

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Матвійчук Владислав Анатолійович

УДК 621.791.92

ДИСЕРТАЦІЯ

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

Спеціальність 05.03.06 - Зварювання та споріднені процеси і технології

Подається на здобуття наукового ступеня кандидат технічних наук.
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ В.А. Матвійчук

Науковий керівник Нестеренков Володимир Михайлович, член-корр. НАНУ,
доктор технічних наук

Київ-2025

АНОТАЦІЯ

Матвійчук В.А. Адитивні електронно-променеві технології виготовлення металевих виробів методом пошарового наплавлення із застосуванням порошкових матеріалів. - Кваліфікаційна наукова праця 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, 2024.

Дисертаційна робота присвячена створенню обладнання та процесів виробництва металевих виробів із порошкових матеріалів за адитивною електронно-променевою технологією, дослідженню застосування сировини, придатної до адитивного виробництва, вивченню впливу технологічних параметрів наплавлення на властивості виробів, розробці способів проектування та виготовлення за комп'ютерною моделлю деталей з прогнозованими властивостями.

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.

Визначені способи управління адитивним процесами, розроблено структуру та створено програмно-апаратну платформу управління адитивним виробничим процесом, яка складається з управляючого контролера та пакета прикладного програмного забезпечення.

Досліджено новітні HDH металеві порошкові матеріали вітчизняного виробництва із титанових сплавів BT1-0 та BT20, з яких адитивним методом виготовлені та досліджені експериментальні зразки.

Встановлено, що структура наплавленого металу із сплаву VT1-0 має характерну для литих титанових сплавів α -фазу. Визначено, що форма гранул порошку не впливає на структуру металу.

Дослідженнями зразків із сплаву VT20 встановлено, що мікроструктура наплавленого металу є щільною, безпористою, дрібнодисперсною з рівномірним розподілом легуючих елементів. Складається з характерної для литих титанових сплавів α' -фази з невеликою кількістю β -фази. Мікротвердість становить від HV 3960 МПа до 4150 МПа.

Визначені технологічні процеси адитивного електронно-променевого виробництва. Зазначено послідовність технологічних операцій, здійснено аналіз технологічних параметрів наплавлення та їх взаємозв'язок, визначені етапи адитивного виробництва.

Проведено дослідження адитивних електронно-променевих процесів. Визначено вплив параметрів електронно-променевого наплавлення на якісні показники виробів з титанового сплаву Ti-6Al-4V. Надруковано та досліджено 25 зразків з різними технологічними параметрами наплавлення. Задіяно три режими швидкості променя: 270, 540 та 780 мм/с. Для кожного режиму змінювали струм динамічного фокусування від $-1,2$ до $1,27$ А з кроком $0,3$ А. Проаналізовано вплив технологічних параметрів на властивості виробів. Досліджено мікроструктуру зразків. Встановлено, що вироби мають щільну литу структуру наплавленого металу. На всіх зразках за висотою формуються великі кристаліти з однорідною пластинчато-голчастою структурою α' -фази з невеликою кількістю β -фази, переважно без дефектів при рівномірній мікротвердості як за висотою, так і вздовж поверхні.

Визначено технологічні параметри наплавлення виробів з титанового сплаву системи Ti-6,5Al-2Zr-1Mo-1V (сплави VT20, TA15) з підвищеними механічними характеристиками. Для випробувань надрукували 25 дослідних зразків. Крок зміщення траєкторії променя змінювали від $0,1$ до $0,25$ мм з інтервалом $0,05$ мм. Питому енергію електронного променя змінювали від 20 до 70 Дж/мм³ для кожного значення кроку зміщення траєкторії.

Встановлено, що в залежності від параметрів 3D-друку макроструктура більшості зразків є щільною, але при несприятливих параметрах можуть формуватися дефекти у вигляді несплавлень або вторинної усадкової пористості. Мікроструктура зразків дендритного типу, має $\alpha'+\beta$ пластинчато-голчасту морфологію, її дисперсність та форма виділень α' -фази змінюється в залежності від параметрів процесу. 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.

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

Дослідженнями опору втоми визначено, що крива втоми зразків 3Д друкованого 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 друкованого 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.

В дисертаційній роботі розроблені моделі виробів, оптимізовано їх формоутворення. Для досліджень задіяно програмний продукт Simufact Additive. Методом комп'ютерного моделювання визначено вплив

технологічних параметрів адитивного процесу електронно-променевого наплавлення на формоутворення виробів. Створено цифрові моделі та проведено дослідження формоутворення лопаток ГТД в трьох просторових положеннях на різних режимах швидкості променя. Визначено просторові деформації та відхилення розмірів виробу в процесі друку. Здійснено оптимізацію цифрових моделей відповідно до технологічних режимів друку та просторового положення виробу.

За результатами моделювання з титанового сплаву TA15 системи Ti-6,5Al-2Zr-1Mo-1V надруковані дві лопатки ГТД та чотири дослідні зразки, які були випробувані. Визначено, що структура сплаву є тонкопластинчастою та двофазною, складається з α' - та β -фаз титану і є характерною для сплаву TA15. Пористість зразка становить 0,45%. За хімічним складом зразок відповідає сплаву TA15. Твердість наплавленого металу становить від 35,8 до 39,5 HRC. Визначено наявність в структурі наплавлення нерегулярних видовжених пор (раковини) розміром від 50/10 до 230/60 мкм, які розташовані ланцюжком.

В результаті досліджень розроблені моделі індивідуальних медичних імплантатів. За результатами комп'ютерної томографії створено цифрову модель імплантату, із застосуванням комп'ютерного моделювання здійснено оптимізацію формоутворення виробу. Методом електронно-променевого наплавлення із титанового сплаву TA15 надруковані: імплантат кульшового суглобу, щелепно-лицьовий імплантат, два імплантати біомедичного призначення та контрольний зразок.

Новизна роботи полягає в наступному.

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 порошків титанових сплавів VT20 дозволяє отримати вироби складної форми з безпороистою, дрібнодисперсною, двофазною структурою металу із твердістю HV 4000 МПа та рівномірним розподілом легуючих елементів.

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

Список публікацій здобувача

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), CRCPress – 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.

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-променево 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 Тi6Al4V 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-променево 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 ТА15 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.

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 on specialty 05.03.06 – Welding and related processes and technologies. – E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv, 2024.

The dissertation is devoted to the creation of equipment and processes for the production of metal products by powder materials using additive electron beam

technology, the study of the use of raw materials suitable for additive manufacturing, the study of the influence of technological parameters of surfacing on the properties of products, the development of methods for designing and manufacturing parts using a computer model predicted properties.

At work the principle of operation and the composition of the additive equipment were defined, the principle of equipment controlling was invented; the methods of video surveillance of surfacing processes in real time were invented. The effect 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 created, and methods for calibrating electron beam sweeps have been determined. Experimental additive equipment was created - an industrial sample of an electron beam 3D printer.

The general principles of additive process controlling have been determined, the structure has been developed, and a hardware and software platform for additive manufacturing process control has been created, which consists of a hardware controller and an application software package.

The latest HDH metal powder materials of domestic production from titanium alloys VT1-0 and VT20 were studied, by which experimental samples were manufactured and tested by the additive method.

It was established that the structure of the deposited metal from the VT1-0 alloy has an α -phase characteristic of cast titanium alloys. It was determined that the shape of the powder granules does not affect the structure of the metal.

Studies of VT20 alloy samples have established that the microstructure of the deposited metal is dense, non-porous, finely dispersed with a uniform distribution of alloying elements. It consists of typical for cast titanium alloys α' -phase with a small amount of β -phase. Microhardness ranges from HV 3960 MPa to 4150 MPa.

Defined technological processes of additive electron beam production. The sequence of technological operations is specified, the technological parameters of surfacing and their interrelationship were analyzed and the stages of additive manufacturing are defined.

A study of additive electron beam processes was conducted. The influence of the parameters of the technological process of electron beam surfacing on the quality indicators of products made by titanium alloy Ti-6Al-4V was determined. 25 samples with different deposition technological parameters were printed and tested. Three modes of beam speed are used: 270, 540 and 780 mm/s. For each mode, the dynamic focusing current was changed from -1.2 to 1.27 A in steps of 0.3 A. The influence of technological parameters on the properties of the products was analyzed. The microstructure of the samples was studied. It was established that the products have a dense cast structure of deposited metal. On all samples, large crystallites with a uniform lamellar-acicular structure of α' -phase with a small amount of β -phase are formed along the height, mostly without defects with uniform microhardness both along the height and along the surface.

The technological parameters of surfacing products from the titanium alloy of the Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V system (VT20, TA15 alloys) with increased mechanical characteristics have been determined. 25 prototypes were printed for testing. The step of displacement of the beam trajectory was changed from 0.1 to 0.25 mm with an interval of 0.05 mm. The volume energy of the electron beam was varied from 20 to 70 J/mm³ for each step value of the trajectory displacement. It was established that, depending on the 3D printing parameters, the macrostructure of most samples is dense, but with unfavorable parameters, defects in the form of non-fusions or secondary shrinkage porosity may form. The microstructure of the dendritic-type samples has an $\alpha'+\beta$ lamellar-acicular morphology, its dispersion and the shape of the α' -phase discharges vary depending on the process parameters. From the perspective of forming a favorable microstructure, a printing mode with a scanning step of 0.2 mm and a beam energy of 40 J/mm³ allows for the creation of a fine microstructure in the material, free from un-melted areas and shrinkage micropores.

The developed printing mode provides higher values of tensile strength and yield strength by 27% and 24% , respectively compared to the alloy produced using the traditional electron beam melting technology. The relative elongation of the material manufactured by the additive method is 3.2 times greater than that of the

cast metal. This is attributed to the formation of a finer microstructure. However, due to the formation of a unidirectional dendritic structure, a decrease in impact bending test results is observed when the sample is unfavorably oriented relative to the direction of applied load.

Fatigue resistance studies revealed that the fatigue curve of 3D-printed titanium alloy TA15 samples is higher across the entire range of high-cycle fatigue (5×10^4 to 2×10^6 stress cycles) compared to deformed and cast metal. The endurance limit at 2 million cycles for the printed metal exceeds that of cast and deformed metal by 32% and 11%, respectively.

The additive electron beam technology enables the production of components with enhanced fatigue resistance, which is particularly relevant for aviation industry components and medical implants.

In the dissertation, product models were developed, and their shaping was optimized. The software product Simufact Additive is used for research. The influence of the technological parameters of the additive process of electron beam surfacing on the shaping of products was determined by the method of computer modeling. Digital models were created and research was carried out on the formation of gas turbine blades in three spatial positions at different beam speed regimes. Spatial deformations and deviations of product dimensions during the printing process are determined. Optimization of digital models was carried out in accordance with technological modes of printing and spatial position of the product.

Based on the results of modeling from the TA15 titanium alloy of the Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V system, two GTE blades and four test samples were printed. It was determined that the structure of the alloy is thin-plate and two-phase, consists of α' - and β - phases of titanium with the size of needle-shaped crystals of the α' -phase up to 1.8 μm and is characteristic of the TA15 alloy. The porosity of the sample is 0.45%. The chemical composition of the sample corresponds to the TA15 alloy. The hardness of the deposited metal is 35.8 - 39.5 HRC. The presence of irregular elongated pores (sinks) with a size of 50/10 – 230/60 μm , which are arranged in a chain, in the structure of the deposition was determined.

As a result of research, models of individual medical implants have been developed. Based on the results of computer tomography, a digital model of the implant was created, and the shape of the product was optimized using computer modeling. Using the method of electron-beam surfacing by titanium alloy TA15, the following are printed: a hip joint implant, a maxillofacial implant, two biomedical implants and a control sample.

The novelty of the work is as follows.

1. The understanding of the applicability of electron beam technology for 3D printing products from powdered titanium alloys has been broadened. It has been established that for titanium alloys TA15 and Ti-6Al-4V, an optimal cladding mode involves an energy density ranging from 40 to 45 J/mm³ with a trajectory displacement step of 0.2 mm. This mode ensures minimal surface microrelief parameters, a homogeneous and defect-free biphasic metal structure, and α' -phase needle crystal sizes of up to 1.8 μm .

2 For the first time, it has been established that additive melting of the titanium alloy TA15 using the developed technology provides mechanical properties superior to those of deformed metal, namely: a tensile strength of 1139 MPa, which is 27% higher; an elongation of 16.5%, which is 77% higher; and a fatigue limit at 2 million cycles of 508 MPa, which is 11% higher.

3. For the first time, it has been demonstrated that additive melting using advanced HDH powders of VT20 titanium alloys enables the production of complex-shaped components with a non-porous, fine-grained, biphasic metal structure, a hardness of HV 4000 MPa, and a uniform distribution of alloying elements.

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

ЗМІСТ		Стор.
Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень, термінів		22
Вступ		23
Розділ 1. Аналіз сучасного стану адитивних технологій, вибір напрямку досліджень		29
1.1	Про адитивне виробництво	29
1.2	Переваги адитивних технологій	29
1.3	Термінологія адитивного виробництва	30
1.4	Класифікація адитивних технологій	31
1.5	Адитивні технології виготовлення виробів із металу	33
1.6	Особливості застосування технологій SLM і EBM	36
1.7	Обґрунтування вибору напрямку досліджень	38
Висновки до розділу 1		41
Розділ 2. Адитивне електронно-променеве устаткування		42
2.1	Принцип роботи адитивного устаткування	43
2.2	Склад адитивного устаткування	44
2.3	Оснащення вакуумної камери	45
2.4	Система управління адитивним устаткуванням	46

2.5	Блок-схема адитивного устаткування	48
2.6	Розробка системи відеоспостереження	50
2.6.1	Система відеоспостереження ОПШ	51
2.6.2	Порівняння систем відеоспостереження RASTR і ОПШ	53
2.7	Юстування та калібрування адитивного обладнання	54
2.7.1	Вплив магнітного поля Землі	54
2.7.2	Корекція положення електронно-променевої гармати	56
2.7.3	Юстувальний пристрій	58
2.7.4	Юстування електронно-променевої гармати	59
2.7.5	Калібрування розгорток електронного променя	60
2.8	Програмно-апаратна платформа управління адитивним виробничим процесом	62
2.8.1	Загальна ідеологія програмно-апаратної платформи	62
2.8.2	Структура управляючої платформи	65
2.8.3	Управляючий контролер МСР	66
2.8.3.1	Описання контролера	67
2.8.3.2	Периферійні модулі контролера МСР	67
2.8.4	Програмне забезпечення	68
2.8.4.1	Програма Magics RP	70

2.8.4.2	Програма Build Processor	72
2.8.4.3	Програма Toolbox	73
2.8.4.4	Програма MCP Operator interface	74
2.8.4.5	Програма PLC	74
2.8.4.6	Програма HMI	75
Висновки до розділу 2		76
Розділ 3. Дослідження застосування металевих порошкових матеріалів		79
3.1	Дослідження застосування порошків титанового сплаву BT1-0	79
3.2	Дослідження застосування порошків титанового сплаву BT20	86
Висновки до розділу 3		92
Розділ 4. Дослідження адитивних електронно-променевих процесів		96
4.1	Технологічні процеси адитивного електронно-променевого виробництва	96
4.1.1	Послідовність технологічних операцій	97
4.1.2	Аналіз технологічних параметрів	99
4.2	Етапи адитивного виробництва	103
4.3	Визначення впливу параметрів технологічного процесу електронно-променевого наплавлення на якісні	104

	показники виробів з титанового сплаву Ti-6Al-4V	
4.3.1	Аналіз літературних даних та постановка проблеми	104
4.3.2	Мета та задачі дослідження	105
4.3.3	Матеріали та методи дослідження	106
4.3.3.1	Устаткування та матеріали	106
4.3.3.2	Методи досліджень	107
4.3.4	Результати досліджень технологічних параметрів наплавлення та їх впливу на якісні показники виробів	108
4.3.4.1	Визначення технологічних режимів друку	108
4.3.4.2	Виготовлення дослідних зразків	112
4.3.4.3.	Дослідження впливу параметрів друку на структуру поверхонь виробів та наявність дефектів	114
4.3.5	Обговорення результатів досліджень впливу технологічних параметрів наплавлення на якісні показники виробів	120
4.4	Визначення впливу параметрів технологічного процесу електронно-променевого наплавлення на мікроструктуру і мікротвердість сплаву Ti-6Al-4V	123
4.4.1	Аналіз літературних даних та постановка проблеми	123
4.4.2	Мета та задачі дослідження	124
4.4.3	Матеріали та методи досліджень	125
4.4.3.1	Об'єкт та гіпотеза досліджень	125

4.4.3.2	Матеріали та устаткування	125
4.4.4	Методи досліджень	126
4.4.5	Результати досліджень експериментальних зразків	126
4.4.5.1	Отримання дослідних зразків за різними технологічними параметрами друку	126
4.4.5.2	Дослідження мікроструктури	127
4.4.5.3	Визначення мікротвердості	129
4.4.5.4	Встановлення режимів друку, що забезпечують формування найкращого структурного стану	132
4.4.6	Обговорення результатів досліджень експериментальних зразків	132
4.5	Визначення технологічних параметрів отримання заготовок титанового сплаву TA15 з підвищеними механічними характеристиками методом електронно-променевого 3D друку	135
4.5.1	Аналіз літературних даних та постановка проблеми	136
4.5.2	Мета та задачі дослідження	139
4.5.3	Матеріали та методи досліджень	139
4.5.3.1	Об'єкт та гіпотеза досліджень	139
4.5.3.2	Матеріали та устаткування	140
4.5.3.3	Методи досліджень	142

4.5.4	Результати досліджень експериментальних зразків	143
4.5.4.1	Отримання дослідних зразків за різними технологічними параметрами друку	143
4.5.4.2	Дослідження мікроструктури зразків	145
4.5.4.3	Встановлення режимів друку, що забезпечують формування найкращого структурного стану	152
4.5.4.4	Визначення механічних характеристик дослідних зразків	152
4.5.4.4.1	Випробування на одновісний розтяг	153
4.5.4.4.2	Випробування на ударний згин	154
4.5.4.4.3.	Дослідження опору втомі	155
4.5.5	Обговорення результатів досліджень структури та властивостей заготовок сплаву TA15, отриманих 3D друком	156
Висновки до розділу 4		160
Розділ 5. Розробка цифрових моделей, виготовлення виробів за адитивною технологією та їх дослідження		165
5.1	Розробка та виготовлення лопаток ГТД	165
5.1.1	Матеріали для авіадвигунобудування	165
5.1.2	Розробка моделей лопатки ГТД	167
5.1.3	Дослідження впливу технологічних параметрів на формоутворення	174

5.1.4	Оптимізація цифрових моделей лопатки ГТД	175
5.1.5	Виготовлення адитивним методом лопаток ГТД	176
5.1.6	Випробування дослідного зразка із сплаву ТА15	179
5.2	Проектування та виготовлення адитивним методом індивідуальних медичних імплантатів	183
5.2.1	Матеріали медичного призначення	184
5.2.2	Розробка індивідуального ортопедичного імплантату	185
5.2.3	Виготовлення індивідуальних імплантатів адитивним методом	191
	Висновки до розділу 5	194
	Загальні висновки	195
	Список використаних джерел	197

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень, термінів

CB-212M	Малогабаритна установка для електронно-променевого зварювання
OK	Відхиляюча котушка електронно-променевої гармати
OC	Відхиляюча система електронно-променевої гармати
ФК	Фокусує котушка електронно-променевої гармати
ЕПГ	Електронно-променева гармата
ГТД	Газотурбінний двигун
Build Processor	Програма для геометричної побудови деталі на платформі 3D принтера
cRIO-9039	8-слотовий апаратний контролер на базі якого побудований контролер МСР
EBM	(Electron Beam Melting) - адитивна технологія електронно-променевої наплавлення
Ethernet	Протокол кабельних комп'ютерних мереж
JOB File	Виконавчий файл 3D принтера з алгоритмом побудови виробів
Magics RP	Програма для редагування файлів моделі виробів
МСР	Контролер програмно-управляючої платформи для 3D друку
МСР Operator Interface	Програма, людино-машинний інтерфейс
МСР Toolbox	Програма, інструмент для налаштування параметрів управляючого контролера МСР
Profibus	(Англ. Process Field Bus) - відкрита промислова мережа

ВСТУП

Обґрунтування вибору напрямку досліджень

Інноваційні технології пошарового виготовлення виробів методом швидкого прототипування відкривають нові можливості для виробництва деталей заданої форми і структури із заздалегідь прогнозованими властивостями. Процеси виготовлення виробів таким методом з використанням електронного променя показали великі перспективи застосування для виробництва широкої номенклатури деталей та вузлів в авіакосмічній промисловості, турбінобудуванні, в інших напрямках машинобудування та в біомедичній галузі. 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 і хімічно активних.

