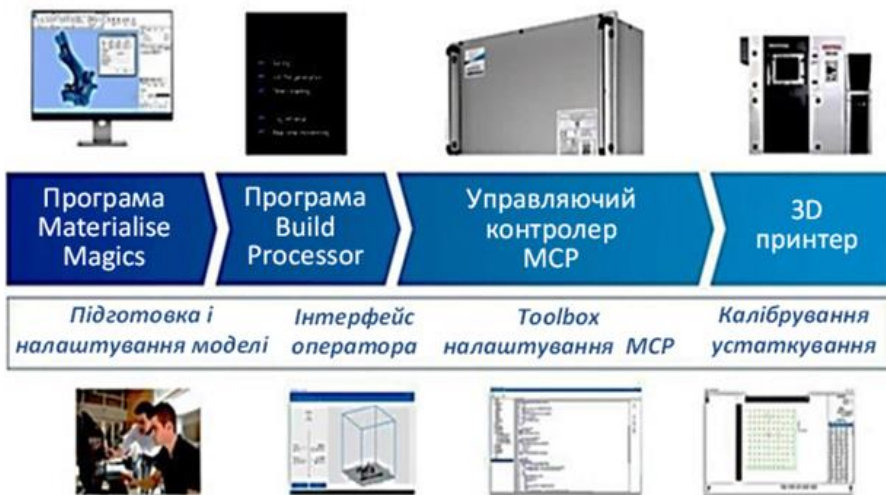


Рис. 2. Структура управляючої платформи

управляє процесом 3D друку. В програмі Інтерфейс оператора задаються налаштування обладнання, а також в режимі реального часу контролюється процес друку з можливістю корегування технологічних параметрів. Налаштування параметрів контролера МСР та калібрування 3D принтера здійснюють в програмі Toolbox.

У **третьому розділі** досліджені металеві порошкові матеріали титанових сплавів, що отримані методом гідрування-дегідрування спеченого напівфабрикату (HDH). Визначено можливість застосування порошків вітчизняного виробництва для виготовлення виробів методом адитивного електронно-променевого наплавлення.

Визначено вплив магнітного поля Землі на положення електронного променя, створено юстувальний пристрій, розроблено методи корекції положення електронно-променевої гармати. Розроблено методи калібрування розгорток електронного променя, що забезпечує стабільність фокусування в процесі наплавлення та геометричну точність побудови виробів.

Описана програмно-апаратна платформа управління адитивним процесом, яка створена та використана в дослідженнях. Програмно-апаратна платформа складається з апаратного контролера і пакета прикладних програм для 3D друку.

Для управління технологічним обладнанням спроектований, виготовлений та інстальований до адитивного устаткування управляючий контролер МСР, який укомплектований периферійними модулями.

Взаємозв'язок між структурними елементами управляючої платформи наданий на рис. 2. Програма Materialise Magics використовується для аналізу і редагування 3D моделей виробів. Підготовлена до друку комп'ютерна модель обробляється програмою BuildProcessor, яка дозволяє розкласти моделі на шари та задати параметри друку виробів. BuildProcessor формує виконавчий файл, що надходить до контролера МСР, який

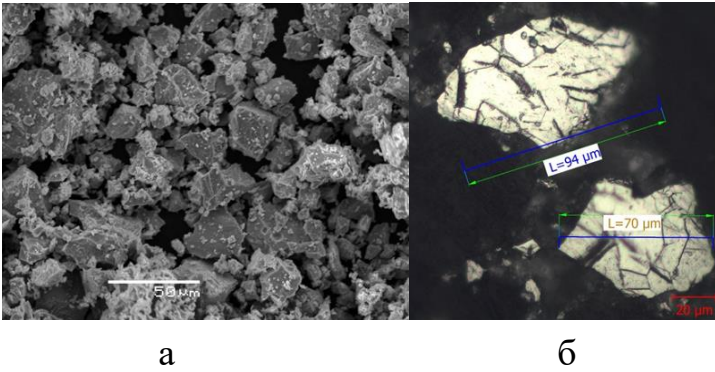


Рис. 3. а - Зовнішній вигляд,
б - мікроструктура HDH порошоків

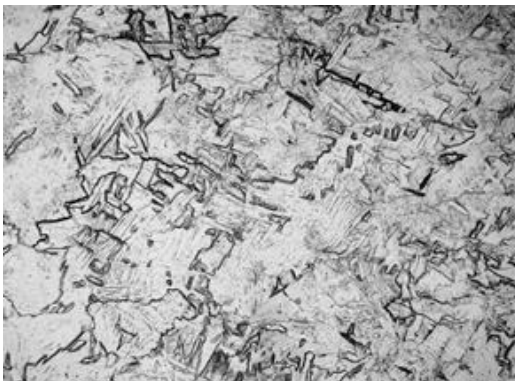


Рис. 4. Мікроструктура зразка
із сплаву титану VT1-0 (x100)

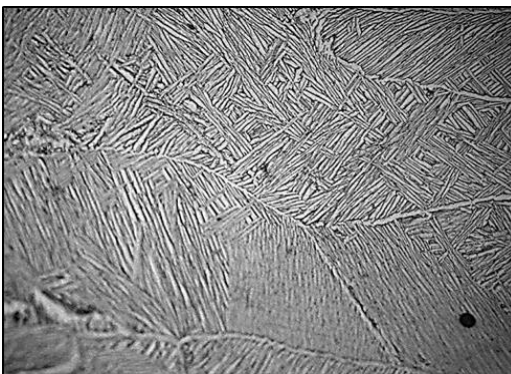


Рис. 5. Мікроструктура зразка
із сплаву титану VT20 (x500)

Досліджені HDH порошкові матеріали титанового сплаву VT1-0 виробництва АТ «Інститут титану». Порошок VT1-0 є сплавом титану з гранулами довільної форми з розміром частинок від 63 до 100 мкм (рис.3).

Для реалізації адитивних процесів розроблене дослідне оснащення пошарового наплавлення порошкових матеріалів. В процесі наплавлення отримані зразки прямолінійної форми розмірами 12x12x100мм. В різних перетинах виробу проведені металографічні дослідження мікроструктури наплавленого металу.

Металографічними дослідженнями встановлено, що структура наплавленого металу (рис. 4) складається з пластинчастої α -фази титану, характерної для литих титанових сплавів. Це дозволяє зробити висновок, що форма порошкових матеріалів, а саме несферична, не впливає на структуру наплавленого металу.

