

# АДИТИВНА ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВА ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ ІЗ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

В.А. Матвійчук, В.М. Нестеренков, О.М. Берднікова

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

Метою роботи є створення адитивної електронно-променевої технології пошарового виготовлення металевих деталей з порошкових матеріалів. Для проведення досліджень виготовлений макет адитивного устаткування, розроблена програмно-апаратна платформа адитивного виробництва, винайдені технологічні прийоми та режими друку виробів заданої форми з прогнозованими властивостями міцності. Адитивним методом надруковані 25 експериментальних зразків для подальших випробувань. Кожному із виробів визначені швидкість переміщення променя, його потужність та струм динамічного фокусування. Досліджено вплив основних параметрів технологічного процесу наплавлення на формування та особливості структури поверхонь, хімічний склад зразків. Встановлено, що хімічний склад виробів відповідає складу сировини за винятком вмісту алюмінію, який занижений на 0,6...1,96 % відносно хімічного складу порошку. Для усунення цього недоліку необхідно в порошках титанових сплавів підтримувати вміст алюмінію на вищому рівні. За результатами досліджень на створеному обладнанні за комп'ютерними моделями надруковані вироби промислового та медичного призначення, режими друку яких оптимізовані. Із порошків титанових сплавів виготовлені макети статорних лопаток газотурбінного авіаційного двигуна, імплант черепної коробки людини та біопротези. Бібліогр. 8, табл. 4, рис. 15.

*Ключові слова:* адитивні технології, 3D принтер, електронно-променеве наплавлення, металевий порошок, титановий сплав, хімічний склад, мікрорельєф поверхні

Інноваційні технології пошарового виготовлення виробів методом швидкого прототипування відкривають нові можливості для виробництва деталей заданої форми з прогнозованими властивостями.

Процес створення виробів таким методом із застосуванням електронного променя відносно новий, але успішно відкрив великі перспективи для виробництва широкої номенклатури виробів промислового та медичного призначення. В основу покладена операція пошарового сплавлення металів в вакуумі електронним променем. Цей підхід відрізняє швидкий перехід до виробництва тривимірних виробів безпосередньо від системи автоматизованого проектування з можливістю використання широкого спектру металів і сплавів, в тому числі тугоплавких та хімічно активних [1].

В Україні та світі є своєчасним створення адитивних технологій вирощування виробів методом електронно-променевого наплавлення. Оскільки вітчизняного устаткування не існує, актуальним є створення обладнання та програмного забезпечення для нього для реалізації адитивного виробництва, орієнтованого на впровадження на підприємствах авіакосмічної промисловості та турбінобудування, а також для потреб біомедичної галузі.

Фахівцями Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України проведені дослі-

дження в сфері розробки технологій і обладнання для адитивного виробництва металевих деталей методом швидкого прототипування.

**Об'єкт, мета, задачі та результати досліджень.** Результати попередніх науково-дослідних робіт виявили можливість створення промислового обладнання для електронно-променевого сплавлення металевих порошкових матеріалів, а також можливість виготовлення адитивним методом виробів складної форми [2].

Авторами поставлена мета розробити адитивні електронно-променеві технології виготовлення виробів авіакосмічної промисловості і турбінобудування та створити макет адитивного обладнання.

Об'єктом досліджень були електронно-променеві технології вирощування виробів із застосуванням металевих порошкових матеріалів. Основні задачі – розробка макету адитивного устаткування та програмного забезпечення, створення технології друку виробів, виготовлення експериментальних зразків, дослідження їх властивостей та виробництво деталей промислового призначення.

В результаті виконання проекту створене унікальне для України обладнання для реалізації адитивного електронно-променевого виробництва, яке орієнтоване для впровадження на вітчизняних підприємствах авіакосмічної про-

Матвійчук В.А. – <https://orcid.org/0000-0002-9304-6862>, Нестеренков В.М. – <https://orcid.org/0000-0002-7973-1986>,

Берднікова О.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9754-9478>

© В.А. Матвійчук, В.М. Нестеренков, О.М. Берднікова, 2022

мисловості та турбінобудування: АТ «Мотор Січ», ДП «ЛРЗ «Мотор», ДП КБ «Південне» та ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект». Обладнання також актуальне для потреб біомедичної галузі та машинобудування.

**Технологія електронно-променевого наплавлення.** Технологія електронно-променевого наплавлення подібна технології селективного лазерного спікання, яка широко застосовується у промисловості. Головна відмінність полягає у використанні електронного променя як джерела енергії замість лазера. В основі технології лежить можливість застосування пучка електронів високої потужності для сплавлення металевих порошків у вакуумній камері з утворенням послідовних шарів, які повторюють контури цифрової моделі виробу. На відміну від технологій лазерного спікання, електронно-променевого наплавлення дозволяє збільшити продуктивність за рахунок високої потужності гармат і електромагнітної, а не електромеханічної, розгортки променя [2].

Технологія надає можливість впродовж всього циклу виробництва забезпечити термостабільний процес виготовлення деталей. Температура в шахті, де створюється виріб, підтримується внаслідок дії електронного променя як джерела енергії. Перед наплавленням шар порошку розігрівається до температури близько 700...1000 °С, що дозволяє створювати деталі з меншими залишковими напруженнями, викликаними градієнтом температур між вже охолодженими і ще гарячими шарами. Термостабільний процес унеможливує або значно зменшує утворення тріщин та дефектів формоутворення.

Крім того, повний переплав металевих порошків дозволяє отримати монолітні вироби, що забезпечує максимальну міцність. Готові вироби практично не відрізняються від литих деталей за механічними властивостями.

В процесі друку пристрій зчитує дані з файлу, що містить тривимірну цифрову модель виробу, та створює послідовні шари порошкового матеріалу. Контури шарів формуються сфокусованим електронним променем, який переплавляє металевий порошок в місцях зіткнення. Наплавлення проводиться в захищених вакуумних камерах, що надає можливість працювати з хімічно активними металами, чутливими до окислення, наприклад, з титаном та його сплавами [1].

Технологія пошарового електронно-променевого наплавлення в вакуумі дозволяє створювати щільні металеві вироби заданої форми з високою геометричною точністю [2].

**Адитивне електронно-променево устаткування.** Технології та обладнання, які створені колективом Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, з самого початку орієнтовані на

потреби підприємств України. Для виробництва передбачається задіяти необхідну виробнику сировину. Цей підхід дає можливість забезпечити виробництво деталей і вузлів виходячи із потреб споживача та в тісному контакті з ним. Технології, що розробляються, дозволять знизити терміни впровадження у виробництво нових видів продукції, розширити її асортимент, а також створювати принципово нові види виробів із заздалегідь прогнозованими властивостями, виробництво яких неможливо без застосування методів 3D друку [1].