Всі існуючі на цей час промислові зразки подібного обладнання належать іноземним компаніям. Вітчизняного устаткування, яке виробляється серійно, не існує. Технології та обладнання, що створюються, з самого початку орієнтовані на потреби підприємств України. Для виробництва передбачається застосувати необхідну виробнику недорогу вітчизняну сировину. Цей підхід надає 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 продукції із заздалегідь прогнозованими властивостями, виробництво яких неможливо без застосування методів 3D друку.

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 завдання 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 цієї мети були поставлені такі завдання:

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 виробу.

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

Наукова новизна отриманих 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 порошків 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, які сформульовані у дисертації, 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 роботах, які було опубліковано у співавторстві, здобувачем виконано наступне: у [57,63,64,55,56,58,59,60,62,114,115,116,117,118,119,120,121,122,123,125] - ідея та обґрунтування концепції експериментів, аналіз експериментальних даних, аналіз і узагальнення літературних даних, підготовка рукописів публікацій; [113,61,124] - розробка технологічних режимів, узагальнення експериментальних даних, підготовка рукописів публікацій; [51,52,53] - 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.

Обсяг і структура дисертації.

Дисертаційна робота викладена на 214 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Обсяг основного тексту дисертації складає 197 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 22 таблицями, 108 рисунками. Список використаних джерел містить 127 найменувань.

Розділ 1. Аналіз сучасного стану адитивних технологій, вибір напрямку досліджень

1.1. Про адитивне виробництво

Адитивне виробництво це технологія виготовлення фізичних об'єктів за 3D-моделлю шляхом пошарового нанесення матеріалу на основу. На відміну від більшості звичайних технологій, адитивне виробництво створює вироби будуючи речовину, а не видаляючи її.

На сьогоднішній день адитивне виробництво є галуззю промисловості, що швидко розвивається. Адитивні технології застосовують в різних галузях, таких як авіаційна, космічна, автомобільна, медична, електронна, будівельна та інші. Також продовжуються дослідження та розробки нових матеріалів та технологій, що дозволить ще більш широко використовувати адитивні технології у різних галузях виробництва [1].

Широке поширення цифрових технологій в галузі проектування (CAD), моделювання (CAE) та механообробки (CAM) стимулювало вибуховий характер розвитку адитивних технологій, що у поєднанні з програмним забезпеченням для автоматизованого проектування дозволяє створювати нові типи об'єктів з унікальними властивостями [30].

Для виготовлення виробів складної геометрії адитивні технології є незамінним інструментом, що дозволяє значно зменшити час та витрати на виробництво. З кожним роком адитивні технології стають більш точними, швидкими та ефективними, що дозволяє створювати все більш складні та функціональні вироби [2].

Розвиток адитивних технологій є необхідним для зростання продуктивності та конкурентоспроможності промисловості в майбутньому. Дослідження адитивних технологій та розвиток нових методів адитивного виробництва забезпечать їх широке застосування в різних сферах технологічного прогресу [26].

1.2. Переваги адитивних технологій

Ключові переваги адитивних технологій [1,3,21,26,46].

1. Висока дизайнерська здатність. Технологія дозволяє створювати вироби за один етап і легко відтворювати складні форми. Традиційні обмеження виробничих процесів зменшуються або усуваються.

2. На відміну від багатьох відомих технологій, таких як лиття під тиском, для адитивного виробництва не потрібні спеціалізовані інструменти та обладнання, що може стати перешкодою для виробництва через їх високу вартість.

3. Можливість організації виробництва будь де. Моделі можна надсилати в цифровому форматі та друкувати поруч із споживачами, що зменшує потребу та залежність від транспортування.

4. Порівняно з традиційними технологіями виробництва деталей із складною геометрією, адитивне виробництво може створювати вироби швидко, за часи, а не тижні або місяці.

5. Адитивні технології потребують менше машиноресурсів і кваліфікованої робочої сили в порівнянні з традиційними методами виробництва.

6. Індивідуалізація, особливо в медичній галузі, де вироби можуть бути повністю адаптовані до пацієнта та його індивідуальних потреб.

7. Ефективне використання матеріалів за рахунок безвідходного виробництва.

8. Комерційна перевага і підвищення конкурентоспроможності через зменшення витрат та ризиків, оскільки час від розробки концепції до виробництва скорочується до мінімуму.

1.3. Термінологія адитивного виробництва

Компанії, які виробляють адитивне устаткування, по-різному називають свої технології. У літературі є невизначеність з приводу найменування адитивних технологій [46].

Американська організація ASTM International (American Society for Testing and Materials), що займається розробкою технічних стандартів для широкого спектру матеріалів, виробів, систем та послуг, відповідно до

стандарту ASTM F2792–12a «Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies» визначає термін Additive Manufacturing та надає його синоніми: additive fabrication, additive processes, additive techniques, additive layer manufacturing, layer manufacturing і freeform fabrication, які в україномовному варіанті можуть бути перекладені як адитивні технології, адитивне виробництво, а також технології пошарового виробництва [4].

Відповідно до стандарту ASTM F2792-12a адитивне виробництво це процес з'єднання матеріалів для виготовлення об'єктів за даними 3D-моделі, зазвичай шар за шаром, на відміну від субтрактивних методів виробництва. Субтрактивні виробничі процеси діють шляхом видалення матеріалу від заготовки [4].

1.4. Класифікація адитивних технологій

У світі усталеної класифікації адитивних технологій поки не прийнято. Перша класифікація адитивних методів виробництва була наведена у стандарті ASTM F2792-12a (США) [4,30,42].

За класифікацією ASTM адитивні технології розділені на 7 категорій:

1. Material Extrusion – видавлювання матеріалу або пошарове нанесення розплавленого матеріалу через екструдер;
2. Material Jetting – розбризкування матеріалу або пошарове струменеве нанесення матеріалу;
3. Binder Jetting – розбризкування сполучного або пошарове струменеве нанесення сполучного матеріалу;
4. Sheet Lamination – з'єднання листових матеріалів або пошарове формування виробу з листових матеріалів;
5. Vat Photopolymerization – фотополімеризація у ванні або пошарове затвердіння фотополімерних смол;
6. Powder Bed Fusion – розплавлення матеріалу в наперед сформованому шарі або послідовне формування шарів порошкових матеріалів та вибіркоче (селективне) сплавлення частинок матеріалу;

7. Directed energy deposition – пряме підведення енергії безпосередньо у місце побудови або пошарове формування виробу методом внесення матеріалу безпосередньо у місце підведення енергії.

Класифікація процесів адитивного виробництва за станом матеріалу, що використовується, надана в таб. 1.1 [4,30].

Таблиця 1.1. Класифікація процесів адитивного виробництва за станом матеріалу, що використовується

Стан матеріалу	Процес	Матеріали
Рідкий	Стереолітографія (SL)	Полімери
	Виготовлення об'єктів методом пошарового наплавлення (FDM)	
	Струменений друк (JP)	
Порошкоподібний	Струменений тривимірний друк (3DP)	Полімери, метали, кераміка
	Селективне лазерне спікання (SLS)	
	Пряме лазерне сплавлення металів (DMLS)	
	Вибіркове лазерне плавлення (SLM)	
	Електронно-променеве наплавлення (EBM)	Метали
	Пряме нанесення металів (DMD)	
	Точне лазерне формування (LENS)	
Твердий	Пошарове виготовлення об'єктів з листового матеріалу (LOM)	Полімери, метали, кераміка та композитні матеріали
	Екструзійне формування (EFF)	

Класифікація адитивних технологій виробництва із металу за ASTM F2792-12a надана в табл. 1.2 [4,30,42].

Таблиця 1.2. Класифікація адитивних технологій виробництва із металу

Категорія	Технологія	Матеріал
Powder bed fusion	Direct metal laser sintering (DMLS)	Металевий порошок
	Electron beam melting (EBM)	
	Selective laser sintering (SLS)	
	Selective laser melting (SLM)	
Directed energy deposition	Electron beam freeform fabrication (EBF ₃)	Металевий порошок, металевий дріт
	Laser engineered net shaping (LENS)	
	Laser consolidation (LC)	
	Directed light fabrication (DLF)	
	Wire and arc additive manufacturing (WAAM)	
Binder jetting	Powder bed and inkjet 3D printing (3DP)	Металевий порошок
Sheet lamination	Laminated object manufacturing (LOM)	Металевий ламінат з клейким покриттям
	Ultrasonic consolidation (UC)	Металева фольга

1.5. Адитивні технології виготовлення виробів із металу

Адитивні технології виробництва з металів та сплавів в стандарті ASTM F2792-12a представлені двома великими групами: *Directed Energy Deposition (DED)* та *Powder Bed Fusion (PBF)* [4,30,46,47,50].

Directed Energy Deposition (DED). У цьому процесі використовується матеріал у формі порошку або дроту, який розплавляється за допомогою прямого джерела енергії під час нанесення безпосередньо на деталь.

Матеріал плавиться і залишається на основі. Джерело енергії зазвичай це сфокусовані електронний промінь, лазер або плазмова дуга [9, 21, 22, 23, 26].

Метод DED застосовують, як правило, для виготовлення або ремонту виробів шляхом додавання матеріалу до існуючих поверхонь. Процес дозволяє створювати вироби із різноманітних композицій речовин або гібридні структури з використанням різних матеріалів.

Методом DED виготовляють відносно великі вироби, подібні до тих, що створюють традиційними методами обробки. Застосування DED раціональне у випадках, коли звичайні методи виробництва мають високу вартість або потребують багато часу. DED ефективний для виготовлення деталей із високовартісних матеріалів або із металів, які складно обробляти. Як результат, методи DED оптимальні для виробництва деталей типу Near net shape (NNS), наприклад кронштейнів, ребер та резервуарів. DED переважно використовують в аерокосмічній, оборонній, енергетичній та морській галузях. Для масового виробництва метод DED має обмеження через високу вартість [10, 23, 26].

Powder bed fusion (PBF) – сплавлення порошкового шару, це адитивний виробничий процес, де вироби формуються шляхом розплавлення металевого порошку, який додається пошарово. В якості джерела енергії використовують лазерний або електронний промінь. В PBF металевий порошок розподіляють пошарово поверх попередньо сформованого шару. Отже, виробництво є дискретним, а не безперервним. З бункера подається порошковий матеріал, який рівномірно розподіляється на платформі за допомогою валика або леза. Оптимальна товщина кожного шару порошку залежить від умов обробки та матеріалу, але звичайними є значення від 25 до 200 мкм [11, 23, 26,50].

Процес PBF починається зі створення 3D-моделі, яка програмно розділена на окремі шари. Для кожного шару розраховується траєкторія сканування джерела енергії, що визначає граничний контур і певну форму заповнення (растровий шаблон).

Існує кілька варіантів PBF, які відрізняються джерелом енергії і типом сировини. Домінуючими є лазерний (PBF-LB) і електронний (PBF-EB) промінь. Кожен варіант має переваги та недоліки, тому придатність слід зважувати для кожного застосування окремо.

Нижче наведено приклади PBF.

Вибіркове лазерне спікання (SLS). В технологічному процесі зазвичай лазером спікають порошкові полімерні матеріали, такі як нейлон і полієфіркетонкетон (PEKK) [22, 23, 26,50].

Вибіркове лазерне сплавлення (SLM) можна порівняти з SLS, але лазер повністю розплавляє порошок, а не спікає його. Процес застосовується до металевих порошоків, таких як алюмінієві сплави, титан і його сплави та нержавіюча сталь. Процеси сплавлення зазвичай відбуваються у робочій камері в середовищі інертного газу (зазвичай аргон) для запобігання окисленню та азотуванню наплавленого матеріалу [21,22,23,26,50].

Пряме лазерне сплавлення металу (DMLS). Абревіатура DMLS належить компанії EOS та походить від німецького «Direkt Metall Laser Schmelzen», що перекладається як пряме лазерне сплавлення металу. Методом DMLS досягається повне сплавлення металевого порошку [50].

Електронно-променево наплавлення (EBM) є процесом, подібним до SLM, але в якості джерела енергії застосовують електронний промінь, який створюється електронно-променевою гарматою. Процеси наплавлення відбуваються в вакуумі [22, 23, 26,50].

Вироби з металу, які виготовлені методом PBF, зазвичай для поліпшення властивостей потребують додаткової обробки. Термічну обробку проводять для покращення структури металу і усунення механічних напружень, струменево-абразивне оброблення, електро- або хімічне полірування здійснюють для зменшення шорсткості поверхонь [21,22,23].

Процеси PBF використовуються в багатьох галузях промисловості. Широке застосування методи PBF мають в аерокосмічній галузі. Двигуни GE9X компанії General Electric містять понад 300 надрукованих на 3D-

принтерах деталей. Сопло двигуна GE9X, яке виготовлене методом PBF, у п'ять разів більш довговічне, ніж попередні версії [5].

Широке застосування методи PBF мають в медичній галузі для виготовлення індивідуальних ортопедичних компонентів, таких як краніальні або ацетабулярні імплантати з титанового сплаву [23,26,46,47].

1.6. Особливості застосування технологій SLM і EBM

Технологія вибіркового лазерного сплавлення SLM є найбільш розповсюдженою в промисловості адитивною технологією. Як випливає з назви, SLM використовує лазерний промінь, який сплавляє металевий порошок. Тонкий шар порошку наноситься на платформу або на попередньо нанесений шар, а лазерний промінь вибірково розплавляє частинки порошку відповідно до CAD моделі виробу. Для створення бездефектних виробів технологічні параметри потрібно налаштувати. До важливих параметрів відносяться: потужність лазерного променя, швидкість його переміщення (сканування), відстань між штрихами, стиль штрихування, товщина порошкового шару та інші параметри, які також мають істотний вплив на властивості виробів. Процес друку відбувається в закритій камері, яка зазвичай заповнена інертним газом – N_2 або Ar (в залежності від властивостей металевого порошку, що використовується). В камері, де друкуються вироби, створюється надлишковий тиск інертного газу, що зводить до мінімуму взаємодію виробів з киснем під час друку. Також, при потребі, можливо застосувати нагрів платформи до 200-500°C, що актуально під час обробки крихких і високотемпературних матеріалів. Нагрів платформи забезпечує зниження швидкості охолодження виробів, що запобігає можливому розтріскуванню під час затвердіння [21,22,23].

SLM вважається найбільш універсальним процесом адитивного виробництва, оскільки він охоплює широкий спектр матеріалів, включаючи сплави алюмінію, титану, заліза, нікелю, кобальту, міді та їх компоненти. Механічні властивості виробів також можуть бути прогнозованими залежно до вимог. Це можливо досягати зміною параметрів процесу (наприклад,

зміни стилю штрихування, нагрівання платформи, внутрішньої термічної обробки тощо), які у свою чергу впливають на остаточну мікроструктуру деталей. Дослідження показали, що металеві порошки можливо повторно використовувати. Це зменшує витрату сировини і призводить до більшої екологічності виробництва [22,23,50].

Перевагами технології SLM є застосування великого спектру матеріалів, можливість прогнозувати властивості виробів, підвищена функціональність, порівняно низька вартість виробництва, відсутність виробничих відходів, кінцеві вироби готові до використання (якщо рівень шорсткості поверхні прийнятний) [21,22,23].

З іншого боку, SLM може мати недоліки: високі початкові витрати, процес відносно повільний через обмеження швидкості друку, є обмеження розмірів виробів, оптимізація параметрів процесу потребує багато часу, надруковані деталі можуть мати значну шорсткість поверхні (залежно від розміру гранул порошку та параметрів процесу)[13,50].

Застосування в SLM крихких та високотемпературних матеріалів, які не витримують високих внутрішніх напружень в процесі виготовлення, може привести до розтріскування виробів. Це певною мірою можна подолати шляхом зниження швидкості охолодження, якщо нагрівати платформу. Але це також може призвести до анізотропної мікроструктури матеріалу в напрямку побудови [6].

Технологія електронно-променевого наплавлення EBM дуже схожа з SLM. Однак процес EBM має деякі відмінності порівняно з SLM. Для сплавлення частинок порошку використовують електронний промінь замість лазерного. Порошковий шар підтримується при високій температурі (> 870 К для титанових сплавів) [37]. Для охолодження виробу після завершення наплавлення потрібен час протягом кількох годин [25, 26, 36]. Процес EBM вимагає контролю значної кількості параметрів процесу включаючи: потужність і швидкість переміщення променя, його фокусування та діаметр, відстань між лініями сканування, температуру платформи, температуру

попереднього нагрівання шару порошку, контурні стратегії та стратегії сканування. Оптимізація параметрів EBM складніше, ніж SLM. Процес EBM відбувається в середовищі вакууму, що запобігає окисленню деталей. Крім того, наявність адсорбованих газів на поверхні гранул порошку не призводить до утворення пористості в процесі EBM. Однак не рекомендовані сплави, які мають летючі компоненти, такі як Zn, Mg, Pb, Bi тощо [20,21,22, 23,26,36].