Також досліджено застосування HDH порошку сплаву VT20 системи Ti-Mo-Al-V-Zr з гранулами довільної форми розміром від 60 до 140 мкм. Зразок виробу у формі полого циліндра (діаметри: зовнішній 85 мм, внутрішній 55 мм, висота 35 мм) друкували у вакуумній камері устаткування. Досліджували поперечні розрізи зразка. Виявлено, що мікроструктура наплавленого металу (рис. 5) в цілому є безпористою, дрібнодисперсною та рівномірною за всім перерізом шліфу, собою являє голчасту α -фазу титану з малим вмістом β -фази. Мікротвердість складає від HV 3960 МПа до 4150 МПа. Відзначено рівномірний розподіл легуючих елементів та занижений вміст алюмінію внаслідок його летючості при наплавленні.

Розроблено елементи техніки та реалізовано можливість виготовлення виробів складної форми із застосуванням адитивних процесів методом електронно-променевого пошарового наплавлення з використанням HDH порошоків, які дозволяють отримати щільну литу структуру наплавленого металу.

У **четвертому розділі** визначені технологічні процеси, послідовність операцій, здійснено аналіз параметрів 3D друку та їх взаємозв'язок, зазначені етапи адитивного виробництва.

Визначено технологічні параметри: потужність, швидкість переміщення, фокусування і крок зміщення траєкторії променя, товщина шару порошку та їх зв'язок з густиною енергії електронного променя (1).

$$E = \frac{P}{S \times l \times h}, \quad (1)$$

де E – густина енергії електронного променя, P – потужність променя, S – швидкість переміщення променя, l – крок зміщення траєкторії, h – товщина шару порошку.

Зазначено, що співвідношення між потужністю та швидкістю переміщення променя має значний вплив на усунення дефектів і визначення зереності структури. Фокусування електронного променя та положення фокальної точки істотно впливає на геометрію розплавлених доріжок. Крок зміщення траєкторії променя визначає перекриття між двома сусідніми проходами, що зменшує ризик присутності нерозплавленого порошку у виробі. Вибір траєкторії переміщення променя впливає на структуру виробу.

Визначено вплив параметрів технологічного процесу електронно-променевого наплавлення на якісні показники виробів з титанового сплаву Ti-6Al-4V.

Для досліджень задіяли порошок титанового сплаву Ti-6Al-4V з гранулами сферичної форми розміром від 45 до 106 мкм. Порошок отриманий методом плазмової плавки та відцентрового розпилення (технологія PREP).



№1

№2

№3

Рис. 6. Зразки виробів

Адитивним методом виготовили партії дослідних зразків, режими наплавлення яких відповідають малій (240 мм/с), середній (540 мм/с) та великій (780 мм/с) швидкості променя. Із зразків відібрані вироби з найбільш гладкою поверхнею (рис. 6) та винайдені раціональні режими наплавлення для титанового сплаву Ti-6Al-4V (табл. 1).

Табл. 1. Технологічні режими наплавлення дослідних зразків

№ зразка	Потужність променя, Вт	Швидкість променя, мм/с	Зміщення траєкторії, мм	Товщина шару, мм	Густина енергії, Дж/мм ³
1	240	270	0,2	0,1	44,4
2	495	540	0,2	0,1	45,8
3	675	780	0,2	0,1	43,3
Середнє значення густини енергії					44,5

За рівнянням (1) визначено густина енергії електронного променя.

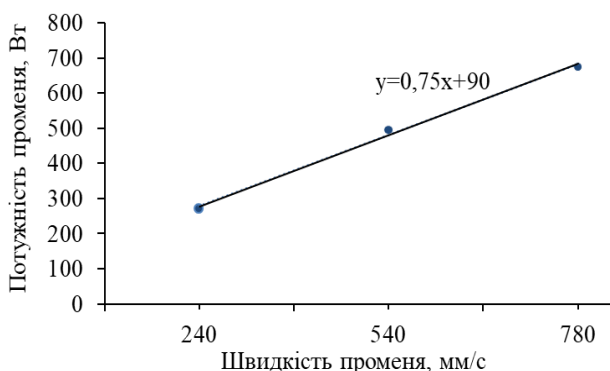


Рис. 7. Функція швидкості

За результатами експерименту створена функція швидкості (рис. 7), в межах якої забезпечується висока якість поверхні виробів. Співвідношення між потужністю та швидкістю переміщення променя визначено за рівнянням (2), яке є емпіричним:

$$P = 0,75 S + 90, \quad (2)$$

де P – потужність променя, Вт; S – швидкість переміщення променя, мм/с.

Параметри друку: густина енергії, швидкість переміщення променя, його потужність є основою для розрахунків технологічних режимів наплавлення виробів.

Із порошку титанового сплаву Ti-6Al-4V для випробувань надруковано партію дослідних зразків розміром 24×24 мм з висотою 10 мм. Задіяно режими швидкості та потужності променя: #1 (270мм/с; 240Вт), #2 (540мм/с; 495 Вт) і #3 (780мм/с; 675 Вт). Для кожного режиму змінювали струм динамічного фокусування від -1,2 А до 1,27 А з кроком біля 0,3 А.

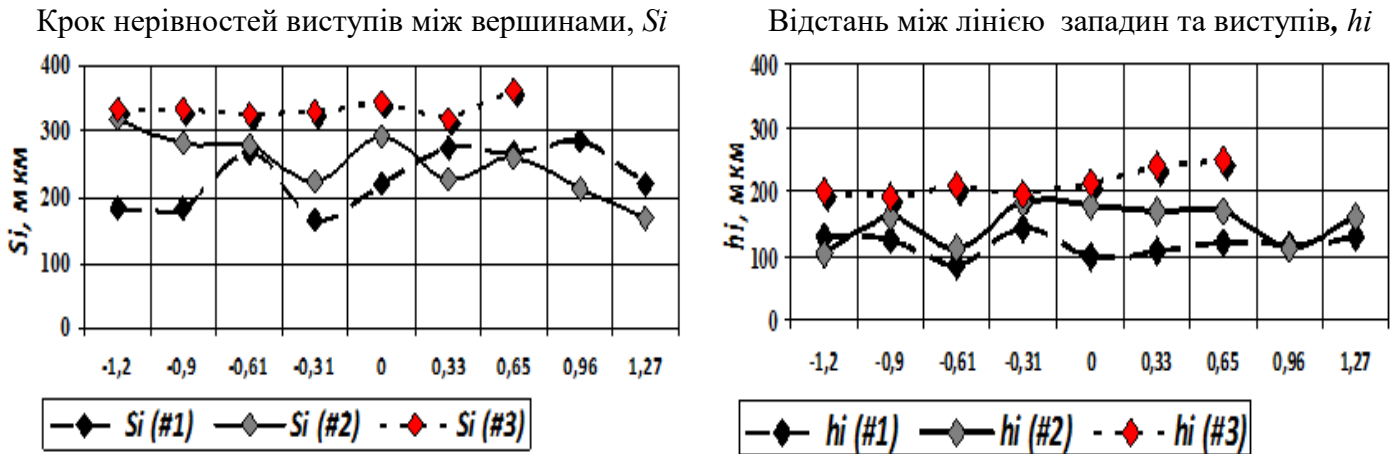


Рис. 8. Варіації середніх значень мікронерівностей поверхні зразків із сплаву Ti-6Al-4V