В останні роки помітною є тенденція впровадження адитивних технологій у провідних вітчизняних компаніях авіакосмічної промисловості і турбінобудування: ДП «КБ «Південне», АТ «Мотор Січ» і ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» [2].

Для вирішення поставлених задач були проведені дослідження з використанням обладнання для 3D друку.

**Принцип роботи устаткування.** Створене обладнання діє у складі адитивного електронно-променевого устаткування для сплавлення металевих порошків матеріалів (рис. 1). Подача і дозування металевих порошків відбувається безпосередньо у вакуумній камері із бункерів, з яких металевий порошок надходить на робочий стіл під дією сил гравітації. За таким принципом подачі порошків застосування будь-яких механізмів дозування не передбачається. Після відбору певної кількості, порошок з бункерів автоматично подається насипом для підтримання достатнього рівня на столі.

Металевий порошок розплавляється під впливом електронного променя, який створюється електронно-променевою гарматою, де промінь фокусується і відхиляється відповідними системами.

Виріб формується пошарово, при цьому платформа, на якій вирощується деталь, опускається після формування кожного шару.

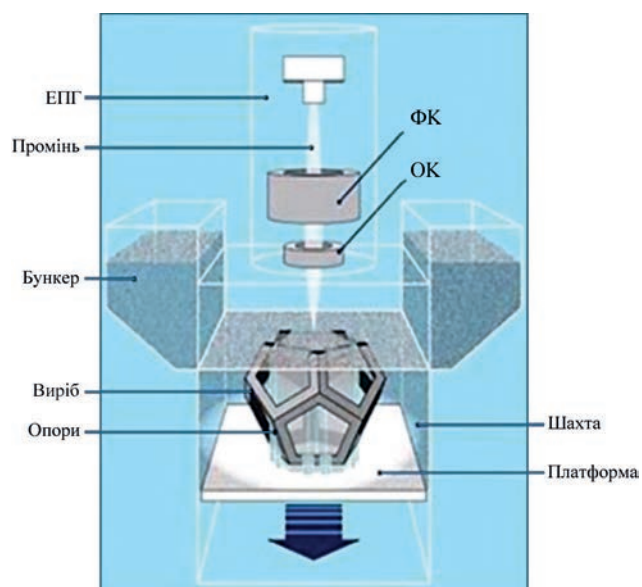


Рис. 1. Схема адитивного процесу

**Технологічне устаткування.** Для проведення досліджень був спроектований, виготовлений та налагоджений макет адитивного устаткування на базі малогабаритної установки для електронно-променевого зварювання типу СВ-212М.

Створене обладнання (рис. 2) складається із вакуумної камери 1, шахти 2, де знаходиться платформа 3 з палетою 10, на якій вирощується виріб. В бункерах 4 знаходиться металевий порошок, що подається насипом на стіл 5. Рейка 6 переміщується вздовж стола 5 та розподіляє металевий порошок на поверхні палети 10. Рейка закріплюється на направляючих 7. Переміщує рейку у горизонтальній площині актуатор 8 з електродвигуном 9.

Платформа 3 з палетою 10 знаходяться в шахті 2 та переміщуються вздовж вертикальної вісі за допомогою пінолі 11, яка закріплена на рейці 12, встановленої на кронштейнах 13. Управляє переміщенням електродвигун 14.

Рефлектор 15 захищає вакуумну камеру від дії високої температури, яка виникає на поверхні шару, де формується виріб.

Фото створеного адитивного устаткування надане на рис. 3.

Обладнання (рис. 3) складається із малогабаритної вакуумної камери 1 з механізмами переміщення

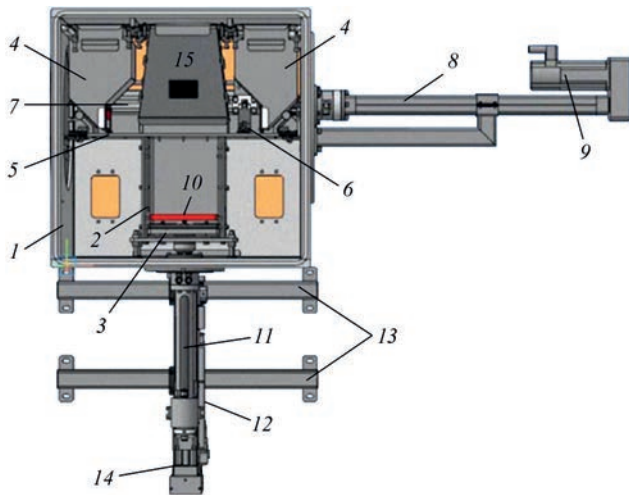


Рис. 2. Оснащення вакуумної камери (позначення 1–15 див. у тексті)



Рис. 3. Устаткування для електронно-променевого 3D-друку (позначення 1–9 див. у тексті)

платформи 8 та механізмами подачі і розподілу порошку 9. До складу енергоблоку устаткування входить електронно-променева гармата 2 та високовольтне джерело живлення 4. Електронно-променева гармата 2 розміщена на вакуумній камері. Вакуумна система устаткування забезпечує робочий тиск в камері краще ніж  $10^{-4}$  Торр. 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 напругу 60 кВ і струм пучка електронів до 100 мА. Підсилювачі сигналів розгортки 5 та динамічного фокусування 6 формують технологічні розгортки електронного променя та його фокусування. Устаткуванням управляє промисловий комп'ютер 7.

**Електрообладнання.** Для управління електронним променем та технологічним устаткуванням розроблене, змонтоване та налагоджене обладнання:

- Енергетичний блок, який складається з:
  - джерела високої напруги 60 кВ;
  - електронно-променевої гармати з високовольтним кабелем.
- Система управління розгортками, у складі:
  - двоканальний підсилювач сигналів розгортки;
  - підсилювач сигналів динамічного фокусування.
- Контролер МСР, який управляє процесом друку.
- Електропривід механізмів переміщення Siemens Sinamics S120 з електродвигунами Siemens Simotics 1FK7.
- Промисловий комп'ютер з операційною системою Windows 10.
- Шафа управління, де розташоване комутаційне обладнання та контролер МСР.
- Шафа управління вакуумною системою.