EBM здатне обробляти крихкі матеріали, для яких не може бути задіяний SLM. Зазвичай очікується, що крихкі матеріали, такі як інтерметаліди, мають складні характеристики теплового розширення та стискання. При швидкому охолодженні і затвердінні розплавленого металу виникають внутрішні напруги, що призводять до утворення тріщин [12,13, 23].

Оскільки в SLM швидкість охолодження виробів відносно висока, то крихкі матеріали виявляють утворення тріщин твердіння [21,23]. Для EBM процесу швидкість охолодження значно знижена завдяки підвищеній температурі порошкового шару. Під час процесу EBM температура шару для титанових сплавів становить близько 1000K [37]. За таких умов відбувається повільне охолодження розплаву і можна уникнути тріщини затвердіння в крихких матеріалах. Отже, крихкі матеріали, такі як інтерметаліди (TiAl) з високою ентропією, можуть бути оброблені методом EBM без утворення тріщин твердіння, якщо ретельно вибирати та підтримувати необхідну температуру порошкового шару [7,21,22,23,26,50].

1.7. Обґрунтування вибору напрямку досліджень

На сучасному етапі розвитку актуальним завданням стає постійне і якнайшвидше впровадження нової техніки та технологій у промисловість. Слід враховувати, що поступово відпадає потреба у великій кількості виробів одного типу. Скорочуються обсяги партій, збільшується їхня різноманітність. Змінюються геометрія, розміри і матеріали виробів. Отже, необхідно переналагоджувати обладнання під модифіковані вироби набагато частіше. Традиційні методи виробництва не витримують темпів постійних змін [47].

Адитивні методи виробництва пропонують вирішення проблеми, що скорочує терміни підготовки виробництва до випуску нової продукції. Велика кількість різних матеріалів, що використовуються, широкий спектр властивостей виробів, вдосконалення промислового устаткування дозволяє якісно підняти рівень виробництва. Збільшення застосувань адитивних технологій у світі підтверджує їх ефективність [35,36,41,49].

Важливим завданням розглянутої вище проблеми є якнайшвидший випуск виробів у промисловому масштабі. Відомо, що метал і досі залишається одним із матеріалів, який найбільш використовуються в промисловості та інших видах життєдіяльності людини. Незважаючи на те, що сьогодні все популярнішим матеріалом стає пластик, у багатьох галузях метали та їх сплави є незамінними [34].

Виходячи з проведеного аналізу адитивних технологій виробництва виробів з металу, однією з перспективних є технологія електронно-променевого наплавлення пошаровим методом EBM [26,36].

Основна перевага EBM перед SLM і подібними технологіями - знаходження деталі, що вирощується, у вакуумі, що є найкращою умовою для хімічно активних матеріалів – титанових та алюмінієвих сплавів. Також процеси наплавлення відбуваються у середовищі порошку, який нагрітий до температур, трохи нижче температури плавлення. Рівномірне та повільне охолодження деталі значно зменшує деформацію. Швидкість вирощування значно вища, при цьому точність та якість виробів зберігається на високому рівні [12,21,22,23,36,50].

Технологія перспективна для виробництва деталей заданої форми і структури із заздалегідь 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 [23,26,41,50].

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 [21,22,23,26,50].

В останнє десятиліття адитивні технології набули широкого комерційного і промислового поширення за кордоном [41,50]. Устаткувань 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 [60,62].

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-променевого процесів із застосуванням саме вітчизняних порошкових матеріалів, які будуть сертифіковані та орієнтовані для впровадження на вітчизняних підприємствах [59,61,63].

Оскільки вітчизняних електронно-променевого 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» [8,41].

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 [106,107]. Адитивні методи є найбільш ефективними для виробництва індивідуальних медичних засобів [100].

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.

Висновки до розділу 1.

1. Проведено аналіз літературних джерел з питань адитивного виробництва, термінології, класифікації, переваг адитивних технологій, огляду адитивних методів виготовлення виробів із металів, порівняння технологій адитивного виробництва SLM і EBM. Здійснено обґрунтування напрямку досліджень.

2. Процес адитивного електронно-променевого наплавлення металевих порошків є складним процесом з вузьким діапазоном значень великої кількості параметрів, що забезпечує високу якість та стабільність формування виробів. Дослідження впливу таких параметрів, як потужність електронного променя, швидкість, фокусування, форма і розмір гранул порошку є розрізненими, часто прив'язаними до конкретних типів устаткування і видів порошкових матеріалів. Дослідження меж параметрів та їх взаємозв'язок є актуальним завданням глибшого розуміння можливостей технології.

Розділ 2. Адитивне електронно-променеве устаткування

Експериментальне адитивне обладнання створене на базі малогабаритного устаткування для електронно-променевого зварювання типу СВ-212М [2].

Технічні характеристики адитивного обладнання надані в табл. 2.1.

Таблиця 2.1. 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 у вакуумній камері, Па, краще ніж	10^{-2}
Продуктивність, см ³ /год, до	80

2.1. Принцип роботи адитивного устаткування

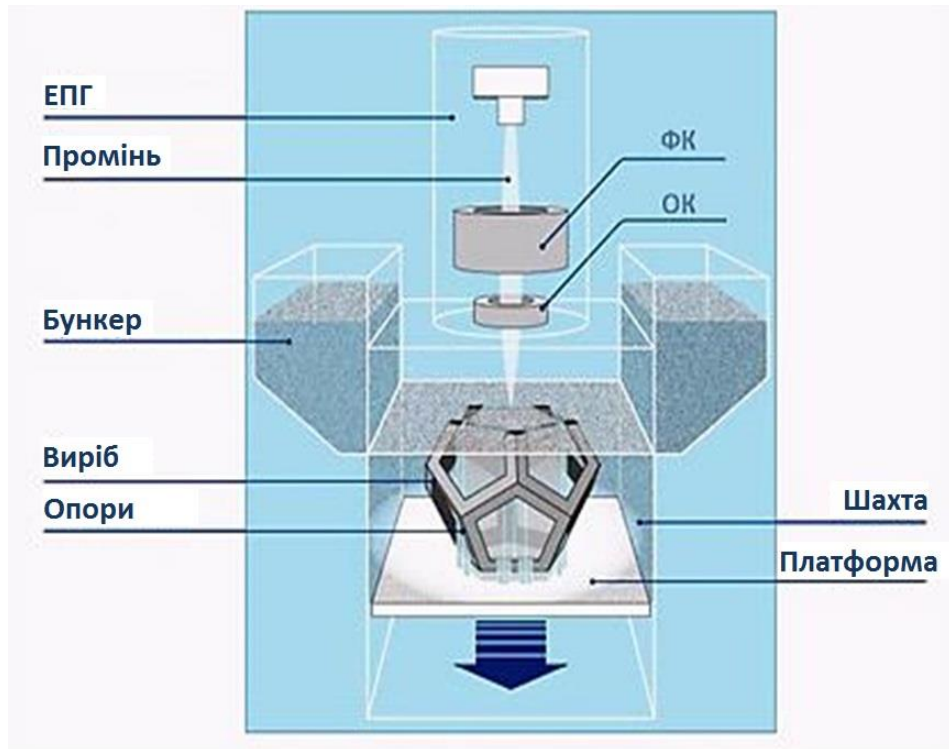


Рисунок 2.1. Схема адитивного процесу

Схема адитивного процесу надана на рис. 2.1 [60]. Подача і дозування металевого порошку відбувається із бункерів, з яких металевий порошок надходить на робочий стіл під дією сил гравітації. При такій схемі подачі матеріалу застосування будь-яких механізмів дозування не передбачається. Після відбору певної кількості порошку він автоматично подається з бункерів в необхідній кількості для підтримання достатнього рівня на столі.

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

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

2.2. Склад адитивного устаткування

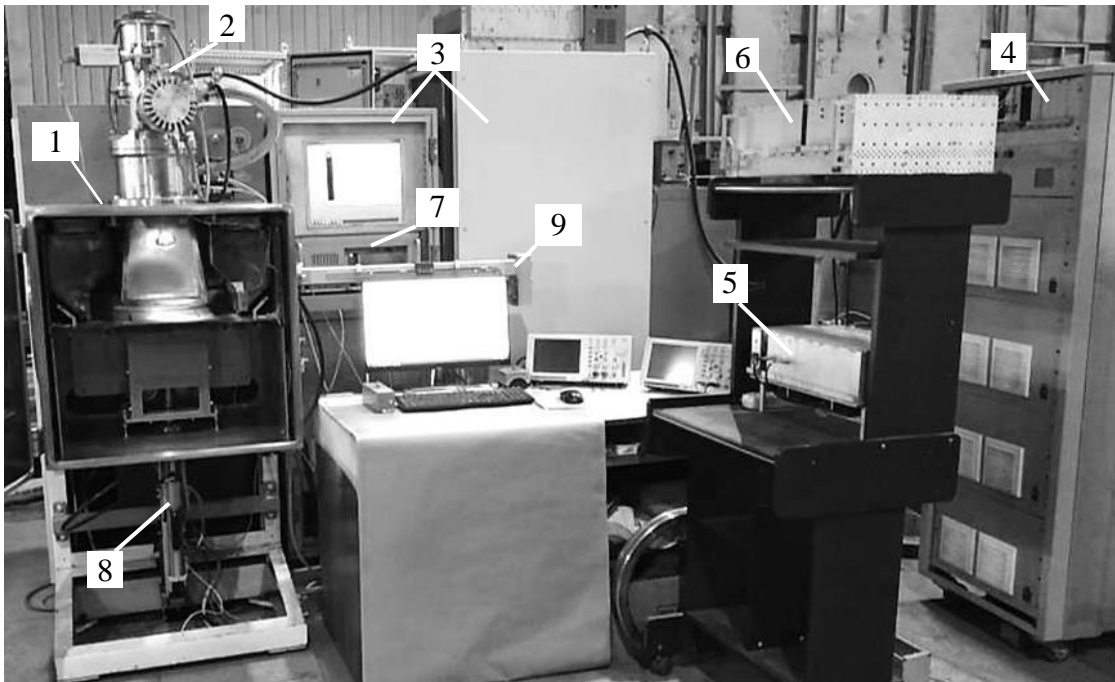


Рисунок 2.2. Устаткування для електронно-променевого 3D друку (описання 1-9 див. в тексті)

Установка (рис. 2.2) складається із малогабаритної вакуумної камери 1 з механізмами переміщення платформи 8, а також з механізмами подачі і розподілу порошку 9. До складу енергоблоку устаткування входить електронно-променева гармата та високовольтне джерело живлення. Електронно-променева гармата 2 розміщена зверху вакуумної камери. Вакуумна система устаткування забезпечує вакуум 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. Підсилювачі сигналів розгортки 5 та динамічного фокусування 6 формують технологічні розгортки електронного променя та його фокусування. Устаткуванням управляє промисловий комп'ютер 7 [128].

2.3. Оснащення вакуумної камери

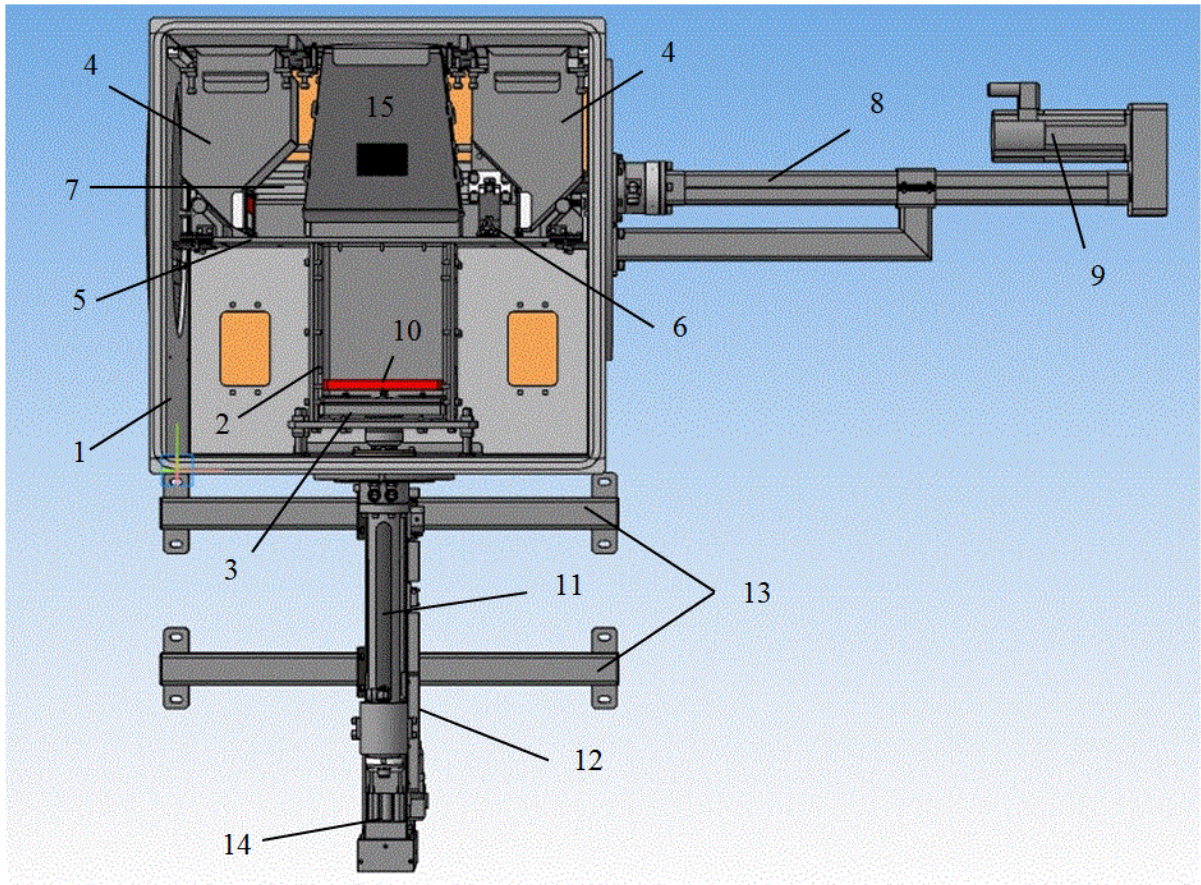


Рисунок 2.3. Оснащення вакуумної камери (1-15 див. в тексті)

Оснащення вакуумної камери 1 адитивного обладнання (рис. 2.3) складається із 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 осі за допомогою пінолі 1. Піноль закріплена на рейці 12, яка встановлена на кронштейнах 13. Управляє переміщенням платформи електродвигун 14.

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

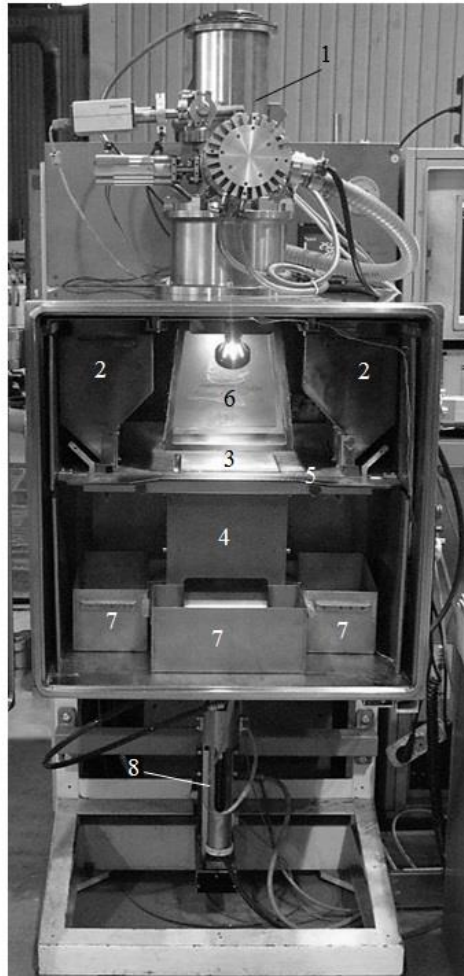


Рисунок 2.4. Вакуумна камера 3D принтера: 1 – електронно-променева гармата, 2 – бункери, 3 – платформа з палетою, 4 – шахта, 5 – стіл, 6 – рефлектор, 7 – короб, 8 – піноль

Фото оснащеної вакуумної камери надано на рис. 2.4.

2.4. Система управління адитивним устаткуванням

Система управління адитивним процесом (рис.2.5) побудована на основі апаратного контролера МСР, який управляє струмом пучка електронів, його розгортками, фокусуванням і механізмами переміщень. Контролер взаємодіє з промисловим комп'ютером ПК, де формуються моделі виробів та створюється виконавчий файл, в якому задіяні алгоритми побудови виробу. З комп'ютера ПК виконавчий файл (JOB File) надходить до контролера МСР, який згідно із заданими алгоритмами управляє устаткуванням 3D принтера.

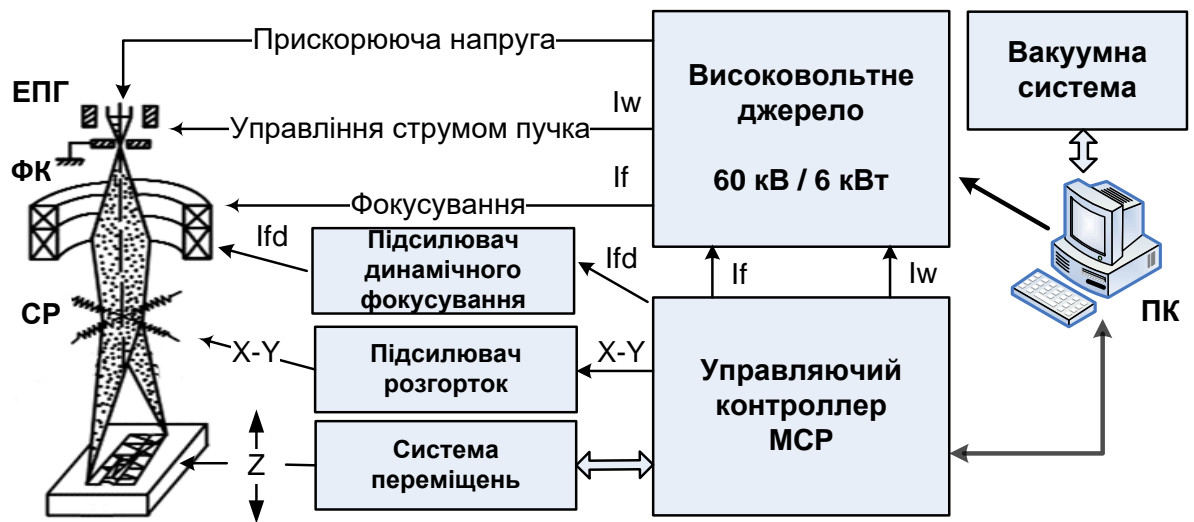


Рисунок 2.5. Блок-схема системи управління обладнанням для адитивного електронно-променевого наплавлення, де ЕПГ – електронно-променева гармата, ФК – фокусуєча котушка, СР – система розгорток (описання обладнання див. в тексті)

Контролер формує аналогові сигнали управління розгортками електронного променя, які надходять до підсилювачів розгорток до яких підключені відхиляючі котушки ЕПГ.