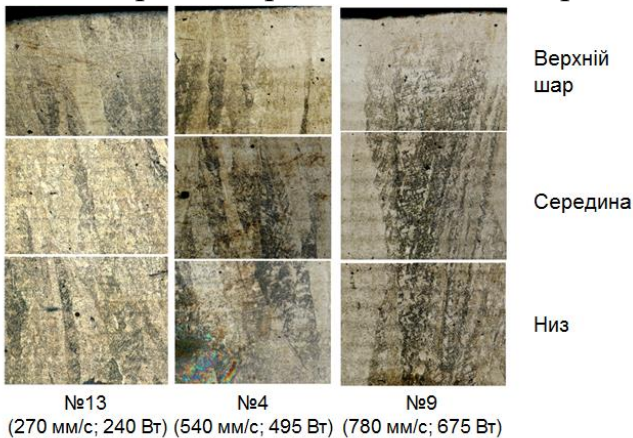


Рис. 9. Структура зразків із сплаву Ti-6Al-4V(×100)

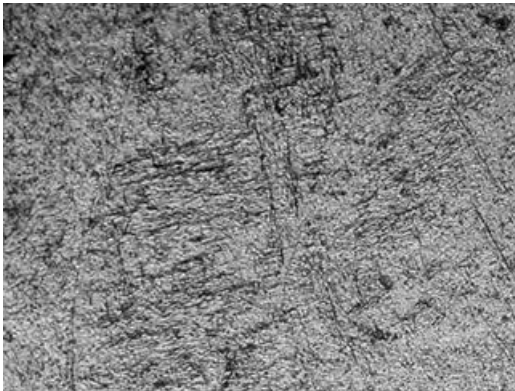


Рис. 10. Мікроструктура зразка №4 із сплаву Ti-6Al-4V

Проведено дослідження поверхні зразків із сплаву Ti-6Al-4V з використанням аналітичної растрової електронної мікроскопії. Показано, що вироби характеризуються переважно однорідним мікрорельєфом профілю поверхонь. Встановлено режими електронно-променевого пошарового наплавлення (рис.8) (швидкість променя 780 мм/с; потужність 675 Вт; струм динамічного фокусування $I_{df} = -1,2; -0,9; -0,61; 0$ А), що забезпечують мінімальні параметри мікрорельєфу поверхонь (h_i до 200 мкм; S_i до 300 мкм) та

відсутність дефектів.

Металографічними дослідженнями мікроструктури металу (рис. 9) у поперечному перерізі дослідних зразків із сплаву системи Ti-6Al-4V встановлено:

- за всією висотою зразків формуються великі кристаліти з однорідною пластинчасто-голчастою структурою α' -фази з невеликою кількістю β -фази (рис. 10), переважно без дефектів при рівномірній мікротвердості як за висотою, так і вздовж поверхні зразків;

- для верхніх шарів металу з боку зовнішньої поверхні характерно витончення голчастої складової α' -

фази, що пов'язано із збільшенням швидкості охолодження. Для середніх та нижніх шарів характерно потовщення голчастої складової α' -фази;

- на режимі наплавлення зі швидкістю променя 270 мм/с при потужності 240 Вт відбувається подрібнення структури: зменшення ширини кристалітів в 1,55 та 1,17 разів у порівнянні з іншими режимами.

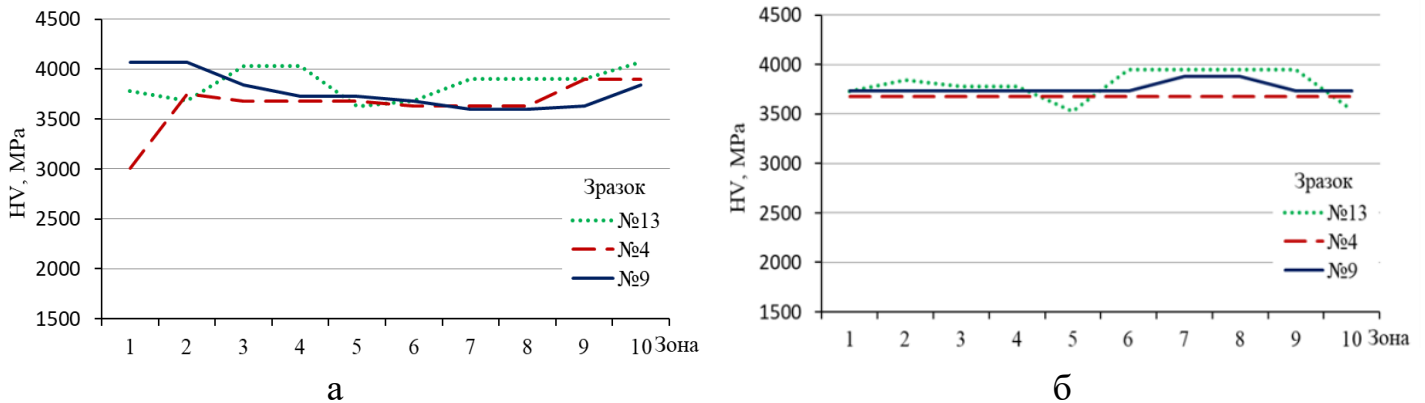


Рис. 11. Варіації мікротвердості: а - у поперечному перерізі шліфу, б - вздовж середньої частини зразка

Дослідженнями мікротвердості (рис. 11) зразків із сплаву системи Ti-6Al-4V встановлено, що у верхніх приповерхневих шарах на відстані до 500 мкм від краю, мікротвердість збільшується до 5...6 % порівняно із загальним рівнем твердості за висотою. Загальне підвищення рівня мікротвердості до 5 %, як за висотою, так і в поверхневих шарах, характерно для зразка з режимом наплавлення: швидкість променя 240 мм/с; потужність 270 Вт.