**Система управління.** Система управління адитивним устаткуванням (рис. 4) побудована на основі апаратного контролера МСР, який управляє струмом пучка електронів, його розгортками, фокусуванням та механізмами переміщення. Контролер взаємодіє з промисловим комп'ютером ПК, де формуються моделі виробів та створюється виконавчий файл, в якому прописані алгоритми побудови виробу. З комп'ютера виконавчий файл через мережу Ethernet надходить до контролера МСР, який управляє устаткуванням 3D принтера.

Контролер формує аналогові сигнали управління розгортками електронного променя (рис. 4), що надходять до підсилювачів розгортки, до яких підключені відхиляючі котушки ЕПГ.

Пучок електронів за осями X і Y відхиляється та створює зону наплавлення необхідної фор-

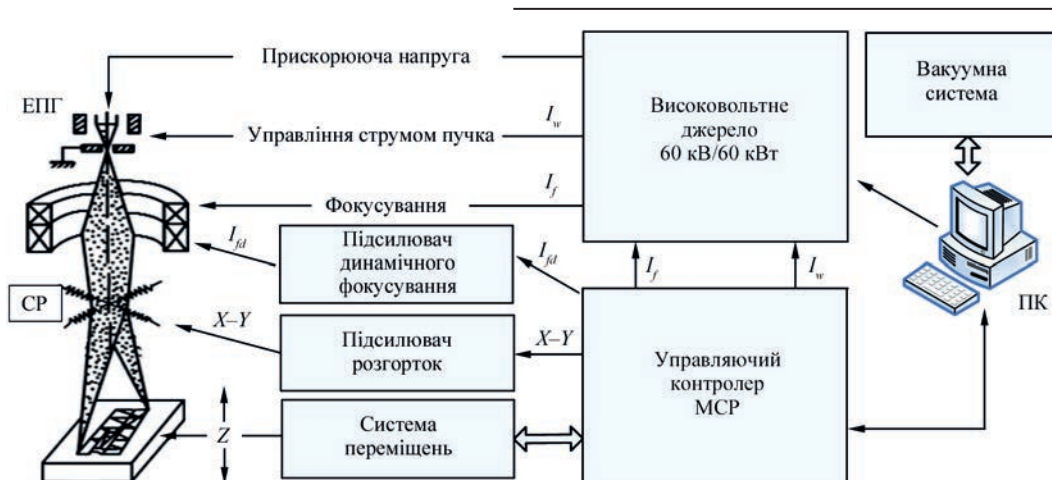


Рис. 4. Блок-схема управління обладнанням: ЕПГ – електронно-променева гармата; ФК – фокусувальна котушка; СР – система розгортки (інше див. у тексті)

ми. Процес наплавки виконується за програмою згідно з комп'ютерною моделлю виробу за попередньо встановленими технологічними режимами.

Також об'єктами управління є струм пучка електронів  $I_w$ , струм статичного  $I_f$  та динамічного  $I_{fd}$  фокусування.

Крім того, контролер управляє системою переміщень 3D принтера, яка включає механізми вертикального переміщення платформи (вісь Z) і горизонтального розподілу металевих порошків на платформі.

Промисловий комп'ютер управляє вакуумною системою устаткування та високовольтним джерелом живлення.

**Програмно-апаратна платформа.** Для управління адитивним устаткуванням спільно з компанією Materialise, Бельгія створена програмно-апаратна платформа, яка складається з управляючого контролера і пакета прикладного програмного забезпечення для реалізації адитивного виробництва [2].

Структура управляючої платформи та стан взаємодії між її компонентами надані на рис. 5 [2].

**Програмне забезпечення.** Створення 3D моделей виробів можливе із застосуванням будь-якого програмного забезпечення типу CAD. Аналіз і редагування моделей виконує програма Materialise Magics.

Підготовлена до друку комп'ютерна модель виробів далі обробляється програмою BuildProcessor, яка дозволяє розкласти моделі на шари, задати параметри і структуру їх формування, зазначити для кожного виробу налаштування потужності електронного променя, швидкості його переміщення, фокусування пучка електронів. Також програма надає можливість вибрати товщину шару, матеріал виробу та варіанти текстури заповнення шарів [2].

BuildProcessor формує виконавчий файл (job-file), який надходить до контролера MCP. Використовуючи job-file контролер скеровує процес друку.

Для управління устаткуванням під час друку застосовується програма MCP Operator interface, де задаються технологічні параметри обладнання, а також в режимі реального часу контролюється і відображається процес друку з можливістю корекції параметрів. Програма дозволяє обрати файл виробів, визначити час початку і кінця виробничого циклу та його стадію. Програма має тривимірну візуалізацію.

Налаштування управляючого контролера MCP та калібрування 3D принтера виконують в програмі Toolbox (рис. 5).

**Етапи адитивного виробництва.** Послідовність етапів адитивного електронно-променевого виробництва надана на рис. 6 [3].

Спочатку створюється 3D-модель об'єкта. Цю модель можна розробити з використанням систем автоматизованого проектування (CAD) або методами зворотної інженерії, наприклад, за допомогою об'єктного лазерного сканування. Отриманий CAD-файл необхідно перетворити у стандартний формат для адитивного виробництва, зазвичай це файл STL. Для максимального заощадження витрат та зменшення відходів слід оптимізувати розміщення та кількість об'єктів на платформі збірки. Зазвичай за один раз друкують кілька деталей. Комп'ютерна модель збірки ви-