Пучок електронів переміщується за осями X та Y і створює зону наплавлення необхідної форми. Процес наплавлення виконується за програмою згідно з комп'ютерною моделлю виробу за попередньо встановленими технологічними параметрами.

Об'єктами управління в устаткуванні є струм пучка електронів I_w та струм статичного I_f і динамічного фокусування I_{fd} .

Крім того, контролер управляє механізмами 3D принтера: системою переміщень, яка включає механізм переміщення платформи за вертикаллю (вісь Z) і механізм розподілу металевого порошку на платформі.

Промисловий комп'ютер управляє вакуумною системою устаткування та високовольтним джерелом живлення. Для управління цим обладнанням розроблено програмне забезпечення.

Опрацювання комп'ютерної моделі, розкладання деталі на шари, формування алгоритму побудови виробу і управління технологічним обладнанням виконує програмне забезпечення у складі програмно-апаратної платформи адитивного виробничого процесу.

2.5. Блок-схема адитивного устаткування

На рис. 2.6 надана блок-схема адитивного устаткування [60].

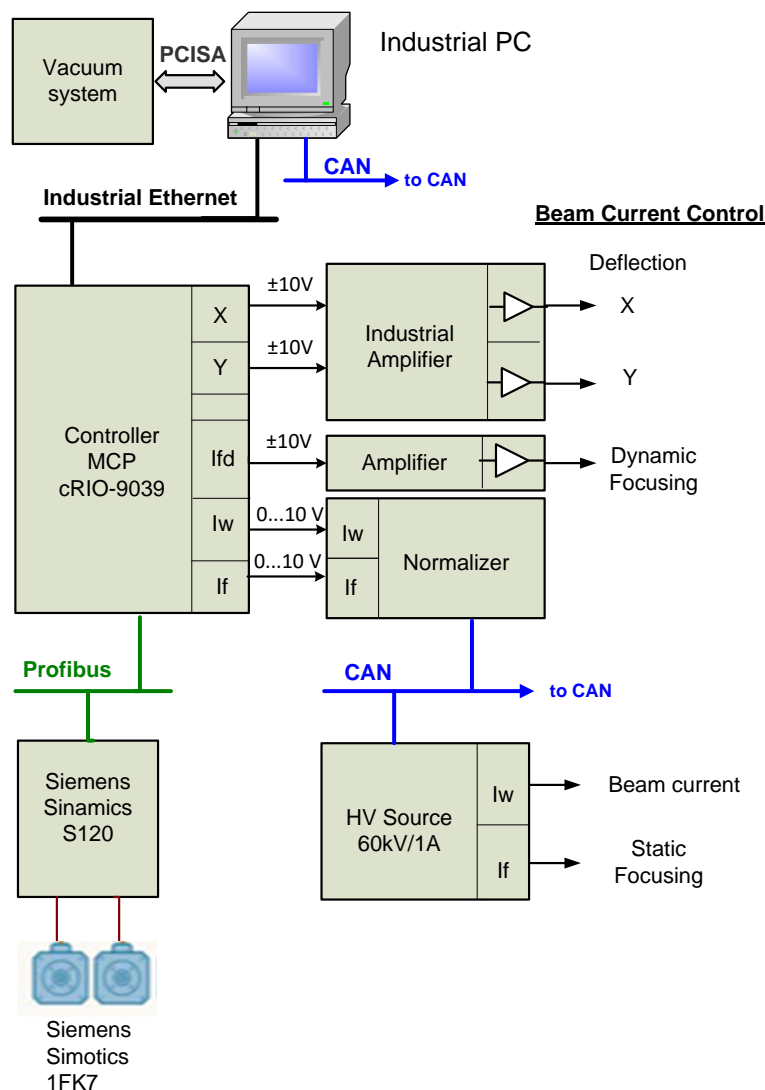


Рисунок 2.6. Блок-схема адитивного устаткування

Формування и попередня обробка моделі виробу відбувається в комп'ютері Industrial PC, який по Ethernet взаємодіє з контролером MCP.

Industrial PC по шині PCISA управляє обладнанням вакуумної системи (Vacuum system), а також по шині CAN – високовольтним джерелом живлення (HV Source).

Контролер МСР створений на платформі промислового контролера cRIO-9039 виробництва компанії National Instruments, США із встановленими периферійними модулями.

МСР формує аналогові сигнали управління розгортками електронного променя X та Y (рис. 2.6), сигнали управління фокусуванням - статичним та динамічним, і сигнал управління струмом пучка електронів. Сигнали розгорток X та Y надходять до підсилювачів, які формують струм у відхиляючих котушках електронно-променевої гармати (ЕПГ). Сигнал динамічного фокусування I_{fd} надходить до підсилювача, який формує струм в котушці динамічного фокусування ЕПГ. Також МСР формує аналогові сигнали управління електронним пучком I_w та статичним фокусування I_f . Ці сигнали надходять до перетворювача (normalizer), який розташований в шафі управління високовольтного джерела. Перетворювач конвертує аналогові сигнали в цифровий код за протоколом CAN. Таким чином відбувається управління струмом пучка електронів та струмом фокусування ЕПГ.

Контролер МСР управляє приводами 3D принтера: приводом механізму переміщення платформи за вертикаллю і механізмом розподілу металевого порошку в горизонтальній площині. Сигнал з модуля CS-PBMS, який встановлений в МСР, по шині Profibus подається на частотні перетворювачі Siemens Sinamics S120, які управляють електродвигунами Siemens Simotics 1FK7 системи переміщень.

МСР через мережу Ethernet взаємодіє з промисловим комп'ютером, який діє під управлінням операційної системи Windows 10. Комп'ютер по шині CAN управляє джерелом високої напруги 3D принтера. Для цього застосовується CAN модуль типу iPC-I XC16/PCI виробництва компанії IXHAT.

2.6. Розробка системи відеоспостереження

На устаткуваннях для електронно-променевого зварювання, які розробляються в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона, широко застосовується система відеоспостереження RASTR, що призначена для відображення на екрані монітора зварювальних процесів в режимі реального часу. Система RASTR в режимі сканування поверхні металу малим струмом одночасно із зварюванням надає можливість отримати зображення зварного шва та стику кромок [54].

Комп'ютерні технології дозволяють точно спрямувати електронний промінь у стик, але тільки при досить високому співвідношенні, бажано більше 20 децибелів, корисного та шумового сигналів вторинної електронної емісії. Зазвичай це співвідношення становить від 12 до 14 Дб [67].

Паразитні шуми утворюються в кабелі, що передає аналоговий сигнал вторинної електронної емісії від підсилювача до пристрою введення інформації в комп'ютер. Шумовий сигнал накладається на корисний та має широкий амплітудний та частотний спектр. Виділити та усунути шуми дуже складно, тому необхідно мінімізувати їх вплив на корисний сигнал [68].

Усунути або значно знизити вплив перешкод на сигнал вторинної електронної емісії можливо, якщо перетворити аналоговий сигнал в цифровий та передати його по захищеному каналу зв'язку [45].

Для реалізації цієї задачі спільно з Міжнародним центром «Інститут прикладної оптики» НАН України створена система відеоспостереження із застосуванням обладнання для перетворення та передачі інформації до комп'ютера (ОПК) [54, 114].

Створене обладнання придатне для спостереження за процесами електронно-променевого зварювання та наплавлення.

2.6.1. Система відеоспостереження ОПК

Блок-схема створеної системи відеоспостереження із застосуванням обладнання для перетворення і передачі сигналу в комп'ютер (ОПК) надана на рис. 2.7 [54].

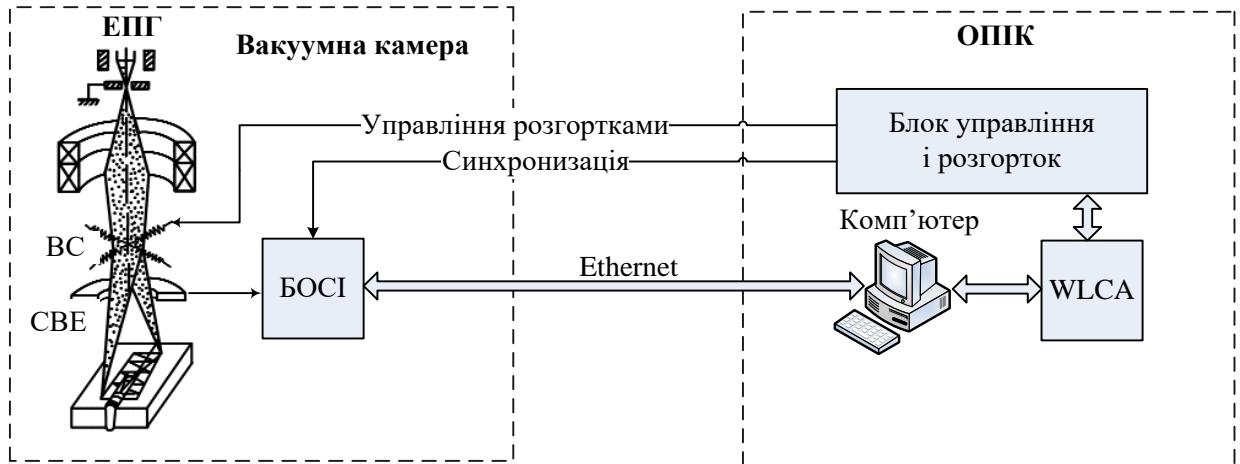


Рисунок 2.7. Блок-схема системи відеоспостереження ОПК

Растрове поле, створене сфокусованим електронним пучком електронно-променевої гармати (ЕПГ), формується в блоці управління та розгортки. Сигнали управління розгортками надходять до відхиляючої системи ЕПГ. Скануючий пучок електронів спрямовується на поверхню об'єкта, який досліджується. Потік електронів, відбитих від досліджуваної поверхні, надходить на сенсор вторинних електронів (СВЕ), де формується сигнал вторинної електронної емісії. Цей сигнал надходить до блоку обробки, перетворення та передачі сигналу (БОСІ) (рис. 2.8).

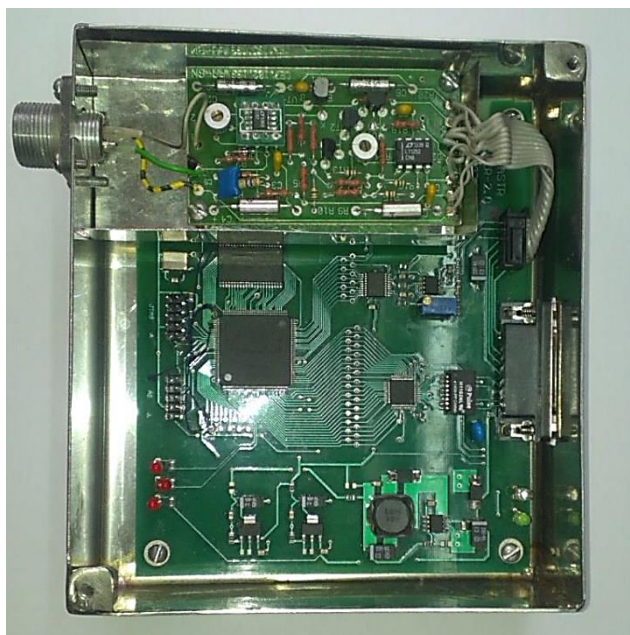


Рисунок 2.8. Блок обробки, перетворення та передачі сигналу БОСІ

В БОСІ сигнал вторинної електронної емісії підсилюється, синхронізується з управляючими сигналами і перетворюється в цифровий код. Цей сигнал передається за межі вакуумної камери установки. Інформація по Ethernet надходить до порту комп'ютера, де програмно обробляється. На екрані в режимі реального часу формується зображення об'єкта, який досліджується. Дані в цифровій формі передаються по Ethernet відповідно до мережного протоколу TCP/IP, який забезпечує високий ступінь захисту сигналу від перешкод. Для обробки цифрового сигналу та створення зображення на екрані комп'ютера розроблене програмне забезпечення.

2.6.2. Порівняння систем відеоспостереження RASTR і ОПІК

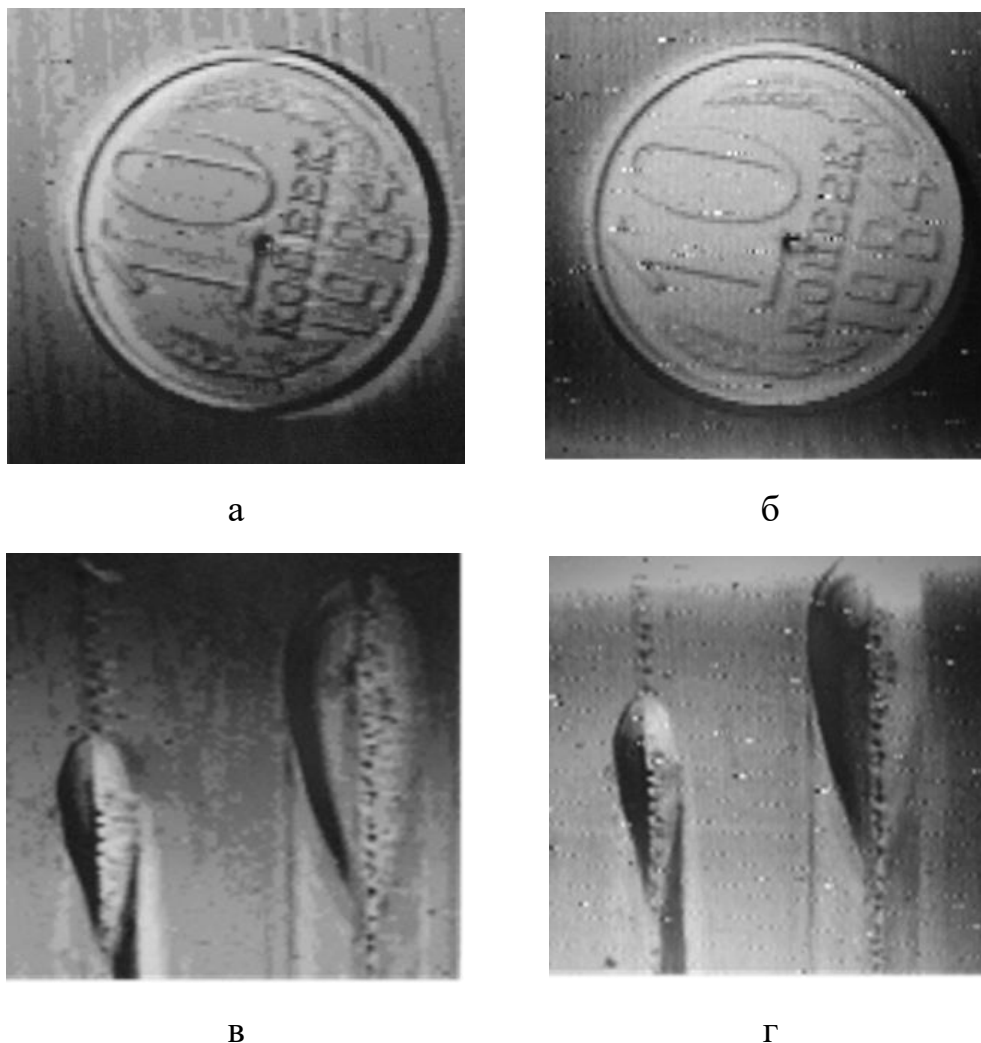


Рисунок 2.9. Зображення об'єктів, які отримані із застосуванням систем візуалізації: а, в – RASTR; б, г – ОПІК

Зображення об'єктів на рис. 2.9 а і рис. 2.9 в створено системою RASTR. Якість зображення прийнятна для технологічних робіт на устаткуванні електронно-променевого зварювання.

Зображення на рис. 2.9 б і рис. 2.9 г створено системою візуалізації ОПІК. Слід зазначити високу якість відображення об'єктів, які досліджуються, кращу деталізацію в порівнянні із зображенням, отриманим із застосуванням системи RASTR. В ОПІК інформація про сигнал вторинної електронної емісії передається цифровим кодом, що забезпечує захист

передачі даних. Вплив перешкод на сигнал вторинної електронної емісії мінімальний. Це є перевагою системи ОПК над RASTR [54,57].

2.7. Юстування та калібрування адитивного обладнання

2.7.1. Вплив магнітного поля Землі

В якості джерела енергії для електронно-променевого наплавлення використовують енергію електронів, які рухаються у вакуумі з високою швидкістю.

Для зміни просторового положення електронного променя зазвичай використовують взаємодію пучка електронів зі схрещеними поперечними магнітними полями системи відхилення електронно-променевої гармати. Мала інерційність електронів дозволяє забезпечити високу швидкість переміщення електронного променя на поверхні, де формується шар виробу, практично за будь-якою траєкторією [22].

Але висока чутливість електронного променя до магнітних полів є також недоліком. На електронний пучок діє однорідне магнітне поле Землі, індукція якого змінюється на поверхні планети від 35 мкТл на екваторі до 65 мкТл поблизу полюсів [23]. Пульсації геомагнітного поля часто спостерігаються головним чином у частотному діапазоні від 0,001 до 10 Гц з амплітудами від 0,1 до 100 мкТл. Напруженість магнітного поля Землі навіть за максимально можливих коливань не перевищує 80 А/м. Однак, як показують розрахунки, дія однорідного магнітного поля Землі з напруженістю 40 А/м призводить до відхилення електронного променя на 1,4 мм для ЕПГ з прискорюючою напругою 100 кВ, якщо відстань від гармати до виробу становить 250 мм [23].

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). Відхилення геометричних розмірів від заданих значень на краях платформи становило до 1,8 мм. Спроба

компенсувати невідповідності розмірів наявними програмними засобами не дала достатнього результату.

Фото експериментального зразку (мішені), де досліджувався вплив магнітного поля Землі на просторове положення електронного променя, надане на рис. 2.10.