Наданий режим можна вважати раціональним з точки зору формування кращого структурного стану. Застосування режиму електронно-променевого наплавлення при швидкості променя 240 мм/с та потужності 270 Вт сприяє незначному збільшенню мікротвердості металу та формуванню більш дрібнішої структури.

Це буде забезпечувати комплекс властивостей міцності та в'язкості матеріалу виробів із сплаву системи Ti-6Al-4V.

Проведені дослідження із визначення технологічних параметрів отримання адитивним методом заготовок із титанового сплаву TA15 з підвищеними механічними характеристиками.

Визначено раціональні технологічні режими наплавлення заготовок з титанового сплаву TA15 системи легування Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V, що дасть можливість виготовляти адитивним методом вироби із щільною макроструктурою та підвищеними механічними характеристиками.

В дослідженнях задіяли порошок титанового сплаву TA15 з гранулами сферичної форми розміром від 45 до 113 мкм, який виготовлений методом плазмової плавки та відцентрового розпилення (технологія PREP).

Для визначення структур металу надруковано дослідну партію зразків розміром 25x25 мм з висотою 7,5 мм. Задіяли технологічні режими друку: швидкість променя 500 мм/с, товщина шару порошку 100 мкм, стратегія сканування двоспрямована, крок зміщення траєкторії променя змінювали від 0,1 до 0,25 мм з інтервалом 0,05 мм, густину енергії променя змінювали від 20 до 70 Дж/мм³ для кожного значення кроку зміщення

траєкторії. Для дослідження механічних характеристик надруковано партію зразків шириною 12 мм, довжиною 62 мм та висотою 14,5 мм. Режим друку: густина енергії 40 Дж/мм³, швидкість променя 500 мм/с, крок зміщення траєкторії 0,2 мм.

Металографічними дослідженнями встановлено, що отримані зразки із сплаву TA15 мають мікроструктуру дендритного типу з $\alpha'+\beta$ пластинчасто-голчастою морфологією. Її дисперсність та форма виділень α' -фази змінюється в залежності від величини питомої енергії, що вводиться у матеріал в процесі друку. При її низьких значеннях в зоні, що прилягає до підкладки, спостерігається формування несучільностей неправильної форми.

Зростання енергії приводить до покращення проплавлення часток у безпосередній близькості до підкладки і більшої однорідності мікроструктури, але надмірна інтенсивність плавлення приводить до формування грубих дендритів та вторинної усадочної пористості. З точки зору формування сприятливої мікроструктури режим друку з кроком сканування 0,2 мм та енергією променя 40 Дж/мм³ дозволяє отримати дисперсну мікроструктуру матеріалу, в якому відсутні непроплавлення та мікропори усадки (рис. 12а).

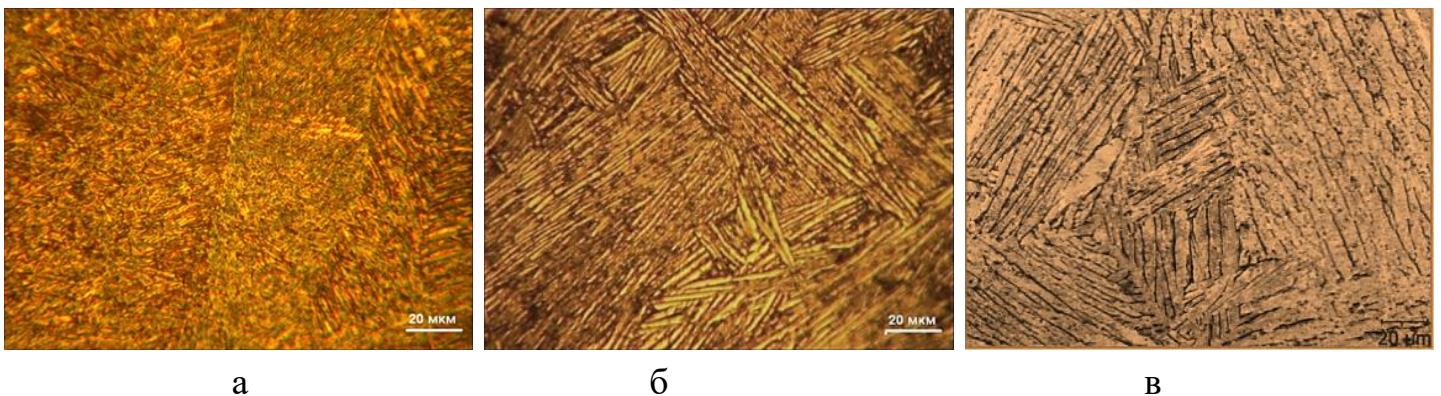


Рис. 12. Мікроструктура зразків із сплаву TA15, які виготовлені методами: а – електронно-променевого друку (ЕПД), б – електронно-променевої плавки (ЕПП), в - електронно-променевої плавки з термомеханічною обробкою (ЕППД)

На рис. 12 наведені порівняльні структури зразків, отриманих за технологією електронно-променевого друку (ЕПД) (рис.12а), електронно-променевої плавки (ЕПП) (рис. 12б) та електронно-променевої плавки з термомеханічною обробкою (ЕППД) (рис. 12в). Мікроструктура матеріалів відрізняється як на рівні дендритної структури, так і на рівні морфології виділень кристалітів α та β фаз. Зразки надрукованого (рис. 12а) та деформованого металу (рис. 12в) демонструють більш витончену мікроструктуру порівняно з литим металом (рис. 12б). Мікроструктура більш однорідна зі зменшеним розміром зерен, що покращує загальні механічні характеристики сплаву. Друкований зразок (рис. 12а) демонструє унікальну мікроструктуру, яка є результатом процесу пошарового нанесення, що властиве адитивному виробництву. Зерна зразку дрібні та стовпчасті, орієнтовані вздовж напрямку формування. Така орієнтація зумовлена швидким охолодженням і твердінням під час процесу 3D-друку, що сприяє спрямованому росту зерна. Мікроструктура незмінна в усьому зразку, без значних дефектів або варіацій розміру зерна, що вказує на стабільний і контрольований процес друку та дозволяє отримати підвищений комплекс механічних характеристик сплаву TA15.