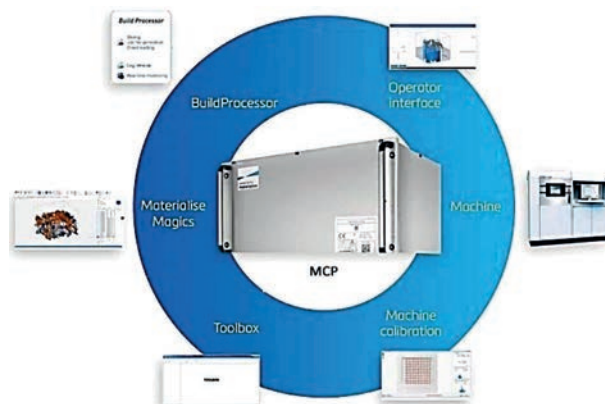


Рис. 5. Структура управляючої платформи

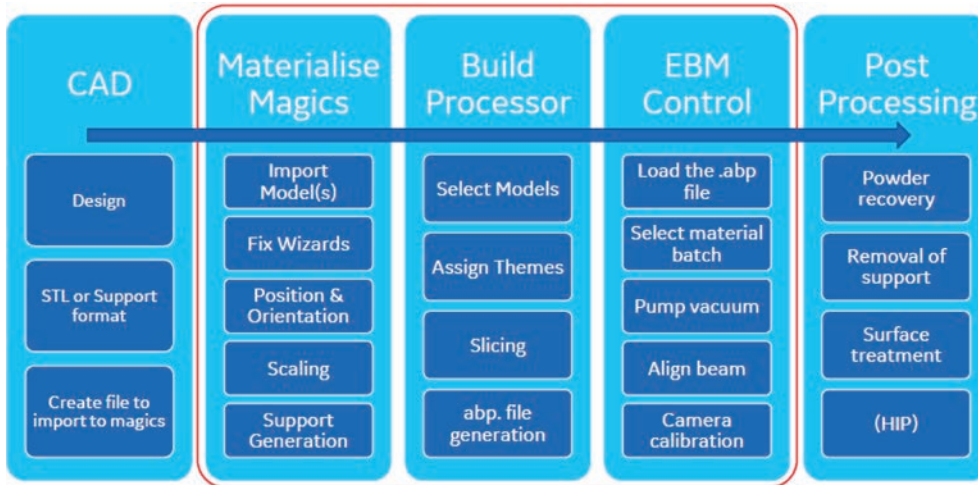


Рис. 6. Етапи адитивного електронно-променевого виробництва виробів з використанням програмних засобів «нарізується» на шари.

Наступний етап вимагає передачі файлу до адитивного устаткування та його налаштування.

Далі 3D принтер буде виробити шар за шаром. Товщина шару визначає остаточну якість і залежить від особливостей технології друку. Розмір виробів залежить від можливостей устаткування.

Після побудови і охолодження збірку можна зняти з устаткування.

Потім виконують очищення, полірування та оздоблення поверхні деталей. Також можлива додаткова їх обробка до потрібного стандарту. Це потребує використання інших машин та інструментів [4].

**Зразки виробів та їх дослідження.** На створеному макеті адитивного електронно-променевого обладнання надруковані експериментальні вироби для подальших випробувань.

Метою експерименту є дослідження впливу основних параметрів технологічного процесу наплавлення на якісні показники виробів [5].

Для цього передбачається надрукувати експериментальні зразки та випробувати їх властивості. Необхідно було дослідити: вплив параметрів друку на формування поверхонь виробів; особливості структури поверхонь; хімічний склад зразків; за результатами випробувань винайти оптимальні режими друку.

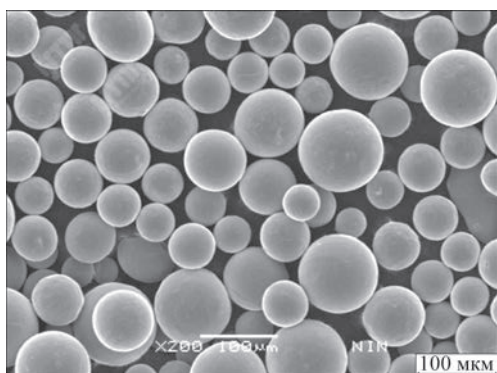


Рис. 7. Порошок Ti6Al4V ELI

**Порошок Ti6Al4V ELI.** Для друку зразків задіяний порошок титанового сплаву Ti6Al4V ELI виробництва китайської компанії Sino-Euro Materials Technologies of Xi'an Co., Ltd. Порошок отриманий методом плазмової плавки та відцентрового розпилення (технологія PREP) [6]. Гранули порошку мають сферичну форму з мінімальними дефектами (рис. 7). Порошок PREP є найкращим для електронно-променевого адитивного виробництва [7].

Технологічні характеристики та хімічний склад порошку Ti6Al4V ELI надані в табл. 1 та табл. 2, відповідно [8].

Таблиця 1. Технологічні характеристики порошку Ti6Al4V ELI

Фракція, мкм		45...106
Розподіл по фракціях (PSD), мкм	D10	53...58
	D50	85...90
	D90	125...130
Плинність, с/50 г		20...25
Щільність, г/см <sup>3</sup>		2,5...2,7
Вміст кисню, ppm		500...1800