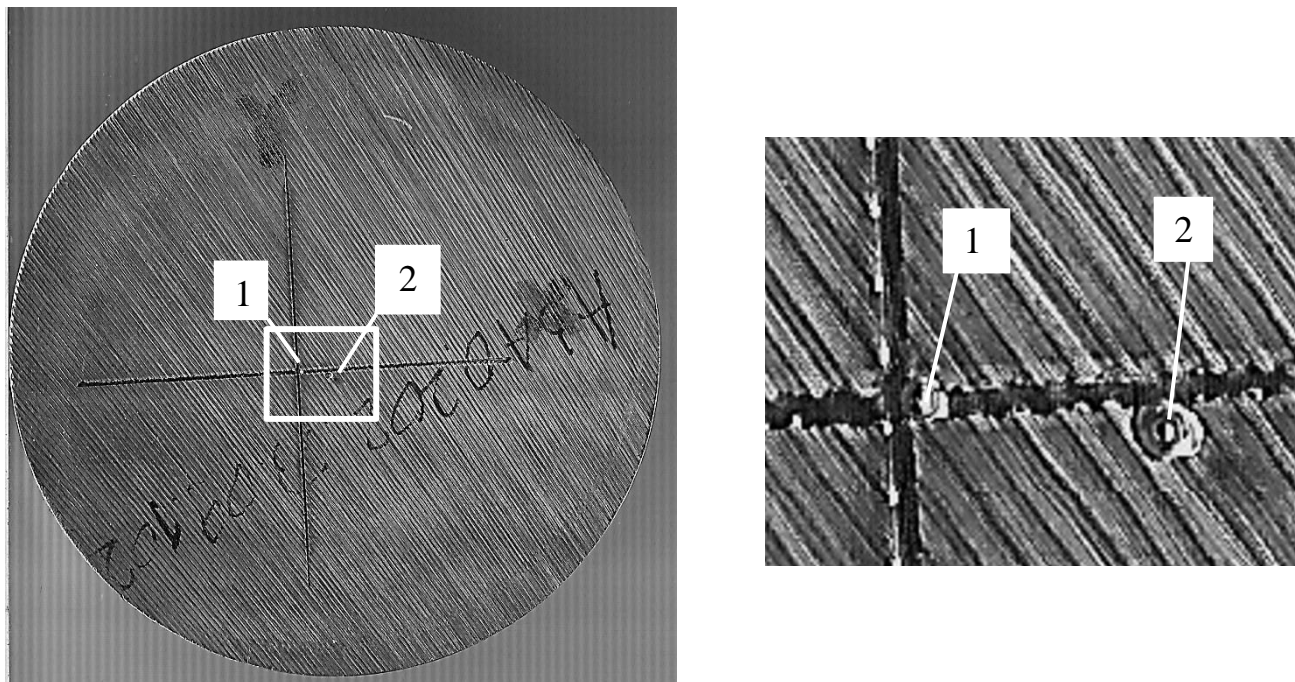


Рисунок 2.10 – Положення електронного променя: 1 – під дією та 2 – захищеного від дії магнітного поля Землі

Слід на позиції 1 (рис. 2.10) сформований внаслідок дії на мішень сфокусованого електронного променя. Слід на позиції 2 створений променем, який захищений від дії магнітного поля Землі. В якості захисту застосували екран циліндричної форми з магнітом'якого пермалоевого сплаву. Екран встановили між електронно-променевою гарматою та мішенню.

Відстань між позиціями 1 і 2 становить 4,8 мм та є результатом дії магнітного поля Землі на електронний промінь із струмом 5 мА, який сформований на відстані 420 мм електронно-променевою гарматою з прискорюючою напругою 60 кВ.

2.7.2. Корекція положення електронно-променевої гармати

Схематичне зображення дії магнітного поля Землі на положення електронного променя надана на рис. 2.11.

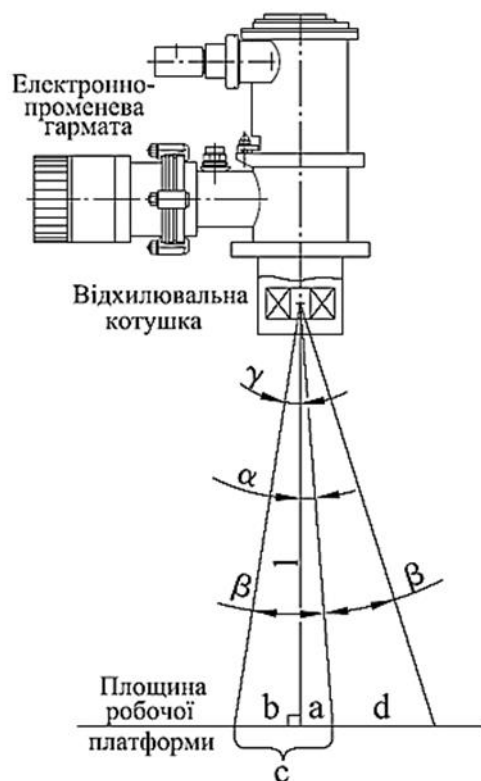


Рисунок 2.11. Відхилення електронного променя внаслідок дії магнітного поля Землі

Для точної побудови виробів електронний промінь має бути направлений до робочої платформи під кутом 90° , тобто перпендикулярно. Але під впливом магнітного поля Землі промінь відхиляється на кут α від перпендикуляру. В такому випадку при відхиленні променя на заданий кут β пучок електронів на площині відхиляється від початкового положення у від'ємному напрямку системи координат на відстань c , та в позитивному напрямку – на відстань d . При цьому $c \neq d$, оскільки напрямок променя не перпендикулярний до платформи. Тобто, при побудові виробу в разі відхилення пучка на певний кут β , промінь на площині у додатному та від'ємному напрямках відхиляється на різну відстань з невідповідністю Δ , де $\Delta = c - d$. Це неприпустимо, оскільки виріб формується не симетрично, з певною похибкою в розмірах.

Для усунення проблеми потрібно виконати компенсацію дії магнітного поля Землі, тобто повернути гармату на кут α проти дії магнітного поля.

Згідно з рис. 2.11,

$$\alpha = \arctg \frac{a}{l}, \quad (2.1)$$

де,

l – відстань від платформи до середини відхиляючої котушки електронно-променевої гармати, мм;

a – відхилення положення пучка під впливом магнітного поля Землі.

За результатом експерименту встановлено:

$l = 420$ мм, відстань від променевої гармати до мішені;

$a = 4,8$ мм, відхилення електронного пучка під впливом магнітного поля Землі.

Параметри l та a винайдені експериментально.

За (2.1) визначено:

$$\alpha = 0,65^\circ \quad (2.2)$$

Для компенсації дії магнітного поля Землі потрібно нахилити електронно-променеву гармату на кут $0,65^\circ$ в напрямку проти дії магнітного поля.

2.7.3. Юстувальний пристрій

Для компенсації відхилення електронного променя внаслідок дії магнітного поля Землі створений юстувальний пристрій (рис. 2.12), який надає можливість здійснювати нахил електронно-променевої гармати.

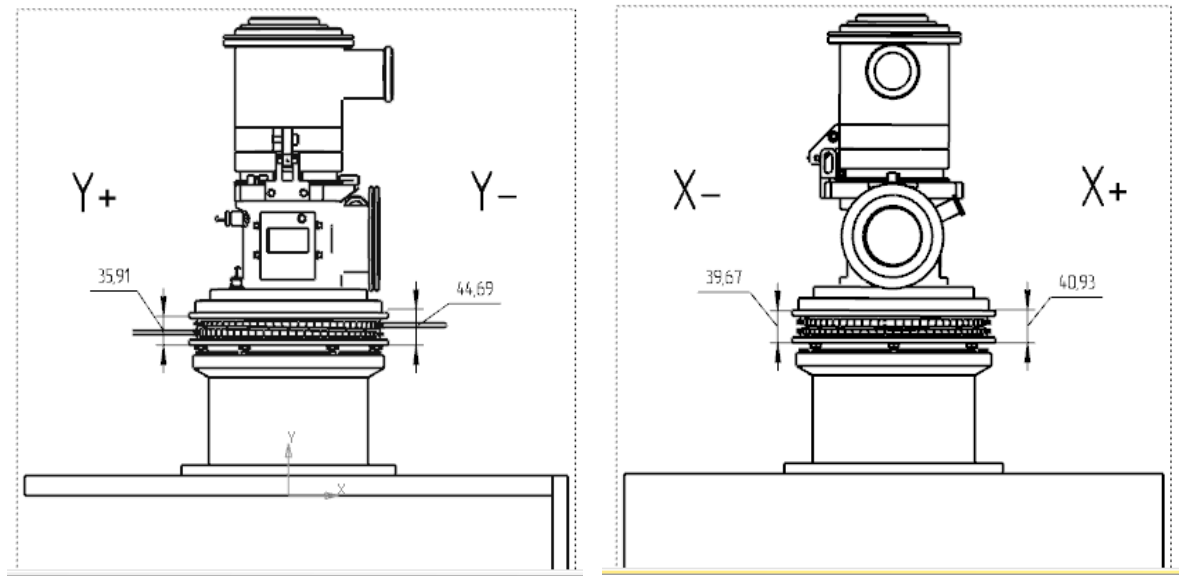


Рисунок 2.12. Юстувальний пристрій

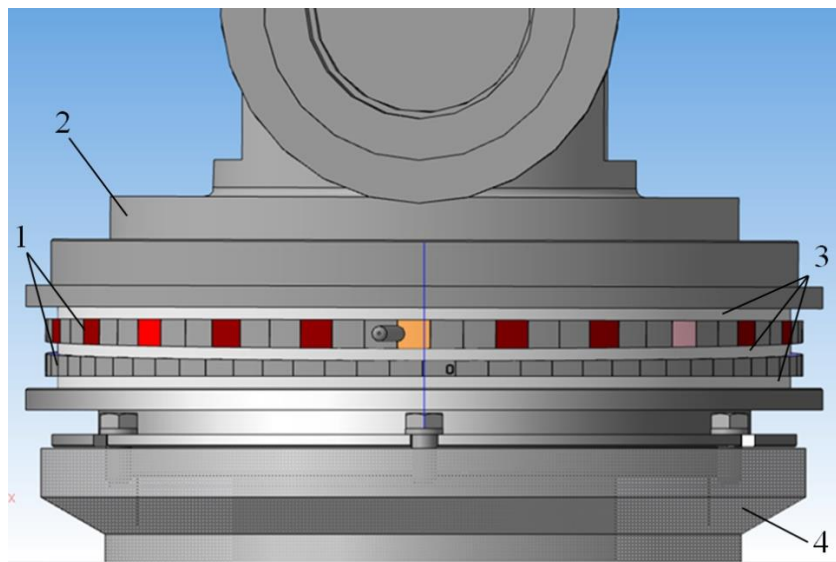


Рисунок 2.13. Юстувальний пристрій електронно-променевої гармати

Юстувальний пристрій (рис. 2.13) складається з двох клиноподібних кілець 1, які обертаються навколо центру. Кільця 1 розташовані між електронно-променевою гарматою 2 та оснащенням вакуумної камери 4. При обертанні юстувальних кілець змінюється нахил гармати. Між елементами конструкції знаходяться ущільнюючі елементи 3.

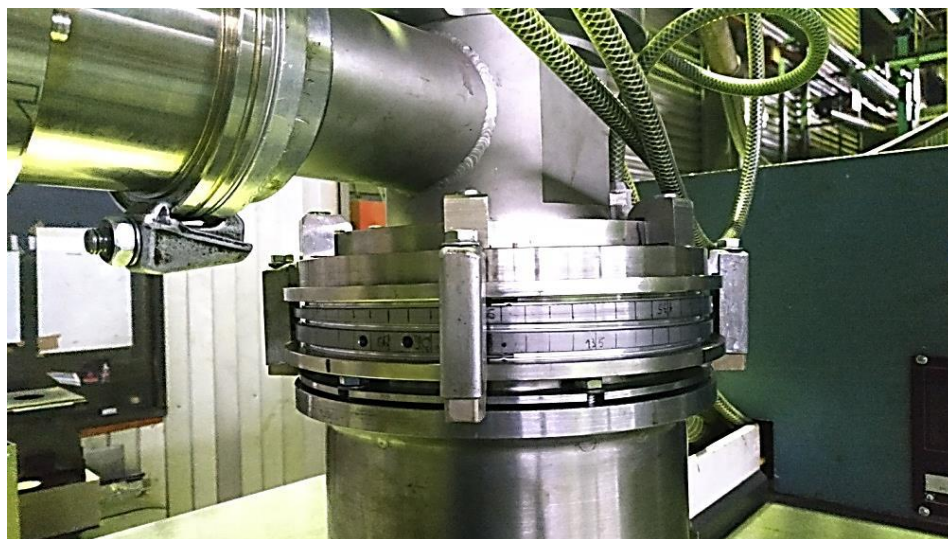


Рисунок 2.14. Електронно-променева гармата з юстувальним пристроєм
Фото юстувального пристрою надане на рис. 2.14.

2.7.4. Юстування електронно-променевої гармати

Роботи з юстування гармати виконували згідно з розробленою методикою. Просторове положення ЕПГ (кут нахилу) визначили аналітично за (2.2).

Положення юстувальних кілець отримали за комп'ютерною моделлю пристрою. Остаточне позиціонування електронного променя оцінювали експериментально, порівнюючи результат дії електронного променя на мішень, яка знаходилась спочатку у верхньому положенні платформи 10 (рис. 2.3), Далі платформу зміщували вниз на 100 мм та впливали на мішень сфокусованим електронним променем. Центри утворених на мішені місць дії променя у верхньому та нижньому положеннях мають співпадати. В такому випадку положення ЕПГ вважають остаточно відюстованим. У разі невідповідності – продовжують процес юстування.

Наступним етапом є повірка відповідності положення електронного променя у просторі в залежності від заданих координат. Роботи проводили з використанням програмного засобу MCP Operator Interface, який є складовою частиною пакета прикладних програм управляючої платформи адитивного виробничого процесу.

Для тестування були задані значення координат: 0, 25, 50 та 75 мм. Промінь відхиляли за осями X та Y як у додатному, так і у від'ємному напрямках. Контролювали відповідність заданих та отриманих координат. У разі невідповідності значень виконували калібрування підсилювачів систем відхилення електронного променя.

За результатами юстування був отриманий зразок (рис. 2.15), де чорними плямами зазначено положення електронного променя за координатами та відстань між створеними плямами.

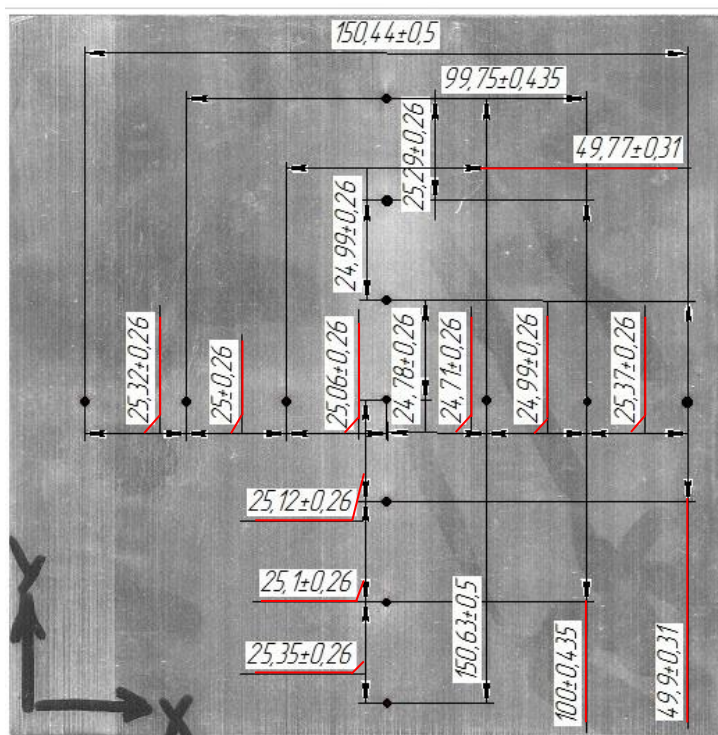


Рисунок 2.15. Положення електронного променя відповідно до координат

Розузгодження положення електронного променя між заданими та отриманими значеннями координат не перевищує $\pm 0,3$ мм, що відповідає технічним вимогам до устаткування.

2.7.5. Калібрування розгортки електронного променя

Метою робіт є забезпечення постійного значення ефективного діаметра пучка електронів за всією поверхнею в зоні наплавлення.

Відомо, що при відхиленні пучка електронів його ефективний діаметр на площині змінюється. Виникає потреба стабілізації діаметра пучка на всій

площині в зоні наплавлення. Для цього задіяли динамічне фокусування електронно-променевої гармати. Програмне забезпечення адитивного устаткування дає можливість контролювати діаметр пучка електронів в залежності від його положення в просторі [44].

Роботи проводили відповідно до розробленої методики калібрування ефективного діаметра пучка електронів. Отримані параметри динамічного фокусування надані на рис. 2.16.

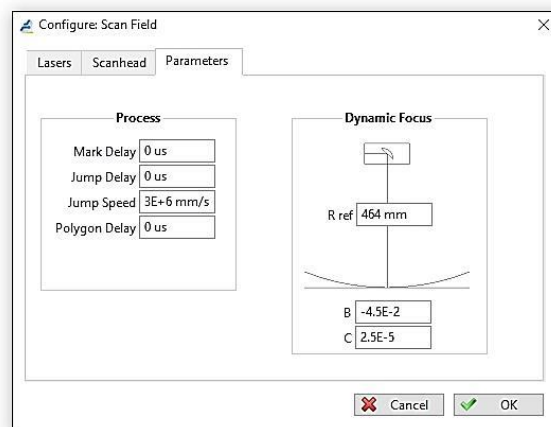


Рисунок 2.16. Параметри динамічного фокусування електронного променя

Проведено тестування стабільності ефективного діаметра пучка електронів в зоні наплавлення. Для цього на всій площині платформи були сформовані кола різних діаметрів (рис. 2.17).

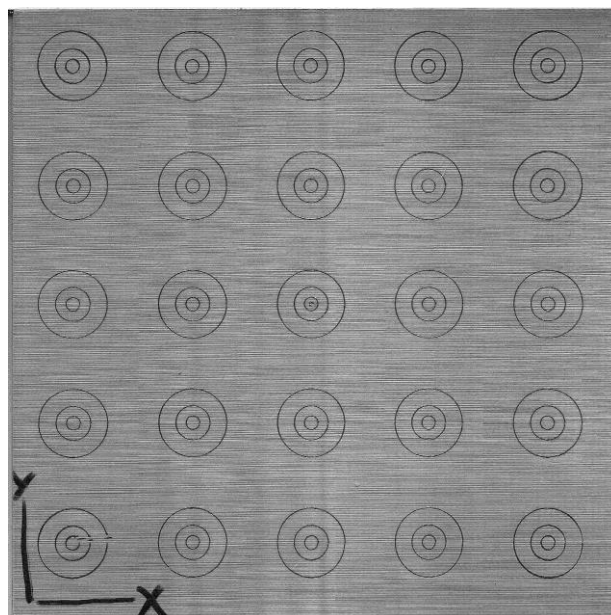


Рисунок 2.17. Результат калібрування динамічного фокусування

Всі кола мають однакову товщину ліній, що забезпечено калібруванням динамічного фокусування.