Винайдений режим друку забезпечує отримання вищих значень меж міцності та текучості відповідно на 27% та 24% у порівнянні з сплавом отриманим за традиційною тех-

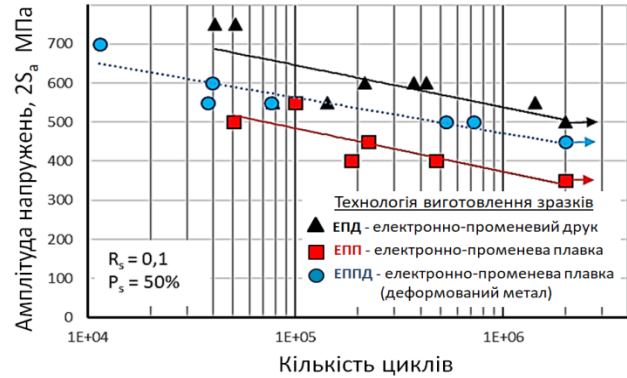
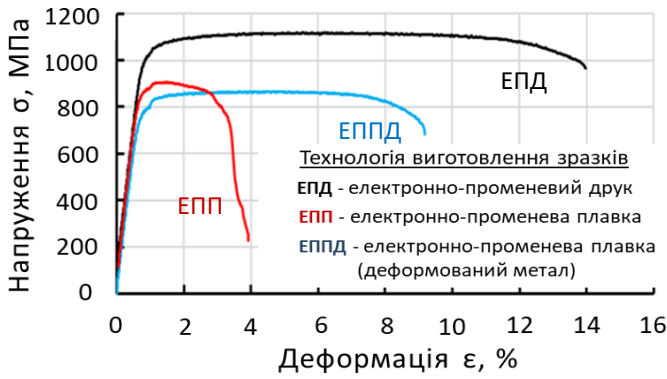


Рис. 13. Діаграми деформування

Рис. 14. SN діаграма зразків з TA15

нологією електронно променевої плавки (рис. 13, табл. 2). Відносне видовження матеріалу, виготовленого адитивним методом, вище у 3,2 рази у порівнянні з литим металом. Це пов'язано з формуванням більш дисперсної мікроструктури. Проте внаслідок формування однонаправленої дендритної структури спостерігається зниження результатів випробування на ударний згин при несприятливій орієнтації зразка по відношенню до напрямку прикладення навантаження.

Табл. 2. Механічні характеристики зразків з TA15

Технологія виготовлення зразків	Границя міцності σ_b , МПа	Границя плинності $\sigma_{0,2}$, МПа	Модуль Юнга E , ГПа	Відносне видовження δ , %
ЕПД	1139	1050	122	16,5
ЕПП	895	849	134	5,1
ЕППД	899	825	120	9,3

Дослідженнями опору втоми визначено, що крива втоми (рис. 14) зразків 3Д друківаного металу титанового сплаву TA15 на всій базі багатоциклової втоми $5 \cdot 10^4 \dots 2 \cdot 10^6$ циклів змін напружень знаходиться вище кривої втоми деформованого та литого металу. Обмежена границя витривалості на базі 2 мільйонів циклів друківаного металу на 32% та 11% перевищує відповідні показники для литого та деформованого металу.

Адитивна електронно-променева технологія дозволяє отримувати компоненти з підвищеною стійкістю до втоми, що актуально для виробів авіаційної галузі та медичних імплантатів.

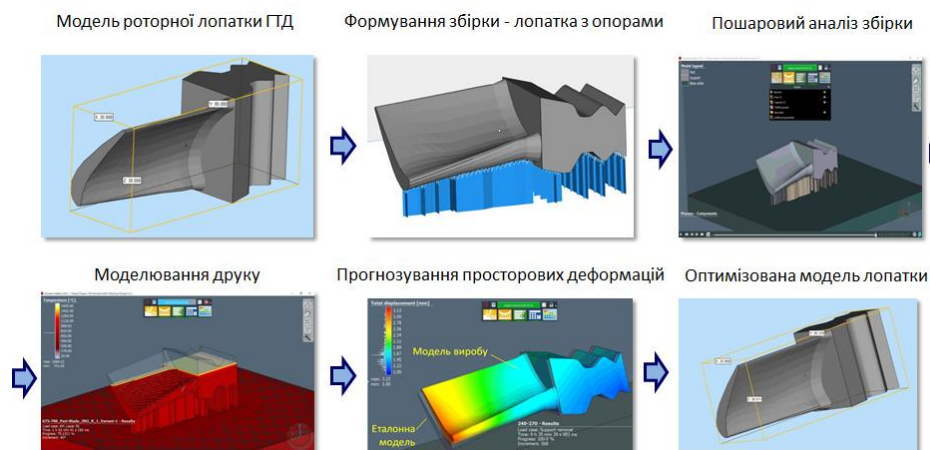


Рис. 15. Процес створення моделі Лопатки ГТД

У п'ятому розділі розроблені та оптимізовані цифрові моделі, відпрацьовані технологічні прийоми друку виробів для потреб авіації та медицини.

Процес створення лопатки ГТД надано на рис. 15. Цифрову модель проектували в CAD програмі. В програмі Materialise Magics сформовано збірку - виріб з

технологічними опорами.

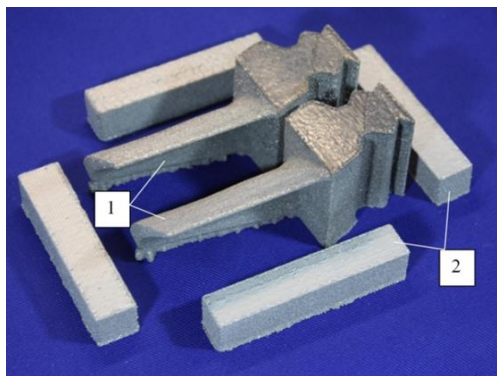


Рис. 16. Вироби з TA15:
1 – лопатка ГТД,
2 – дослідні зразки

В програмі Simufact Additive здійснено пошаровий аналіз збірки, моделювання процесів друку, обчислення деформацій і коригування моделі, її порівняння з еталонною моделлю. Файл скорегованої моделі експортується в форматі stl та приймається до друку.