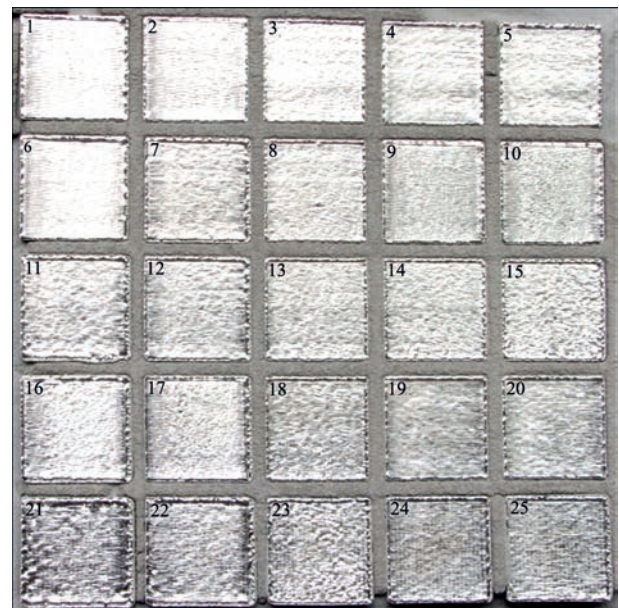


Рис. 8. Дослідні зразки

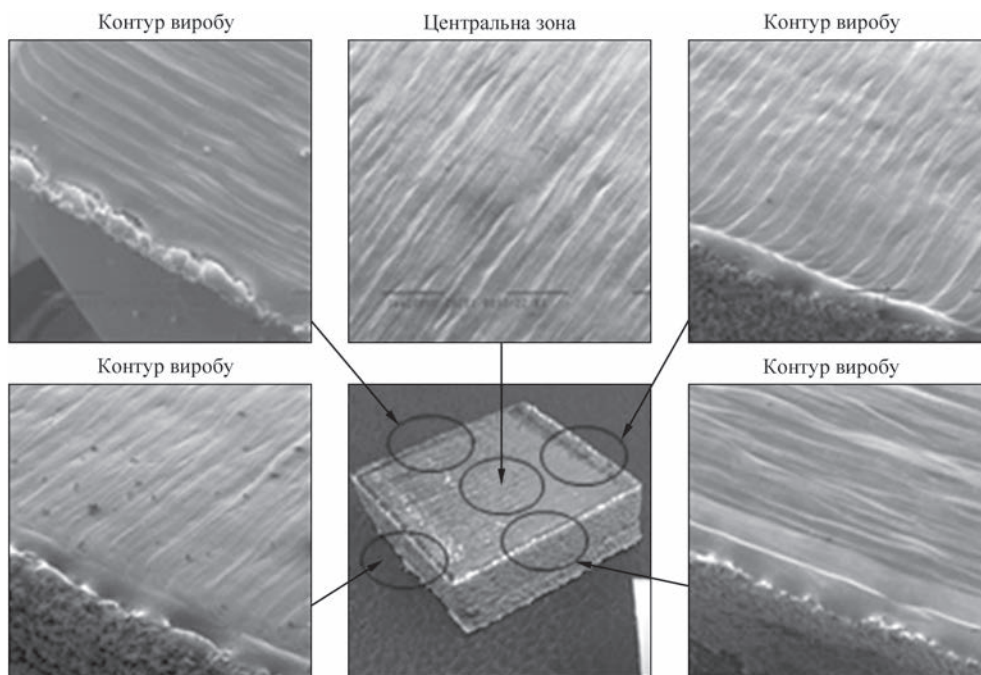


Рис. 9. Зразок виробу

**Дослідні зразки.** Із порошку титанового сплаву Ti6Al4V ELI для подальших випробувань виготовлені дослідні зразки виробів (рис. 8).

Отримані зразки (рис. 9) мають прямокутну форму розміром 24×24 мм та товщину 10 мм, з яких 5 мм складають технологічні опори і 5 мм – тіло виробу. Кількість надрукованих зразків – 25 шт.

Для друку зразків задані технологічні параметри:

- крок зміщення траєкторії променя – 0,2 мм;
- товщина шару порошку – 0,1 мм;
- стратегія сканування: двоспрямована з обертанням напрямку на 90° для кожного шару.

Для кожного зразка визначена швидкість переміщення променя та його потужність, заданий струм динамічного фокусування. Параметри друку зразків наведені в табл. 3.

**Вплив технологічних параметрів на формування виробів.** З метою вивчення впливу технологічних параметрів на формування виробів із порошку титанового сплаву Ti6Al4V ELI були проведені дослідження методом растрової електронної мікроскопії (РЕМ, скануючий електронний

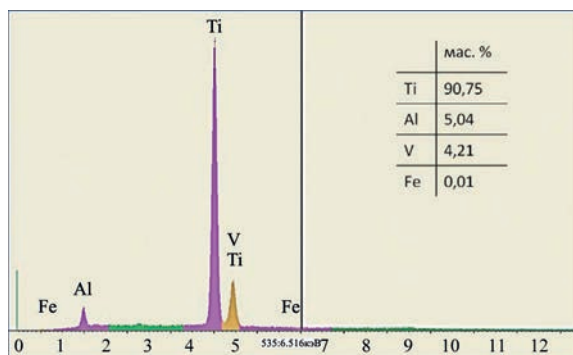


Рис. 10. Спектр зразка № 2

Таблиця 2. Хімічний склад порошку Ti6Al4V ELI

Склад легуючих елементів, мас. % часток				Склад домішок, мас. % часток		
Al	V	Fe	Ti	C	N	H
5,5...6,75	3,5...4,5	≤ 0,3	Основа	≤ 0,08	≤ 0,05	≤ 0,015

Таблиця 3. Технологічні режими наплавлення зразків

Номер зразка	Параметри променя		Струм динамічного фокусування, А
	Швидкість, мм/с	Потужність, Вт	
1	780	675	-0,9
2	780	675	-0,61
3	240	270	-0,9
4	540	495	-0,31
5	540	495	-0,61
6	780	675	-1,2
7	540	495	1,27
8	240	270	-0,61
9	780	675	-0,31
10	780	675	0,33
11	540	495	0,96
12	540	495	0,65
13	240	270	-0,31
14	240	270	0,33
15	240	270	0,65
16	780	675	0,65
17	780	675	0
18	240	270	-1,2
19	540	495	-0,9
20	540	495	-1,2
21	780	675	1,27
22	780	675	0,96
23	240	270	0
24	540	495	0
25	540	495	0,33

мікроскоп SEM-515 фірми Philips, Нідерланди). Було отримано дані про хімічний склад виробів. Досліджували зразки № 2, № 5 та № 8, які надруковані за різними режимами швидкості променя та його потужності: 780 мм/с/675 Вт (зразок № 2); 540 мм/с/495 Вт (зразок № 5); 240 мм/с/270 Вт (зразок № 8), але з однаковим значенням струму динамічного фокусування  $I_{df}$ : -0,61 А. Результати досліджень надані в табл. 4.

Встановлено, що вміст алюмінію занижений на 0,6...1,96 % відносно хімічного складу порошку (див. табл. 2). Можливо, відхилення пов'язане з підвищеною леткістю алюмінієвого пару в умовах наплавлення у високому вакуумі. Для усунення цього недоліку необхідно в порошках титанових сплавів підтримувати вміст алюмінію на вищому рівні. Вміст V відповідає складу порошку. Пік Fe у спектрі (рис. 10) практично відсутній (0...0,06 % Fe).

Подальше методом РЕМ для кожного зразка були отримані зображення мікрорельєфу поверхонь. Встановлено, що вироби характеризуються

Таблиця 4. Хімічний склад зразків

Номер виміру	Хімічні елементи, мас. %			
	Al	V	Fe	Ti
Зразок № 2				
1	5,04	4,21	0,01	90,75
2	4,85	4,33	0,06	90,76
3	5,09	4,40	0,02	90,48
Зразок № 5				
4	4,55	4,32	-	91,13
5	4,32	4,63	-	91,05
6	4,79	4,25	-	90,96
Зразок № 8				
7	5,00	4,28	-	90,72
8	5,17	4,04	-	90,79
9	4,90	4,38	-	90,72