Також кола мають правильну форму та однакову відстань між центрами, що є результатом вдалого юстування положення електронного променя.

2.8. Програмно-апаратна платформа управління адитивним виробничим процесом

2.8.1. Загальна ідеологія програмно-апаратної платформи

Для проведення досліджень за темою дисертації розроблено програмно-апаратну платформу управління обладнанням для виробництва металевих виробів за адитивною електронно-променевою технологією із застосуванням порошкових матеріалів.

Розроблено:

- апаратний контролер з вбудованим програмним забезпеченням, який управляє електронним променем і механізмами, які формують виріб;
- програмне забезпечення, що пошарово створює виріб за комп'ютерною моделлю.

У підсумку створено програмно-апаратний комплекс для управління адитивним електронно-променевим процесом.

Обладнання, що створене, повинно працювати у складі адитивного електронно-променевого устаткування для наплавлення металевих порошкових матеріалів у вакуумній камері. Передбачається, що обладнання має складатися із апаратного контролера в промисловому виконанні, який безпосередньо управляє струмом пучка електронів електронно-променевої установки, розгортками електронного променя, його фокусуванням, а також механізмами переміщень обладнання: платформою, де буде нашаруватись металевий порошок і пристроєм його розподілу на платформі.

Передбачається, що подача і дозування металевого порошку відбувається безпосередньо у вакуумній камері устаткування (рис.2.3) із застосуванням бункерів, з яких металевий порошок буде надходити на

робочий стіл під дією сил гравітації. При такій схемі подачі порошку використання будь-яких механізмів дозування не передбачається. Після відбору певної кількості матеріалу в зоні його подачі з бункерів, порошок буде автоматично додаватися для підтримання необхідного рівня на столі.

Металевий порошок має плавитися під впливом енергії електронного променя, який створюється електронно-променевої гарматою, де промінь фокусується і відхиляється відповідними системами.

Виріб формується пошарово, при цьому платформа, на якій вирощується виріб, повинна опускатися на задане значення відповідно до висоти наплавленого шару.

Створено систему управління адитивним обладнанням, побудовану на основі апаратного контролера, який має управляти струмом пучка електронів, його розгортками, фокусуванням і механізмами, а також взаємодіяти з промисловим комп'ютером під управлінням операційної системи Windows. В комп'ютері мають створюватися та оброблятися моделі виробів, формуватися виконавчий файл, в якому задані алгоритми побудови виробу. Виконавчий файл (JOB File) через мережу Ethernet надходить до управляючого контролеру, який згідно із заданими алгоритмами управляє обладнанням адитивного устаткування.

Високовольтним джерелом має управляти промисловий комп'ютер, за винятком управління струмом пучка електронів і його фокусуванням. Цими параметрами управляє апаратний контролер, який входить до складу адитивного устаткування (рис. 2.6) [60].

Формувати зону наплавлення має апаратний контролер, який взаємодіє з промисловим комп'ютером через мережу Ethernet.

Контролер формує аналогові сигнали управління розгортками електронного променя. Ці сигнали надходять до підсилювачів розгортки, до яких підключені відповідні котушки ЕПГ.

Пучок електронів відхиляється за осями X / Y і створює зону наплавлення заданої форми. Процес плавлення металевого порошку

виконується за програмою згідно з комп'ютерною моделлю виробу і за попередньо встановленими технологічними режимами.

Об'єктами управління також є струм пучка електронів I_w і струм його фокусування I_f (рис. 2.6).

Контролер має управляти механізмами 3D принтера - системою переміщень, яка включає механізм пересування платформи за вертикаллю (вісь Z) і механізм розподілу металевого порошку на платформі в горизонтальній площині (рис. 2.3, 2.6).

Для створення комп'ютерної моделі виробу, формування шарів, відтворення алгоритму побудови виробу і управління обладнанням, задіє програмне забезпечення.

Архітектура програмного забезпечення управляючої платформи надана на рис. 2.18.

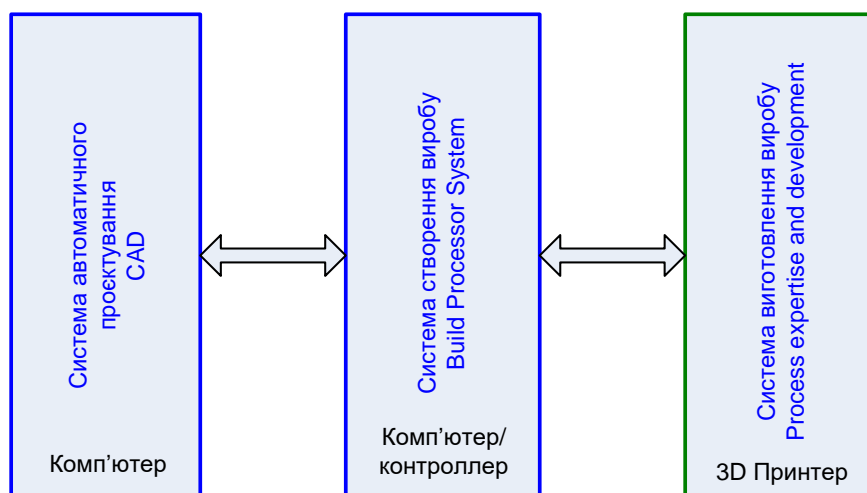


Рисунок 2.18. Архітектура програмного забезпечення

Створювати і редагувати 3D модель виробу можливо із застосуванням систем автоматизованого проектування (CAD), таких як програми NX компанії Siemens PLM Software, пакет програм Magics компанії Materialise; системи CATIA компанії Dassault Systèmes; пакет SOLIDWORKS компанії Dassault Systèmes SOLIDWORKS Corp. і т.і.

Підготовлений до друку файл комп'ютерної моделі виробу необхідно перетворити програмою типу build-процесор, що виконує геометричну побудову деталі на платформі (відтворює потрібну кількість шарів виробу та

їх профіль). Build-процесор формує виконавчий job-file, який надходить до контролера адитивного устаткування. За допомогою job-file контролер безпосередньо управляє процесом друку, який відображається в режимі реального часу на екрані управляючого комп'ютера з можливістю коригування основних параметрів адитивного процесу.

2.8.2. Структура управляючої платформи

Для управління адитивним устаткуванням спільно з компанією Materialise, Бельгія розроблена програмно-апаратна платформа, яка складається з управляючого контролера і пакета прикладного програмного забезпечення для реалізації процесів адитивного виробництва. Розроблено концепцію програмно-апаратної платформи управління адитивним електронно-променевим обладнанням. Спроектований, виготовлений і інстальований до адитивного устаткування управляючий контролер з пакетом прикладних програм для 3D друку.

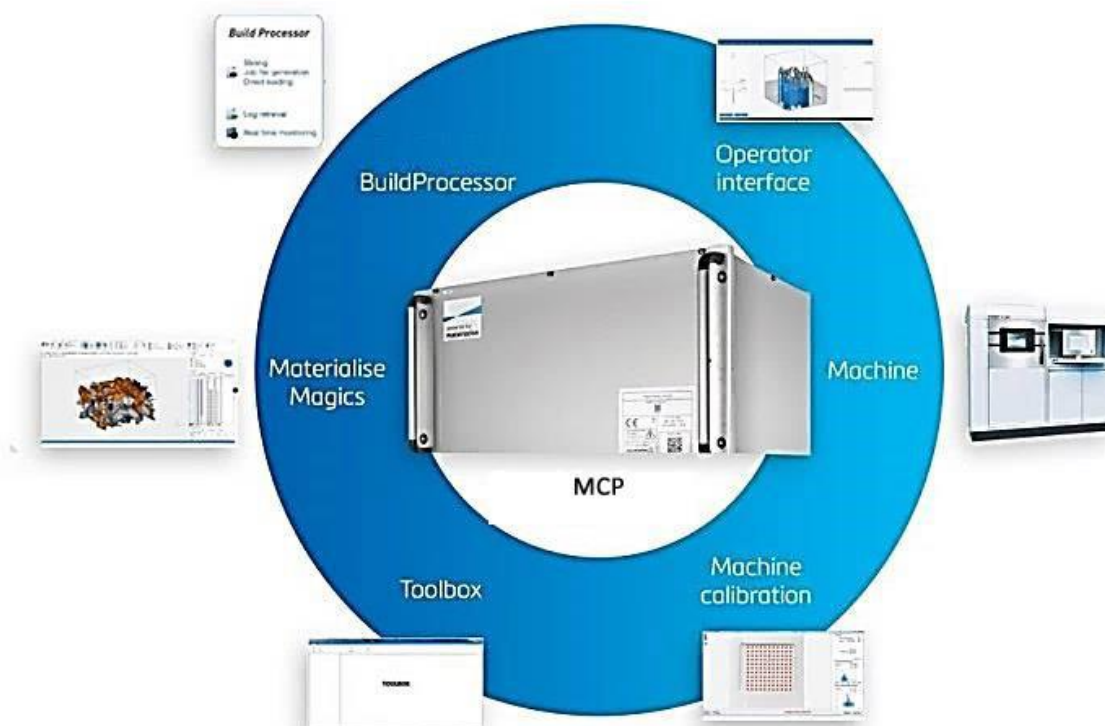


Рисунок 2.19. Структура управляючої платформи

Структура управляючої платформи і стан взаємодій між компонентами надані на рис. 2.19.

Склад управляючої платформи.

Апаратна частина:

– MСР - управляючий контролер.

Програмне забезпечення:

– MСР Toolbox - інструмент для налаштування параметрів управляючого контролера;

– MСР Operator Interface - людино-машинний інтерфейс оператора;

– Build Processor - програма для геометричної побудови деталі на платформі;

– Magics RP - програма для редагування файлів моделі виробу.

Функціонування управляючої платформи допускає мінімальний комплект, що складається з апаратного контролера MСР і пакета прикладного програмного забезпечення у складі програм Magics RP, MСР Operator interface, Build Processor і Toolbox

Функція калібрування обладнання Machine Calibration реалізована в програмі Toolbox.

2.8.3. Управляючий контролер MСР

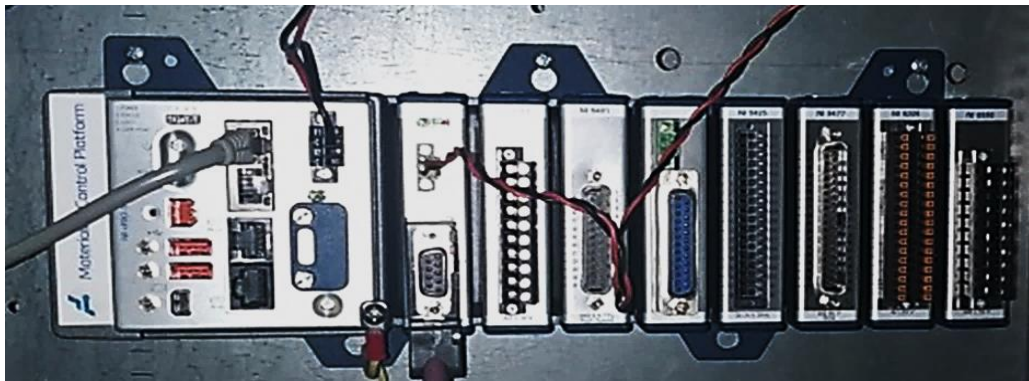


Рисунок 2.20. Контролер MСР

Для управління технологічним обладнанням 3D принтера спільно з компанією Materialise, Бельгія розроблений контролер MСР (рис. 2.20), створений на платформі промислового контролера cRIO-9039 виробництва компанії National Instruments, США. Контролер укомплектований периферійними модулями.

2.8.3.1. Описання контролера

Вбудований 8-слотовий контролер cRIO-9039 придатний для систем моніторингу та управління в режимі реального часу. Контролер укомплектований процесором Intel Atom E3845 з частотою ядра 1,91 ГГц, оперативним запам'ятовуючим пристроєм типу DDR3L об'ємом 2 Гбайт із швидкістю доступу до даних 10,67 ГБ/с, накопичувачем 16 Гбайт, програмованою логічною інтегральною схемою (FPGA) Kintex-7 325T. Контролер працює під управлінням операційної системи реального часу NI Linux. Можливості інтерфейсу користувача з Mini Display Port дозволяють застосувати локальну панель управління (HMI) для інсталяції програмного забезпечення. Контролер має слот SDHC, два порти Gigabit Ethernet, два порти USB-host, один порт USB-device і два послідовних порти.

2.8.3.2. Периферійні модулі контролера МСР

Контролер укомплектований периферійними модулями (табл. 2.2).

Таблиця 2.2. Периферійні модулі контролера МСР

Тип	Найменування
CS-PBMC	Модуль шини Profibus
NI-9263	4-канальний модуль аналогових виходів, ± 10 В
NI-9401	8-канальний модуль швидких TTL виходів
NI-9425	32-канальний модуль дискретних входів, 24 VDC
NI-9477	32-канальний модуль дискретних виходів
NI-9205	32-канальний модуль аналогових входів, ± 10 В

Високошвидкісний модуль цифрового виводу NI-9401 застосовується для створення сигналу широто-імпульсної модуляції електронного променя.

Модуль цифрового вводу NI-9425 призначений для:

- цифрових датчиків: безконтактні перемикачі, механічні мікроперемикачі та інше;
- клавіш людино-машинного інтерфейсу;

– зчитування даних з PLC.

Модуль цифрового виводу NI-9477 призначений для:

- управління світловою індикацією (світлодіоди та інше);
- управління реле;
- формування цифрового зв'язку (включити/ виключити) з PLC;

Модуль аналогового вводу NI-9205 приймає аналоговий сигнал напругою до $\pm 10\text{В}$. Також може вимірювати струм $\pm 20\text{мА}$, для чого в системному блоці МСР на передній панелі є вбудовані резистори, які можна активувати за допомогою налаштування DIP перемикача.

Модуль аналогового виводу NI-9263 формує вихідний аналоговий сигнал напругою до $\pm 10\text{В}$. Також можливо управляти струмом, якщо застосувати зовнішній перетворювач напруги в струм. Цей модуль підтримує роботу 4-х аналогових вихідних сигналів.

Модуль шини Profibus CS-PBMC з'єднує МСР з промисловою мережею PROFIBUS.

2.8.4. Програмне забезпечення

На рис. 2.21 надана архітектура програмного забезпечення для управління адитивним виробничим процесом.

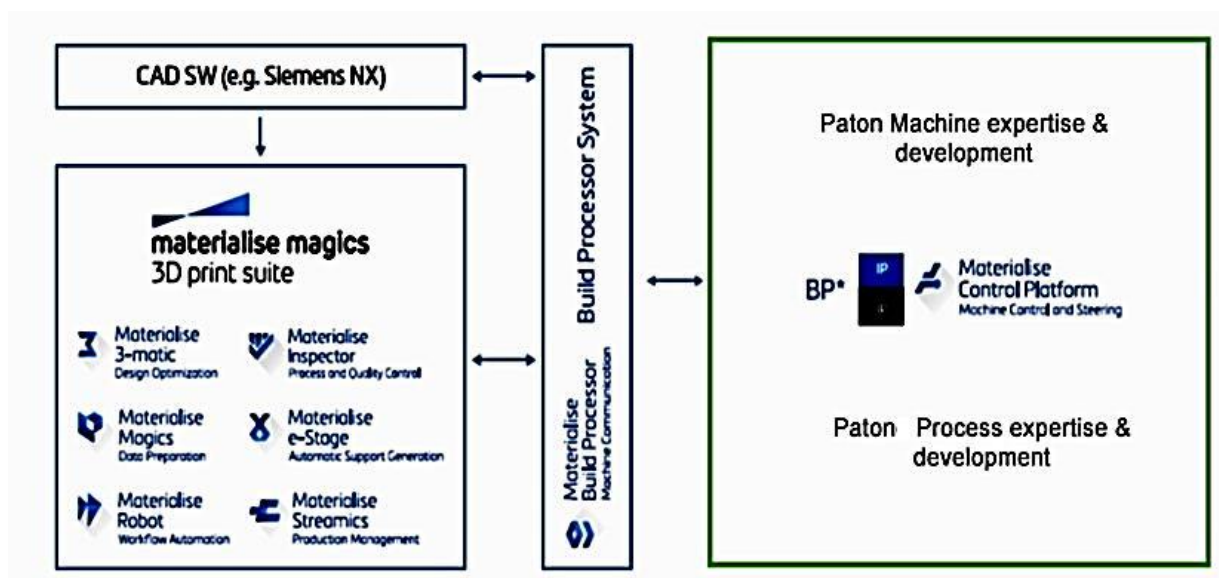


Рисунок 2.21. Архітектура програмного забезпечення 3D принтера

Програма Materialise Magics RP у складі пакета програм для 3D друку Materialise Magics 3D Print Suite використовується для аналізу і редагування 3D моделей виробів.

Для створення моделей можливе застосування будь-якого іншого програмного забезпечення типу CAD. На рис. 2.23 наведено альтернативний програмний продукт NX компанії Siemens.

Підготовлена до друку комп'ютерна модель виробів обробляється програмою BuildProcessor, яка дозволяє розкласти моделі на шари та задати параметри друку виробів.

Взаємозв'язок між структурними елементами управляючої платформи наданий на рис. 2.23.

BuildProcessor формує виконавчий job-file, який надходить до контролера MCP, що управляє процесом 3D друку (рис.2.22).