В програмі Materialise Magics створена збірка з лопаток ГТД та контрольних зразків. З порошку титанового сплаву TA15 за визначеними у четвертому розділі технологічними режимами надруковані вироби (рис. 16). Для друку застосовані оптимізовані моделі. Контрольний зразок був випробуваний. Визначено, що структура сплаву є тонкопластинчастою та двофазною з розміром

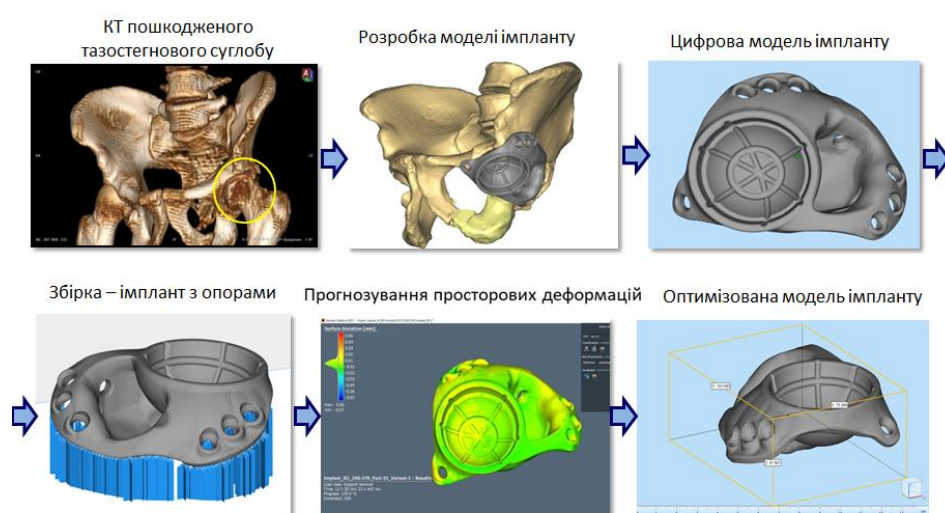


Рис. 17. Процес створення моделі імплантату

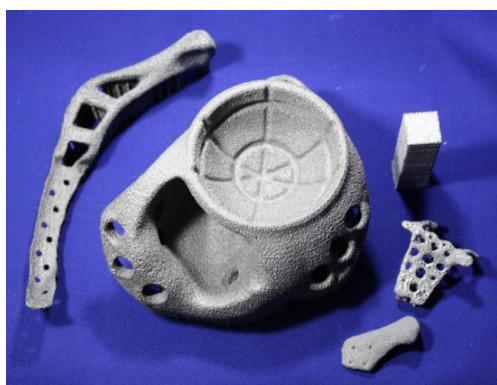


Рис. 18. Індивідуальні імплантати із сплаву TA15

но проектування індивідуальних імплантатів (рис. 17). Роботи проводили спільно з Ірпінським військовим госпіталем та компанію "Materialise Україна". Досліджено комп'ютерну томограму хворого з пошкодженням функції ходи. Спільно з компанією Materialise Україна у програмі Materialise Mimics здійснено моделювання імплантату. В програмі Materialise Magics сформована збірка - імплантат з технологічними опорами. В програмі Simufact Additive отримано оптимізовану модель імплантату. В програмі Materialise Magics створена збірка з імплантату кульшового суглобу, щелепно-лицевого імплантату, імплантатів біомедичного призначення та

контрольного зразка. Відповідно до визначених у четвертому розділі режимів з титанового сплаву TA15 виготовлено індивідуальні імплантати (рис. 18).

голчастих кристалів α' - фази до 1,8 мкм. Хімічний склад відповідає TA15, твердість за Роквеллом становить біля 40 HRC, пористість не перевищує 0,45%.

Надзвичайно актуальним і гострим в умовах воєнних дій в Україні є забезпечення медичної галузі надійними, конкурентоспроможними вітчизняними імплантатами та протезами. Для вирішення задачі здійс-

ВИСНОВКИ

За результатами проведених досліджень створено електронно-променевою технологію пошарового виготовлення виробів з металевих порошкових матеріалів. Технологія дозволяє отримувати за комп'ютерною моделлю виробу складної форми з прогнозованими властивостями.

Основні наукові та практичні результати роботи сформулювали наступним чином:

1. Розроблено адитивне електронно-променеове устаткування для виготовлення металевих виробів пошаровим методом, створено прилад для відеоспостереження процесів наплавлення в режимі реального часу, винайдено методи юстування електронно-променевої гармати та калібрування розгортки електронного променя.

2. Створено та впроваджено програмно-апаратну платформу управління адитивним виробничим процесом, яка складається з апаратного контролера та пакета прикладного програмного забезпечення.

3. Досліджено застосування новітніх НДН порошків титанових сплавів VT20, з яких виготовлені та випробувані експериментальні вироби. Виявлено, що мікроструктура наплавленого металу є безпористою, дрібнодисперсною та рівномірною за всім перерізом шліфу і являє собою голчасту α -фазу титану з малим вмістом β -фази. Мікротвердість складає біля HV 4000 МПа. Відзначено рівномірний розподіл легуючих елементів та знижений вміст алюмінію внаслідок його летючості.

4. Визначено вплив технологічних параметрів адитивного процесу на властивості виробів.

Для титанових сплавів Ti-6Al-4V і TA15 з точки зору формування сприятливої мікроструктури режим наплавлення з густиною енергії від 40 до 45 Дж/мм³ та кроком зміщення траєкторії 0,2 мм дозволяє отримати дисперсну мікроструктуру матеріалу, в якому відсутні непроплавлення та мікропори усадки. Цей режим адитивного процесу дозволяє набути виробам із сплаву титану TA15 вищих значень межі міцності та текучості відповідно на 27% та 24% у порівнянні із зразками, отриманими із литого металу титанового сплаву TA15, який одержаний за традиційною технологією електронно-променевої плавки. Відносно видовження матеріалу, виготовленого адитивним методом, вище у 3,2 рази у порівнянні з литим металом. Обмежена границя витривалості на базі 2 мільйонів циклів друкованого металу на 32% та 11% перевищує відповідні показники для литого та деформованого металу.

5. Розроблено оптимізовані цифрові моделі, за якими з титанового сплаву TA15 надруковані лопатки ГТД, індивідуальні імплантати та зразки для дослідження властивостей матеріалу. Визначено, що структура металу є тонкопластинчастою та двофазною з розміром голчастих кристалітів α' - фази до 1,8 мкм, твердість становить біля 40 HRC, пористість не перевищує 0,45%.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Нестеренков В.М., Хрипко К.С., Орса Ю.В., Матвейчук В.А. (2018) Электронно-лучевые технологии в авиастроении, Наука про матеріали: досягнення та перспективи. У 2-х т. Т. 2 / Редкол.: Л.М. Лобанов (голова) та ін.; НАН України. – Київ: Академперіодика, 2018. – 395 с., 2 с. іл., с. 192-221, ISBN 978-966-360-371-1 (Розділ у книзі).
2. **Matviichuk V.A.** & Nesterenkov V.M. (2025) Application of additive electron-beam technologies for aviation and medical needs. *Welding and Related Technologies* / Edited by Krivtsun et al. (Eds), CRC Press – 226 pp., p. 7-13, ISBN 978-1-032-85176-1 (Розділ у книзі).