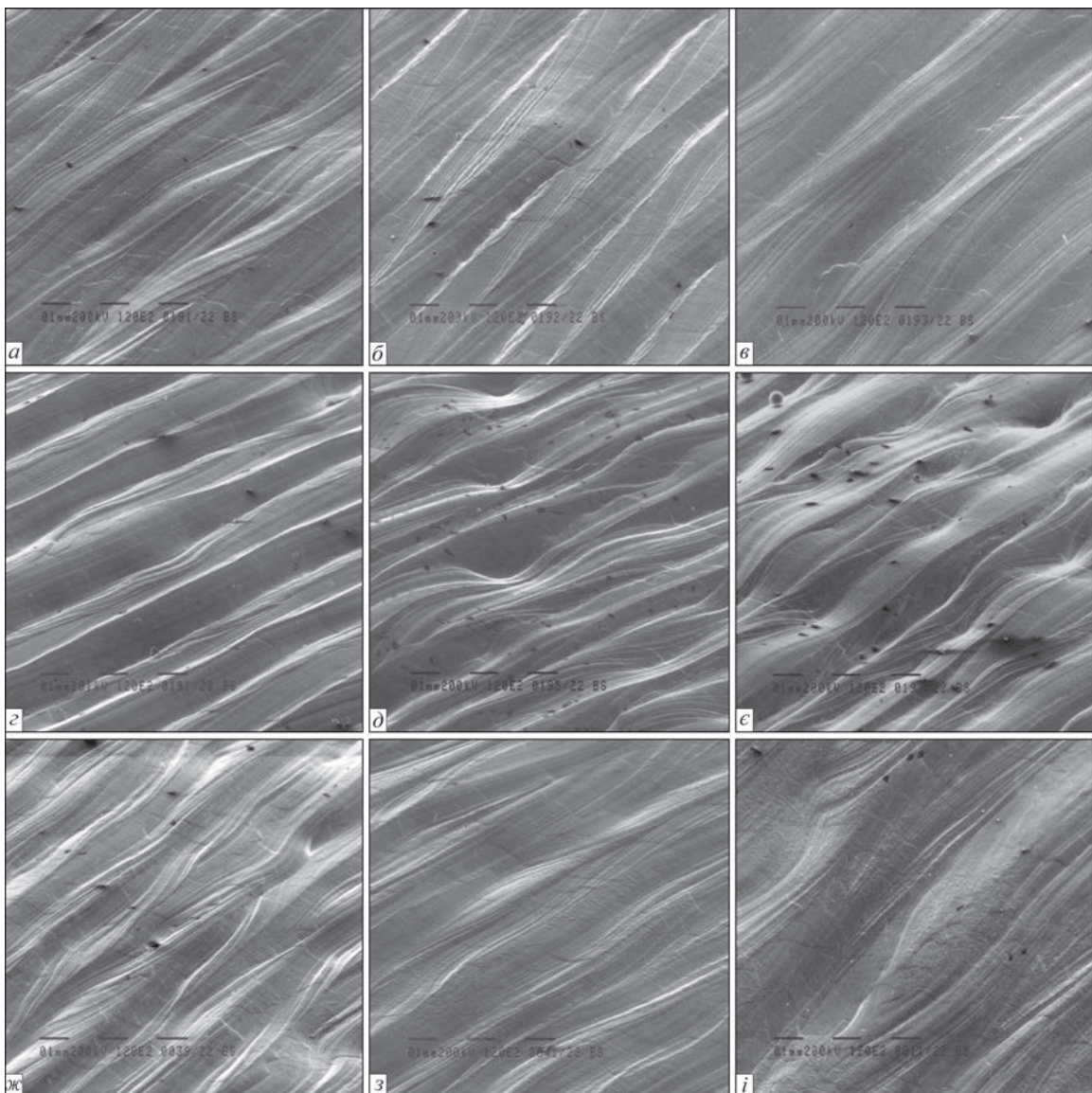


Рис. 11. Рельєф поверхні ( $\times 120$ ) у центральній зоні зразків при швидкості променя 780 мм/с та потужності 675 Вт в залежності від струму динамічного фокусування ( $I_{df}$ ): а -  $I_{df} = -1,2$  А (зразок № 6); б -  $I_{df} = -0,9$  А (зразок № 1); в -  $I_{df} = -0,61$  А (зразок № 2); г -  $I_{df} = -0,31$  А (зразок № 9); д -  $I_{df} = 0$  А (зразок № 17); е -  $I_{df} = 0,33$  А (зразок № 10); ж -  $I_{df} = 0,65$  А (зразок № 16); з -  $I_{df} = 0,96$  А (зразок № 22); і -  $I_{df} = 1,27$  А (зразок № 21)

переважно однорідним мікрорельєфом профілю. Структура поверхонь, що формується у різних зонах в залежності від технологічних режимів, відрізняється за своєю морфологією.

Наприклад, з рис. 11 видно, що у центральній зоні зразків при швидкості променя 780 мм/с та потужності 675 Вт в залежності від струму динамічного фокусування ( $I_{df}$ ) змінюється характер рельєфу поверхонь та параметри їх шорсткості.

Поверхням отриманих зразків характерен переважно смугастий тип при наявності чіткого напрямку (рис. 11). На деяких поверхнях спостерігаються ділянки з локальними мікронерівностями (рис. 11, *д-ж*). Також спостерігаються зміни у параметрах шорсткості мікрорельєфу поверхонь, а саме відстаней (або кроку) між нерівностями профілю поверхонь за вершинами та висотою рельєфу (рис. 11, *ж-і*).

Крім вказаних вище структурних характеристик поверхонь, в залежності від швидкості променя та потужності змінюється також загальний вигляд рельєфу поверхонь. Так, при зменшенні швидкості променя до 240 мм/с та потужності до 270 Вт формуються поверхні з іншим рельєфом при відсутності чітко вираженої смугастої структури при деякому укрупненні кроку нерівностей профілю поверхонь за вершинами (рис. 12). Такі структурні зміни можливо пов'язані з температурними умовами нагріву та охолодження при отриманні зразків.

Враховуючи викладене вище, виникає необхідність більш детальних досліджень параметрів мікрорельєфу поверхонь зразків, отриманих на різних технологічних режимах та зіставлення цих структурних характеристик в залежності від швидкостей променя та потужності, а також струму динамічного фокусування.