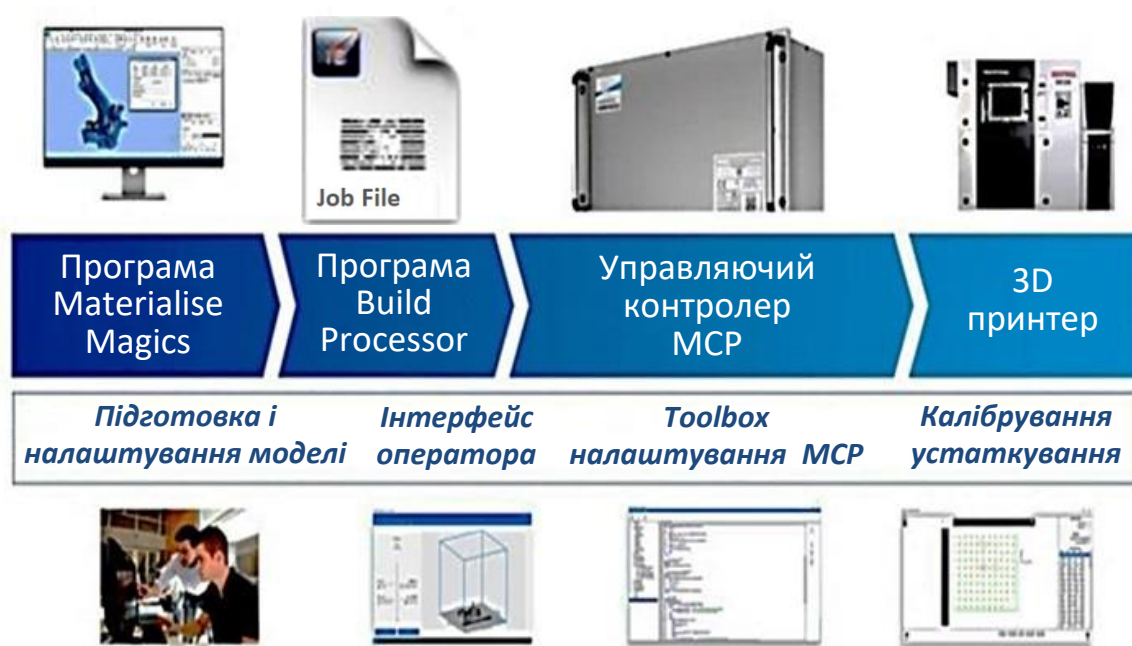


Рисунок 2.22. Структура управляючої платформи

Для управління технологічним устаткуванням задіяна програма MCP Operator interface. У цій програмі задаються параметри обладнання, а також в режимі реального часу контролюється процес друку з можливістю корегування технологічних параметрів. Програма дозволяє визначити файл

виробів, час початку і кінця виробничого циклу та його стадію. Програма має тривимірну візуалізацію процесу друку.

Для налаштування параметрів управляючого контролера MCP застосовують програму Toolbox. Функцію Machine Calibration використовують для калібрування 3D принтера.

2.8.4.1. Програма Magics RP

Magics RP - інтелектуальне, універсальне програмне забезпечення для підготовки даних до адитивного виробництва, яке оснащено інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом.

Програма Materialise Magics RP служить для аналізу і редагування 3D-моделей: перевірки та виправлення помилок геометрії, додання об'єму, порожнин, вимірювання товщини і розмірів окремих елементів, створення опор.

Після перевірки і редагування модель відправляється до друку.

Програма дозволяє імпортувати файли 3D моделей форматів: VRML (*.wrl, *.vrml, *.x3dv), Rhino (*.3dm), Sketchup (*.skp), OBJ (*.obj), 3DS (*.3ds, *.prj), PLY (*.ply, *.zcp), ZPR (*.zpr), FBX (*.fbx), COLLADA (*.dae), X3D (*.x3d), 3MF (*.3mf), DXF (*.dxf), STL (*.stl).

Програма забезпечує:

- виправлення за допомогою функції Autofix більшості помилок геометрії (відсутні полігони, вивернуті нормалі, незшиті поверхні);
- визначення всіх типів помилок, а також їх усунення за допомогою функції Fix Wizard;
- великий вибір інструментів для ручного виправлення геометрії.

Поліпшення 3D-моделі: створення згладжених поверхонь, позбавлення значних переходів між ділянками.

Редагування моделі:

- додавання порожнин і отворів;
- поділ 3D-моделей на кілька частин;
- поєднання декількох 3D-моделей в одну;

– додавання тексту і логотипів на 3D-модель.

Аналіз 3D-моделей:

– перевірка товщини моделі на придатність до 3D-друку;

– задання відстаней між деталями у збірці;

– вимірювання будь-яких елементів (відстані, діаметри).

Magics RP надає можливість змінити дизайн виробів: додати логотипи, серійні номери, створювати сітчасті структури.

Підготовка платформи.

Magics RP має інструменти, необхідні для дублювання деталей, зміни їх орієнтації, ефективного розміщення деталей на платформі принтера, створення технологічних опор.

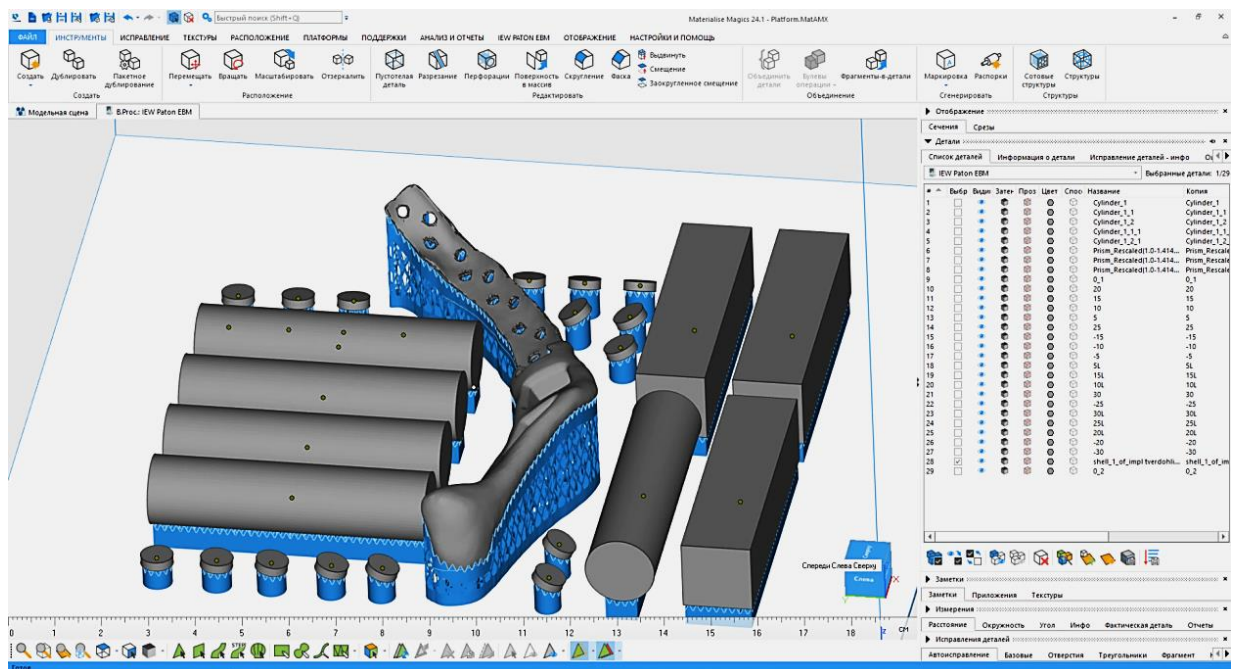


Рисунок 2.23. Интерфейс программы Magics RP

На рис. 2.23 наданий інтерфейс програми Magics RP, де розташовані моделі виробів і сформовані технологічні опори (позначені синім кольором). Опори в процесі друку дозволяють підтримувати форму виробів.

Можливість створювати опори надає програмний модуль Magics SG, який є додатковою опцією програми Magics RP.

2.8.4.2. Програма Build Processor

Build Processor обробляє комп'ютерну модель виробів, яка підготовлена до друку програмою Magics RP або іншою CAD програмою.

Інтерфейс Build Processor інтегрований в Magics RP. Також можливий незалежний доступ до функцій і налаштувань програми Build Processor.

Програма дозволяє розкласти моделі виробів на шари, задати параметри і структуру формування кожного із шарів, визначити для кожного виробу потужність та швидкість переміщення електронного променя, параметри фокусування. Програма дозволяє вибрати матеріал виробу та варіанти заповнення шарів текстурою.

Функції Build Processor надані на рис. 2.24.



Рисунок 2.24. Функції програми Build Processor

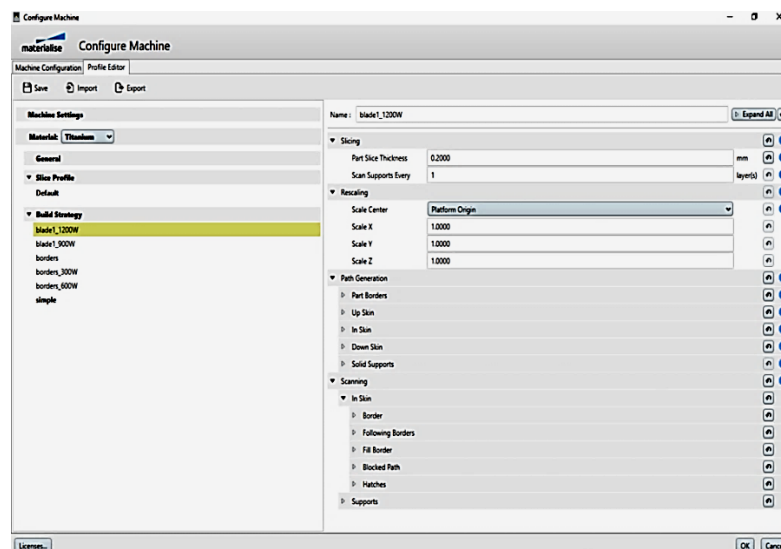


Рисунок 2.25. Інтерфейс програми Build Processor

Інтерфейс програми наданий на рис. 2.25.

Build Processor формує виконавчий job-file і передає його в контролер MCP, який управляє процесом 3D друку.

2.8.4.3. Програма Toolbox

Інтерфейс програми наданий на рис. 2.26.

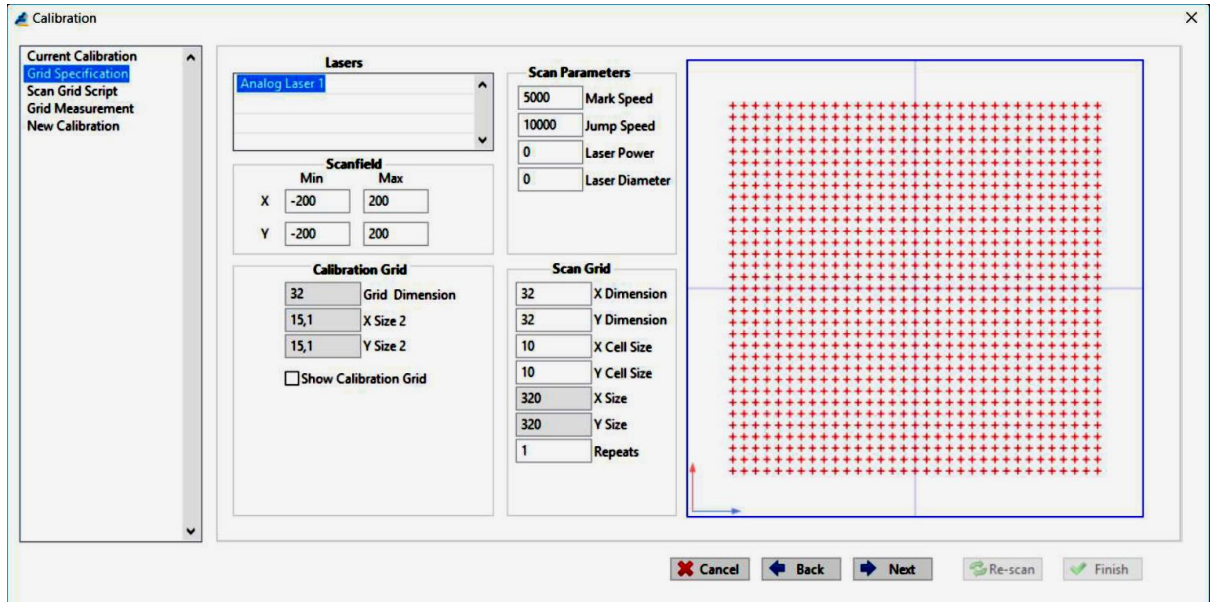


Рисунок 2.26. Інтерфейс програми Toolbox в режимі «Калібрування»

Toolbox це інструмент для налаштування контролера MCP. Toolbox дозволяє налагодити апаратне і програмне забезпечення контролера.

Панель інструментів програми Toolbox забезпечує доступ до налаштувань контролера MCP, здійснення управління в інтерактивному режимі з підтримкою мови програмування Lua. Панель інструментів також використовується для калібрування принтера.

Toolbox підтримує калібрування:

- потужності електронного променя;
- діаметра пучка електронів;
- геометрії поля сканування.

Перед початком друку необхідно виконати калібрування 3D принтера. Toolbox дозволяє здійснити корекцію форми та розмірів розгорток електронного променя в зоні побудови виробу.

2.8.4.4. Програма MCP Operator interface

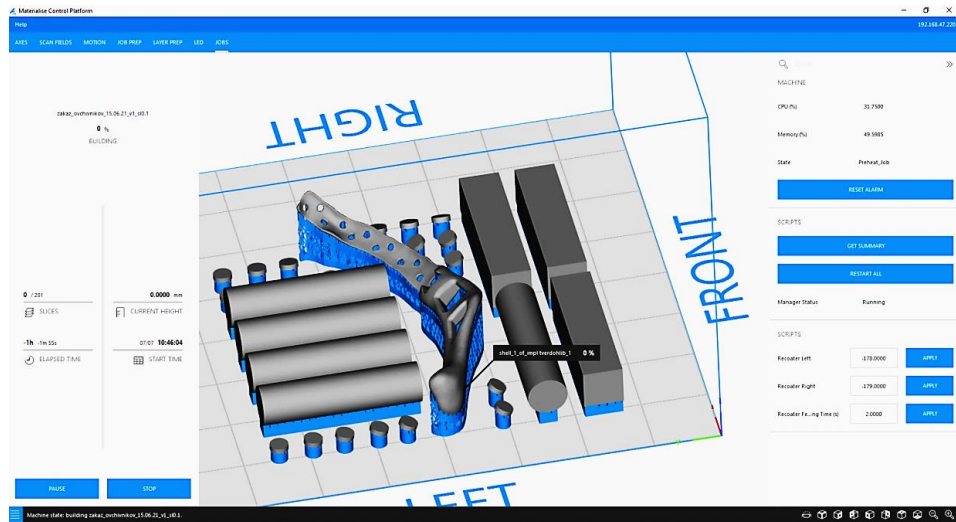


Рисунок 2.27. Програма MCP Operator interface

Зовнішній вигляд інтерфейсу програми MCP Operator interface наданий на рис. 2.27.

Програма MCP Operator interface призначена для управління технологічними параметрами та адитивним процесом. В програмі задаються параметри обладнання, а також в режимі реального часу контролюється і відображаються процес друку. Програма дає можливість вибрати файл моделі, визначити час початку і закінчення виробничого циклу, його стадію. Програма має тривимірну візуалізацію. В процесі друку можливо коректувати технологічні параметри обладнання.

2.8.4.5. Програма PLC

Програма PLC (програмований логічний контролер) створена для управління високовольтним джерелом живлення, який входить до складу енергоблоку устаткування.

Програма дозволяє контролювати і управляти в режимі реального часу параметрами високовольтного джерела:

- прискорююча напруга;
- струм електронного променя;
- напруга та струм бомбардування катода гармати;
- струм фокусування гармати.

Програма має функцію моніторингу стану високовольтного джерела.

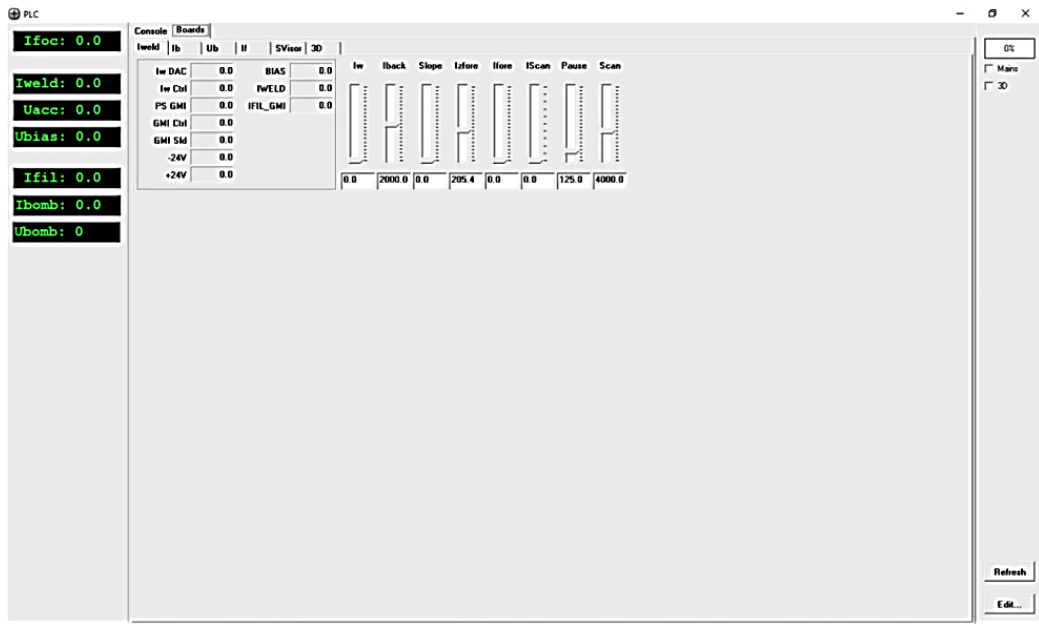


Рисунок 2.28. Інтерфейс програми PLC

Інтерфейс програми PLC наданий на рис. 2.28.