Статті проіндексовані в міжнародних наукометричних базах даних:

3. **Matviichuk V.**, Nesterenkov V., Berdnikova O. (2022) Determining the influence of technological parameters of the electron-beam surfacing process on quality indicators, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1, 21-30. (Scopus, Web of Science).
4. **Matviichuk V.**, Nesterenkov V., Berdnikova O. (2024) Determining the influence of technological parameters of electron beam surfacing process on the microstructure and microhardness of Ti-6Al-4V alloy, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1, 15-21. (Scopus, Web of Science).
5. Akhonin, S., Nesterenkov, V., Pashynskiy, V., **Matviichuk, V.**, Motrunich, S., Berezos, V., & Klochkov, I. (2024). Determining technological parameters for obtaining ta15 titanium alloy blanks with improved mechanical characteristics using the electron-beam 3D printing method. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(12 (129), 36–45. (Scopus, Web of Science).
6. Nesterenkov, V., Akhonin, S., Klochkov, I., **Matviichuk, V.**, Berezos, V., & Motrunich, S. (2025) High cyclic fatigue behavior of 3D-printed titanium alloy TA15, Welding in the World. (Scopus, Web of Science).

Статті в наукових фахових виданнях:

7. Назаренко О.К., **Матвейчук В.А.**, Галушка В.В. (2011) Моделирование влияния высоковольтных кабелей на пульсации тока в сварочных пушках. Автоматическая сварка, 5, 32-35.
8. Назаренко О.К., **Матвейчук В.А.** (2011) Ограничение перенапряжений в высоковольтных цепях после разрядов в сварочной пушке. Автоматическая сварка, 11, 40-43.
9. Назаренко О.К., **Матвейчук В.А.** (2012) Влияние нарушений аксиальной симметрии сварочной пушки на положение фокусного пятна, Автоматическая сварка, 7, 47-51.
10. **Матвейчук В.А.** (2016) Системы визуализации процессов сварки в режиме реального времени с помехозащищенным каналом передачи сигнала вторичной электронной эмиссии, Автоматическая сварка, 5-6, 64-68.
11. Нестеренков В. М., **Матвейчук В. А.**, Русыник М. О., Овчинников А. В. (2017) Применение аддитивных электронно-лучевых технологий для изготовления деталей из порошков титанового сплава ВТ1-0, Автоматическая сварка, 3, 5-10.
12. **Matviichuk V.A.**, Nesterenkov V.M., Rusynik M.O. (2018) Application of additive electron-beam technologies for manufacture of metal products, Electrotechnica &Electronica E+E, Vol.53 № 3-4/2018, p. 69-73.
13. Нестеренков В.М., Хрипко К.С., **Матвейчук В.А.** (2018) Электронно-лучевые технологии сварки, наплавки, прототипирования – результаты и перспективы, Автоматическая сварка, 11-12, 142-150.
14. Нестеренков В.М., **Матвейчук В.А.**, Русыник М.О., Янко Т.Б., Дмитренко А.Е. (2019) Микроструктура сплавов титана ВТ20, полученных методом послойной электронно-лучевой наплавки с применением отечественных порошковых материалов, Автоматическая сварка, 9, 7-13.
15. **Матвійчук В.А.**, Нестеренков В.М. (2020) Адитивне електронно-променеове обладнання для пошарового виготовлення металевих виробів із порошкових матеріалів, Автоматичне зварювання, 2, 44-49.

16. Нестеренков В.М., Русиник М.О., Берднікова О.М., **Матвійчук В.А.**, Страшко В.Р. (2020) Мікроструктура зразків титанового сплаву марки Ti6Al4V отриманих методом пошарового електронно-променевого наплавлення дротом, Автоматичне зварювання, 5, 31-36.
17. **Матвійчук В.А.**, В.М. Нестеренков, О.М. Берднікова (2022) Адитивна електронно-променева технологія виготовлення металевих виробів із порошкових матеріалів, Автоматичне зварювання, 2, 16-25.
18. **Матвійчук В.А.** (2024) Компенсація просторової деформації у виробках при адитивному електронно-променевому наплавленні, Автоматичне зварювання, 6, 30-34.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

19. **Матвейчук В.А.** (2016) Системы визуализации процессов сварки в режиме реального времени с помехозащищенным каналом передачи сигнала вторичной электронной эмиссии, Международная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ», Киев, 13-15 июня 2016 г., тезисы докладов
20. Нестеренков В.М., **Матвейчук В.А.** (2016) Применение порошков титана сферической и несферической формы в аддитивных процессах с использованием электронного луча, IV міжнародна науково-практична конференція «Титан 2016:виробництво та використання в авіабудуванні» 3-4 листопада 2016 р., м. Запоріжжя, Україна, тези доповідей
21. Нестеренков В. М., **Матвейчук В. А.**, Русыник М. О. (2017) Принципы получения промышленных изделий методом быстрого прототипирования с применением электронно-лучевых технологий, Восьмая международная конференция «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов» LTWMP, г. Одесса, 11-15 сентября 2017 г., Сборник трудов, 73-77.
22. **Матвейчук В.А.** (2018) Применение аддитивных электронно-лучевых технологий для производства изделий из титановых сплавов, XVI международная конференция «Ti-2018 в СНГ», 18–21 апреля 2018г. Минск, Беларусь, тезисы докладов
23. **Matviichuk V.A.**, Nesterenkov V.M., Rusynik M.O. (2018) Application of additive electron-beam technologies for manufacture of metal products, 13-th International conference on electron beam technologies (EBT 2018), 18-22 June, Varna, Bulgaria, Scientific Program, p.26
24. Нестеренков В. М., **Матвейчук В. А.**, Русыник М. О., (2019) Специализированное технологическое электронно-лучевое оборудование для реализации аддитивного процесса послойного изготовления изделий из металла с применением порошковых материалов, Девятая международная конференция «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов» LTWMP, г. Одесса, 9-13 сентября 2019, Сборник трудов, 84-88.
25. Нестеренков В.М., **Матвейчук В.А.**, Русыник М.О., Янко Т.Б., Дмитренко А.Е. (2019) Микроструктура сплавов титана VT20, полученных методом послойной электронно-лучевой наплавки с применением отечественных порошковых материалов, Девятая международная конференция «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов» LTWMP, г. Одесса, 9-13 сентября 2019, Сборник трудов, 89-94.
26. **Матвійчук В.А.**, Нестеренков В.М., Берднікова О.М., Олексієнко Т.О. (2021) Технологія електронно-променевого пошарового наплавлення металевих виробів із порошкових матеріалів, Десята міжнародна конференція «Променеві технології в зварюванні і обробці матеріалів» LTWMP, м. Одеса, 6-10 вересня 2021 р., Збірка тез доповідей, с.21.