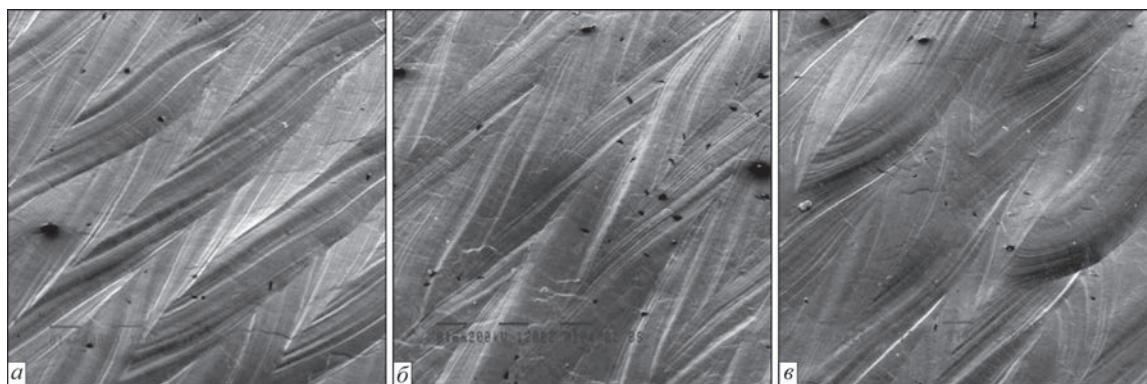


Рис. 12. Рельєф поверхні ( $\times 120$ ) у центральній зоні зразків при швидкості променя 240 мм/с та потужності 270 Вт в залежності від струму динамічного фокусування ( $I_{df}$ ): *a* –  $I_{df} = -1,2$  А (зразок № 18); *б* –  $I_{df} = -0,31$  А (зразок № 13); *в* –  $I_{df} = 0,65$  А (зразок № 15)

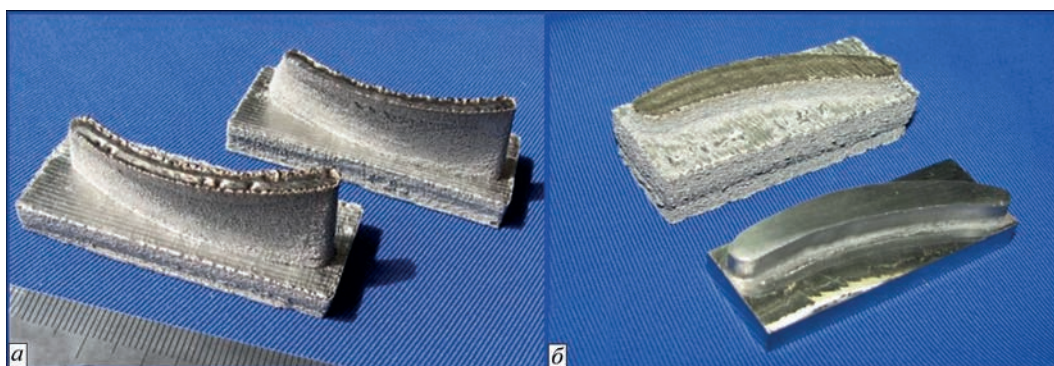


Рис. 13. Макети статорних лопаток газотурбінного авіаційного двигуна (опис *a, б* – див. у тексті)

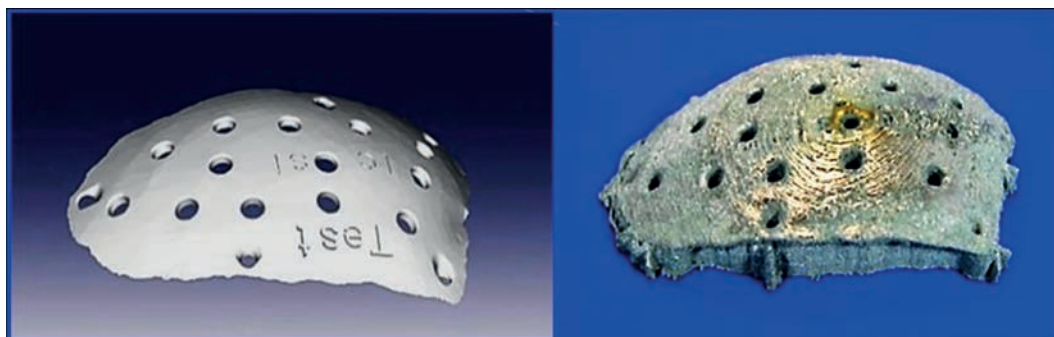


Рис. 14. Імплант черепної коробки. Модель та надрукований виріб



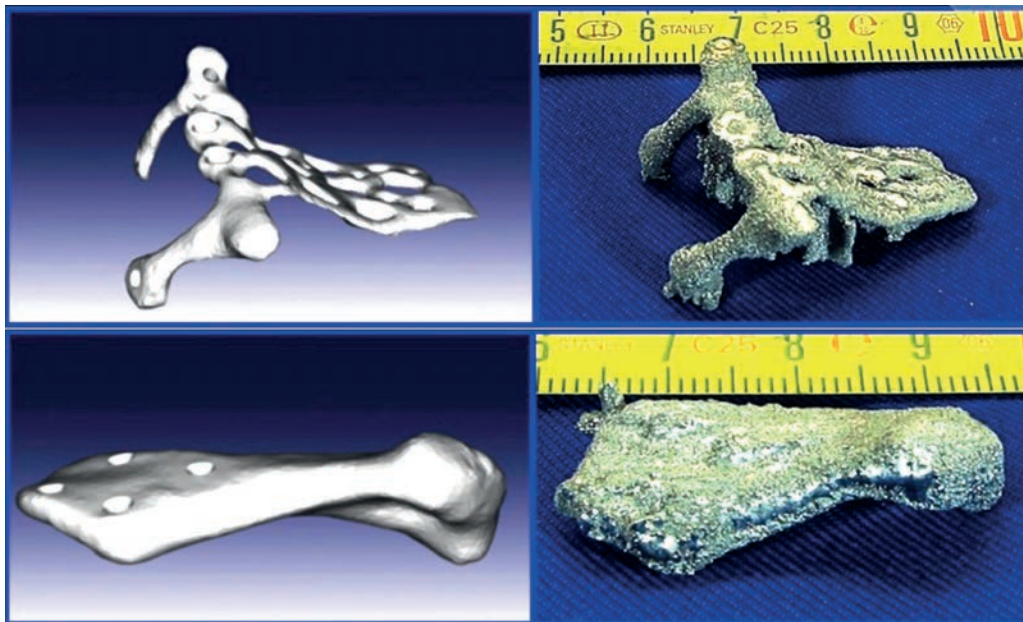


Рис. 15. Біопротези. Моделі та надруковані вироби

Тому наступні дослідження буде присвячено вивченню структури поверхонь зразків в декількох зонах (центральна зона та контур зразка) при різних збільшеннях, у тому числі вид поверхонь зверху та при нахилі зразків; виявленню дефектів (пор, несплавлень, мікронерівностей, включень); вимірюванню параметрів шорсткості мікрорельєфу у досліджуваних зонах, а саме відстаней між нерівностями профілю поверхонь за вершинами та висотою рельєфу.