27. **Матвійчук В.А.**, Нестеренков В.М., Берднікова О.М. (2023) Вплив параметрів друку на властивості виробів з титанового сплаву Ti-6Al-4V отриманих за адитивною електронно-променевою технологією, Науково-технічна конференція «Сучасні напрями розвитку адитивних технологій» присвячена 105-й річниці від дня народження академіка Бориса Патона, м. Київ, 27 листопада 2023 р., Збірка тез доповідей, с.15
28. **Матвійчук В.А.**, Нестеренков В.М., Ахонін С.В., Пашинський В.В. (2023) Оптимізація технологічних параметрів друку виробів з порошків титанових сплавів TA15 за адитивною електронно-променевою технологією, Науково-технічна конференція «Сучасні напрями розвитку адитивних технологій» присвячена 105-й річниці від дня народження академіка Бориса Патона, м. Київ, 27 листопада 2023 р., Збірка тез доповідей, с.30
29. Овчинников О.В., **Матвійчук В.А.**, Єфанов В.С., Хазнаферов М.В., Коваленко Т.О. (2023) Електронно-променевий 3D друк сферичними порошками з низькомодульного біоінертного сплаву на основі системи металів цирконій–титан–ніобій, Науково-технічна конференція «Сучасні напрями розвитку адитивних технологій» присвячена 105-й річниці від дня народження академіка Бориса Патона, м. Київ, 27 листопада 2023 р., Збірка тез доповідей, с.32
30. **Matviichuk V.A.**, Nesterenkov V.M. (2024) Application of additive electron-beam technologies, VII International conference on welding and related technologies (WRT 2024), 7-10 жовтня 2024 р., м. Яремче, Україна. Збірка тез доповідей.

АНОТАЦІЯ

Матвійчук В.А. Адитивні електронно-променеві технології виготовлення металевих виробів методом пошарового наплавлення із застосуванням порошкових матеріалів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології» – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ, 2025.

Дисертаційна робота присвячена створенню обладнання та процесів виготовлення металевих виробів із порошкових матеріалів за адитивною електронно-променевою технологією.

В роботі надано принцип роботи та склад адитивного устаткування, принцип управління обладнанням, методи відеоспостереження за процесами наплавлення в режимі реального часу. Вивчено вплив магнітного поля Землі на просторове положення електронного променя, створені методи юстування положення електронно-променевої гармати, визначені методи калібрування розгорток електронного променя. Створено дослідне адитивне устаткування – промисловий зразок електронно-променевого 3D принтера.

Визначено загальні підходи до управління та створено програмно-апаратну платформу управління адитивними виробничими процесами.

Досліджено застосування новітніх HDH металевих порошкових матеріалів вітчизняного виробництва із титанових сплавів BT1-0 та BT20, з яких адитивним методом виготовлено та досліджено експериментальні зразки.

В роботі визначено технологічні процеси, послідовність операцій, здійснено аналіз параметрів 3D друку та їх взаємозв'язок, зазначено етапи адитивного процесу.

Визначено вплив технологічних параметрів друку на якісні показники виробів з ти-

танових сплавів системи Ti-6Al-4V (сплав VT6) та Ti-6,5Al-2Zr-1Mo-1V (сплави VT20, TA15), винайдено раціональні параметри друку.

Розроблено цифрові моделі, оптимізовано їх формоутворення, з титанового сплаву TA15 надруковано лопатки ГТД та контрольні зразки, властивості яких було досліджено. Створено цифрові моделі індивідуального медичного імплантату кульшового суглобу та інших імплантатів, які були надруковані з титанового сплаву TA15.

Ключові слова: адитивні технології, електронний промінь, наплавлення, порошкові матеріали, титановий сплав, технологічні параметри, пошаровий друк, 3D принтер

ABSTRACT

Matviichuk V.A. Additive electron-beam technologies for the production of metal products by the method of layer-by-layer melting using powder materials. – Manuscript.

The thesis for a Scientific Degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.03.06 – Welding and Related Processes and Technologies. – E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv, 2025.

The dissertation is devoted to the development of equipment and methods for the production of metal products from powder materials using additive electron beam technology.

The technological processes of additive electron beam production have been defined in the study. The sequence of technological operations has been specified, the technological parameters of surfacing and their interrelationship have been analyzed, and the stages of additive manufacturing have been determined.

The principle of operation and the composition of the additive equipment have been established, the equipment control principle has been devised, and methods for real-time video surveillance of surfacing processes have been developed. The influence of the Earth's magnetic field on the spatial position of the electron beam has been studied, methods for adjusting the position of the electron beam gun have been proposed, and techniques for calibrating electron beam sweeps have been determined. Experimental additive equipment was developed, including an industrial prototype of an electron-beam 3D printer.

The general principles of additive process control have been defined, and a hardware and software platform for additive manufacturing has been created.

Advanced HDH metal powder materials of domestic production, based on titanium alloys VT1-0 and VT20, were studied. Experimental samples were produced and tested using the additive method.

A study of the additive electron beam process was conducted. The influence of technological process parameters of electron beam surfacing on the quality characteristics of products made from titanium alloys of the Ti-6Al-4V and Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V systems (VT20, TA15 alloys) with enhanced mechanical properties was determined.

Methods for developing product models and optimizing their geometry were defined. Digital models were created, and the formation of gas turbine blades was studied. Gas turbine engine (GTE) blades were printed using the TA15 titanium alloy. Additionally, methods for designing custom medical implants were developed, a digital model of a hip joint implant was created, and its shaping was optimized. Medical implants were printed using the TA15 titanium alloy.

Keywords: additive technologies, electron beam, melting, powder materials, titanium alloy, technological parameters, layer-by-layer printing, 3D printer