**Експериментальні зразки виробів.** На створеному адитивному електронно-променевому обладнанні за комп'ютерними моделями надруковані вироби промислового та медичного призначення, режими друку яких оптимізовані за результатами попередніх досліджень.

На рис. 13 надані макети статорних лопаток газотурбінного авіаційного двигуна, які надруковані із металевих порошків титанових сплавів:

а) Ti6Al4V ELI, фракція 45...106 мкм, гранули сферичної форми, виготовлений за технологією PREP, виробник Sino-Euro Materials Technologies of Xi'an Co., Китай;

б) VT-20, фракція 63...160 мкм, гранули довільної форми, виготовлений за технологією HDH, виробник ТОВ «Ті Текнолоджи», Україна.

На рис. 14 надані комп'ютерна модель та надрукований імплант черепної коробки людини, на рис. 15 – біопротези та їх моделі. Вироби виготовлені з порошку титанового сплаву Ti6Al4V ELI.

## Висновки

За результатом науково-дослідних робіт розроблений та виготовлений макет адитивного устаткування, створена електронно-променева технологія пошарового наплавлення металевих виробів із порошкових матеріалів, надруковані експеримен-

тальні зразки виробів; проведено лабораторні дослідження зразків, виготовлені вироби промислового та медичного призначення.

## Список літератури

1. 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. *Автоматическая сварка*, **3**, 5–10.
2. Матвейчук В.А., Нестеренков В.М. (2020) Адитивне електронно-променеве обладнання для пошарового виготовлення металевих виробів із порошкових матеріалів. *Автоматичне зварювання*, **2**, 44–49. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.02.08>
3. Stolt, R., Heikkinen, T., Elgh, F. (2018) Integrating Additive Manufacturing in the Design of Aerospace Components. *Conference: The 25th International Conference on Transdisciplinary Engineering (TE2018)*. Modena, Italy, July 2018. DOI: <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-898-3-145>
4. Paria, Karimi (2018) Electron beam melting of Alloy 718 – Influence of process parameters on the microstructure. *University West, Department of Engineering Science. Division of Subtractive and Additive Manufacturing. Licentiate thesis, comprehensive summary*.
5. Günther, J., Brenne, F., Droste, M. et al. (2018) Design of novel materials for additive manufacturing – Isotropic microstructure and high defect tolerance. *Sci. Rep.*, **8**, 1, 1298.
6. Востриков А.В., Сухов Д.И. (2016) Производство гранул методом PREP для аддитивных технологий – текущий статус и перспективы развития. *Труды ВИАМ*, **8**, 44, 17–23.
7. Ільющенко А.Ф. (2019) *Аддитивные технологии и порошковая металлургия*. Минск, Медисон.
8. Powder Ti6Al4V ELI. *Сайт Sino-Euro Materials Technologies* [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://en.csemt.com/ti/09.12.2021>

## References

1. Nesterenkov, V.M., Matvejchuk, V.A., Rusynik, M.O. et al. (2017) Application of additive electron beam technologies for manufacture of parts of VT1-0 titanium alloy powders. *The Paton Welding J.*, **3**, 2-6.
2. Matviichuk, V.A., Nesterenkov, V.M. (2020) Additive electron beam equipment for layer-by-layer manufacture of metal products from powder materials. *The Paton Welding J.*, **2**, 41-46. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.02.08>
3. Stolt, R., Heikkinen, T., Elgh, F. (2018) Integrating additive manufacturing in the design of aerospace components. *In: Proc. of 25th Int. Conf. on Transdisciplinary Engineering*

- ing (TE2018) (Modena, Italy, July 2018). DOI: <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-898-3-145>
4. Paria, Karimi (2018) Electron beam melting of alloy 718: Influence of process parameters on the microstructure. *University West, Dept. of Engineering Sci. Division of Subtractive and Additive Manufacturing. Licentiate Thesis.*
  5. Günther, J., Brenne, F., Droste, M. et al. (2018) Design of novel materials for additive manufacturing: Isotropic microstructure and high defect tolerance. *Sci. Rep.*, **8**(1), 1298.
  6. Vostrikov, A.V., Sukhov, D.I. (2016) Manufacture of granules by PREP method for additive technologies: Current status and prospects of development. *Trudy VIAM*, **8**(44), 17–23 [in Russian].
  7. Iliyushchenko, A.F. (2019) *Additive technologies and powder metallurgy*. Minsk, Medison [in Russian].
  8. Powder Ti6Al4V ELI. Site: <https://en.c-semt.com/ti/> 09.12.2021

## ADDITIVE ELECTRON BEAM TECHNOLOGY OF MANUFACTURE OF METAL PRODUCTS FROM POWDER MATERIALS

V.A. Matviichuk, V.M. Nesterenkov, O.M. Berdnikova

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

The aim of the work is to create additive electron beam technology of layer-by-layer manufacturing of metal parts from powder materials. To conduct investigations, a model of additive equipment was made, a software and hardware platform for additive manufacturing was designed, technological methods and modes of printing products of a set shape with predicted strength properties were invented. Applying the additive method, 25 experimental samples for further tests were printed. For each of the products, the speed of beam movement, its power and dynamic focusing current were determined. The influence of basic parameters of the technological process of surfacing on the formation and features of the surface structure and chemical composition of the samples were studied. It was established that the chemical composition of the products corresponds to the composition of raw materials except for the content of aluminum, which is underestimated by 0.6...1.96 % relative to the chemical composition of the powder. To eliminate this drawback, it is necessary to maintain the aluminum content in titanium alloy powders at the highest level. According to the results of investigations on the created equipment, computer and industrial products were printed on computer models, the printing modes of which are optimized. Of titanium alloy powders the models of stator blades of a gas turbine aircraft engine, human skull implant and bioprosthesis were manufactured. 8 Ref., 4 Tabl., 15 Fig.

*Keywords: additive technology, 3D printer, electron beam surfacing, metal powder, titanium alloy, chemical composition, surface microrelief.*

Надійшла до редакції 13.12.2021

# XXI МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ - 2022

МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ

# 15 - 18 листопада



Генеральний  
інформаційний партнер:



Ексклюзивний  
медіа партнер:

ЖУРНАЛ  
ГОЛОВНОГО  
ІНЖЕНЕРА

**МІЖНАРОДНИЙ  
ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР**  
м. Київ, Броварський пр-т, 15  
станція метро «Лівобережна»

+38 (044) 201-11-65, (56)

[plast@iec-expo.com.ua](mailto:plast@iec-expo.com.ua)

[www.iec-expo.com.ua](http://www.iec-expo.com.ua)