2.8.4.6. Програма HMI

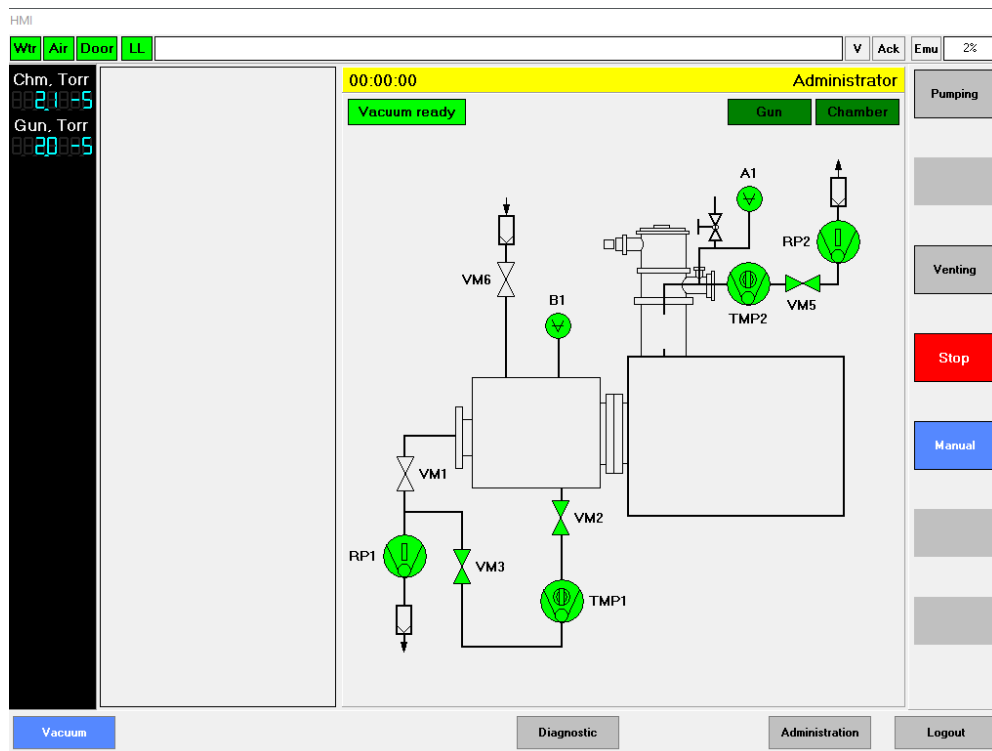


Рисунок 2.29. Інтерфейс програми управління вакуумною системою

Програма HMI (людина-машинний інтерфейс) створена для управління вакуумною системою 3D принтера. Вона дозволяє в автоматичному режимі (Pumping) керувати роботою вакуумної системи. В інтерфейсі програми (рис. 2.29) в режимі реального часу відображається стан вакуумних насосів

(RP1, RP2, TMP1, TMP2), електроклапанів (VM1 – VM6), сенсорів тиску вакуумної системи B1, електронно-променевої гармати A1, сенсорів тиску рідини в системі охолодження Wtr, тиску повітря в пневмосистемі Air, стану люку Door (відчинено/зачинено), а також стану готовності вакуумної системи (Vacuum ready). В інтерфейсі програми відображається значення тиску в вакуумній камері (Chm) та в електронно-променевої гарматі (Gun).

Управління вакуумною системою можливе в режимі Manual, що дозволяє адміністратору індивідуально управляти кожним пристроєм.

Висновки до розділу 2.

1. Визначена концепція побудови адитивного електронно-променевого устаткування, створено промисловий зразок адитивного обладнання.

2. Розроблено систему управління адитивним електронно-променевим обладнанням.

3. Досліджено вплив перешкод на сигнал вторинної електронної емісії, розроблено систему візуалізації процесів наплавлення в режимі реального часу із захищеним цифровим каналом передачі сигналу вторинної електронної емісії. Показано переваги створеної системи візуалізації ОПК над системою RASTR.

4. Визначено вплив магнітного поля Землі на положення електронного променя в процесі наплавлення, розроблений принцип корегування положення гармати для компенсації дії магнітного поля Землі. Створено юстувальний пристрій, розроблені методи юстування електронно-променевої гармати, калібрування розгорток та ефективного діаметра електронного променя.

5. Визначена концепція побудови програмно-апаратної платформи управління адитивним виробничим процесом.

6. Створена програмно-апаратна платформа управління адитивним виробничим процесом.

Результаты экспериментальных исследований данного раздела наведено в таких публікаціях:

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Нестеренков В.М., Хрипко К.С., Матвейчук В.А. (2018) Электронно-лучевые технологи сварки, наплавки, прототипирования – результаты и перспективы, Автоматическая сварка, 11-12, 142-150.
5. Матвійчук В.А., Нестеренков В.М. (2020) Адитивне електронно-променево обладнання для пошарового виготовлення металевих виробів із порошкових матеріалів, Автоматичне зварювання, 2, 44-49.
6. Матвійчук В.А., Нестеренков В.М., Берднікова О.М. (2022) Адитивна електронно-променево технологія виготовлення металевих виробів із порошкових матеріалів, Автоматичне зварювання, 2, 16-25.
7. 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
8. 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.

9. 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

10. 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

11. 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.

12. 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.

Розділ 3. Дослідження застосування металевих порошкових матеріалів

Відомо, що всі існуючі промислові розробки в галузі адитивних технологій належать зарубіжним компаніям. Використання в Україні технологій і машин для адитивного виробництва пов'язано з їх придбанням за кордоном та подальшими значними витратами на забезпечення сировиною – металевими порошковими матеріалами [55].

Витратні матеріали іноземного виробництва, які застосовуються в таких установках, мають ряд недоліків. До них можна віднести невідповідність складу порошків сплавам, які сертифіковані для підприємств України, а також відсутність вітчизняних промислових технологій їх отримання [57]. Таким чином має місце проблема імпортозаміщення та сировинного забезпечення адитивного виробництва в Україні [59].

Актуальним завданням є розробка установок на базі електронно-променевих процесів із застосуванням вітчизняних порошкових матеріалів, які сертифіковані та орієнтовані для впровадження на вітчизняних підприємствах [58,65,115].

Не слід залишати без уваги розробку нових рішень у виробництві титанових порошків, що дозволить знизити вартість сировини. До таких рішень можна віднести технологію отримання порошку титанових сплавів за принципом гідрування-дегідрування спеченого напівфабрикату (НДН) [69].

3.1. Дослідження застосування порошків титанового сплаву ВТ1-0

Метою досліджень є вивчення можливості застосування порошків титанових сплавів вітчизняного виробництва для виготовлення виробів методом адитивного електронно-променевого наплавлення.

Для досліджень задіяли порошок титанового сплаву ВТ1-0 виробництва АТ «Інститут титану» [71], який спільно с НДЦ «Титан Запоріжжя» Національного університету «Запорізька політехніка» розробив

інноваційну технологію виробництва порошків титану низької собівартості методом гідрування-дегідрування (НДН) з титану губчастого або інших титановмісних матеріалів.

Порошок ВТ1-0 є сплавом титану з гранулами довільної форми. Дослідний матеріал був отриманий методом термохімічного окрихнення спеченої заготовки сплаву ВТ1-0 за допомогою водню (метод гідрування-дегідрування, НДН) [72]. Для досліджень обрана фракція з розміром частинок від 63 до 100 мкм, які являють собою гранули титанового сплаву ВТ1-0 з литою мікроструктурою (рис.3.1).

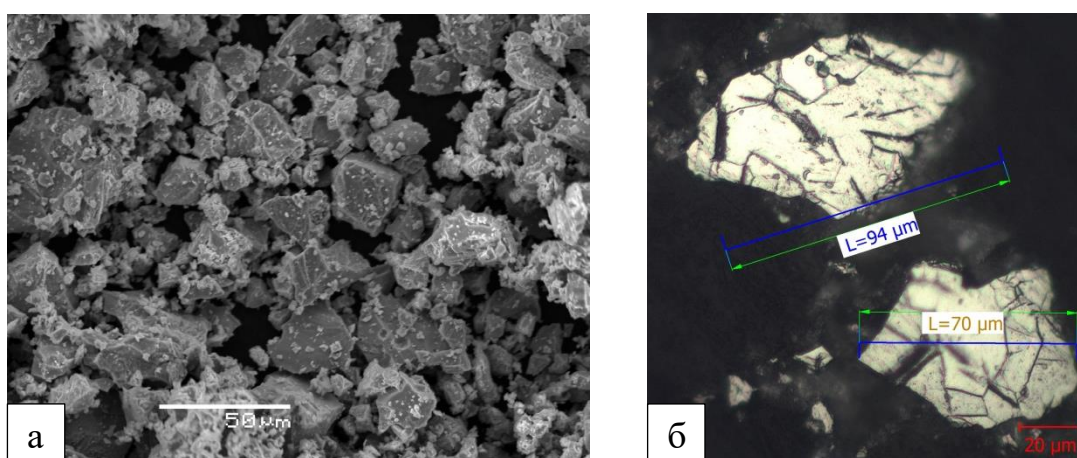


Рисунок 3.1. Зовнішній вигляд (а) і мікроструктура (б) НДН порошків ВТ1-0 фракції від 63 до 100 мкм

Технологічні характеристики та хімічний склад НДН титанового порошку ВТ1-0 наведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Технологічні характеристики та хімічний склад НДН титанового порошку ВТ1-0

Фракція, мкм	Плинність, с/50г	Щільність, г/см ³	Вміст домішок, % мас. часток					
			N	C	H	Fe	Si	O
63 - 160	11,3	1,7	≤0,05	≤0,1	0,012	≤0,3	≤0,15	≤0,15

Дослідження проводили на створеному адитивному устаткуванні [56].

Для реалізації адитивних процесів розроблене оснащення для пошарового наплавлення порошкових матеріалів (рис.5.2).

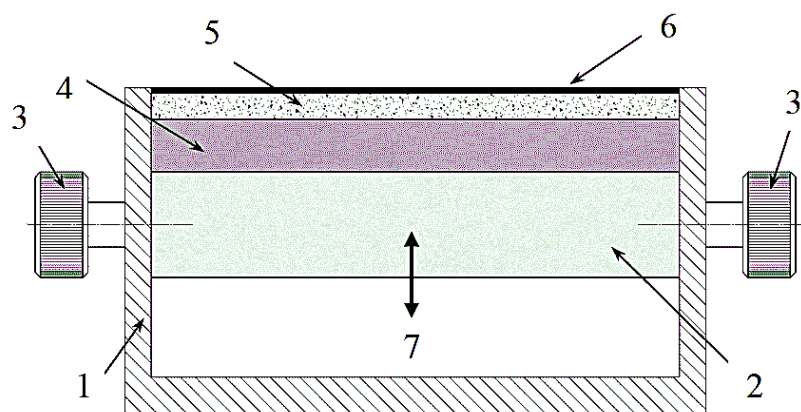


Рисунок 3.2. Оснащення для наплавлення: 1 – корпус; 2 – платформа; 3 – гвинт; 4 – підкладка; 5 – виріб; 6 – шар порошку; 7 – напрямок переміщення платформи

Оснащення встановлене до вакуумної камери адитивного устаткування. Конструкція пристрою забезпечує реалізацію технологічних чинників: можливість змінювати товщину шару наплавлення металевого порошку у діапазоні від 50 до 500 мкм; забезпечити формування простору побудови виробу довжиною 100 мм, шириною 15 мм та висотою 50 мм; застосувати підкладку із титанових сплавів; забезпечити ущільнення шару порошку, який формується [70].

Оснащення (рис. 3.2) складається з корпусу 1 та платформи 2, яка вертикально переміщується. Її положення фіксується гвинтами 3. На платформі встановлена підкладка з титану 4, на якій пошарово наплавляється виріб 5. Порошок на підкладку наноситься дозатором. Надлишки видаляються скребком, після чого шар ущільнюється. В процесі формується гладка поверхня із рівномірно розподіленим шаром порошку 6. Перед нанесенням наступного шару платформа 7 опускається. Висота шару порошку контролюється мікрометром. При цьому відстань між ЕПГ та поверхнею наплавлення залишається фіксованою.

Процес електронно-променевого наплавлення відбувається у вакуумній камері з тиском 10^{-2} Па. Сфокусований пучок електронів створює зону наплавлення і формує виріб, переміщаючись за заданою траєкторією. Після

наплавлення камера відкривається і наноситься наступний шар порошку. Деталь вирощується шар за шаром.

В процесі наплавлення отримані зразки виробів прямолінійної форми розмірами 12x12x100мм (рис. 3.3).

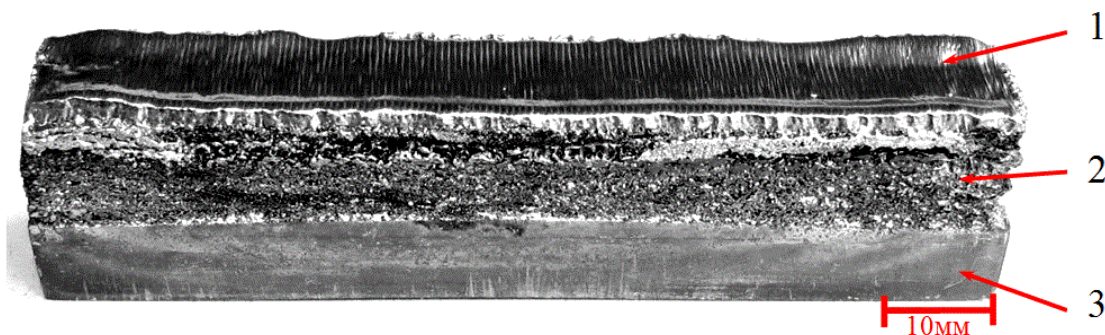


Рисунок 3.3. Зразок виробу, виготовлений методом електронно-променевого наплавлення: 1 – верхній шар; 2 – шар наплавленого металу; 3 – підкладка

На рис. 3.3 показано наплавлений виріб, де 1 – верхній шар, 3 – титанова підкладка з шарами наплавленого металу 2, на бічній поверхні якого є спечені частинки металевого порошку. Цей порошок надалі видаляється, а поверхня металу механічно обробляється. Після відпрацювання технологічних режимів наплавлення отримані зразки для подальших досліджень. Технологічні режими враховують розмір фракції та висоту шару порошку, швидкість і фокусування електронного променя, крок зміщення траєкторії наплавлення, На рис.3.4 наданий виріб після механічної обробки. Поверхня наплавленого металу оброблена фрезеруванням. Структура металу однорідна, без пошкоджень та включень.

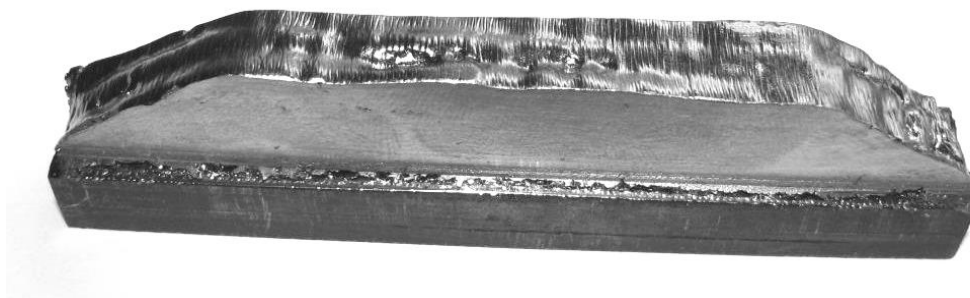


Рисунок 3.4. Виріб після механічної обробки

Дослідний зразок підготовлений до випробувань. В різних перетинах виробу проведені металографічні дослідження мікроструктури наплавленого металу (порошок титанового сплаву VT1-0 був наплавлений на підкладку із титанового сплаву VT-20).

Металографічними дослідженнями встановлено, що структура наплавленого металу складається з пластинчастої α -фази титану. Залежно від розміру шару та фракції порошкових матеріалів змінювалися розміри пластин голчастої α -фази, а також мали місце виділення α' -фази. Утворення гартувальних структур характерно для фракцій менше 80 мкм, що пов'язано з низькою енергією джерела та швидким тепловідведенням в шар сформованого литого металу (рис.3.5).

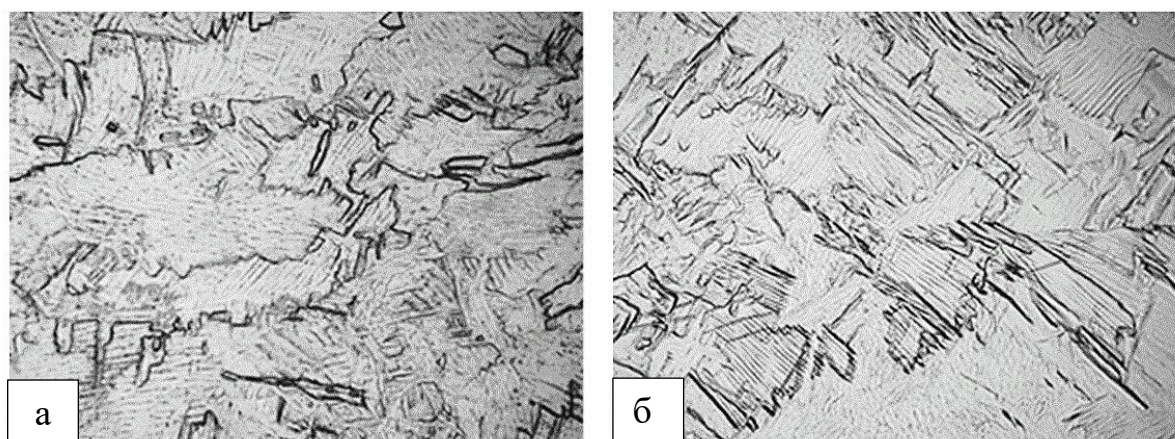


Рисунок 3.5. Мікроструктура металу в центрі наплавленого шару (x200): а – шар до 100 мкм; б – шар понад 100 мкм

Дослідження мікроструктури проведені у різних зонах зразку. Литя структура лінії сплавлення з підкладкою відрізняється розмірами і конфігурацією пластин α -фази. В перших шарах наплавленого металу пластини α -фази більші і мають більш полідральну форму, ніж у середній частині і на останніх шарах наплавлення (рис.3.6, 3.7). Це пов'язано із швидкістю охолодження: при малій швидкості утворюються більші пластини, а при збільшеній – формується дрібноголчаста α' -структура.

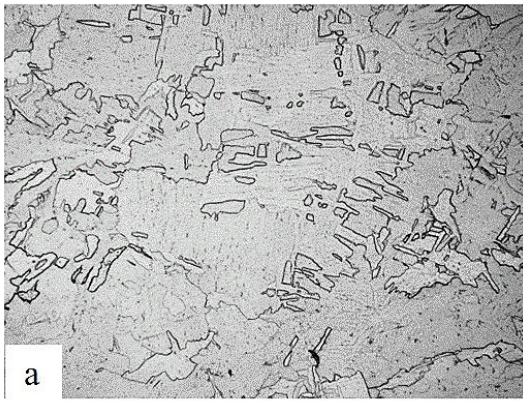


Рисунок 3.6. Структура наплавленого металу біля лінії сплавлення з підкладкою: а, б - зразки (x100)



Рисунок 3.7. Мікроструктура наплавлення у верхній частині виробу: зразки а – (x100), б – (x200)

На зовнішніх шарах наплавлення пластини витягнуті у напрямку тепловідведення та мають зазубрені границі (рис.3,8).



Рисунок 3.8. Структура металу зовнішніх шарів наплавлення: а, б – зразки (x100)

Перехідні зони шарів наплавленого металу відрізняються деяким подрібненням пластин та збільшенням кількості голчастої фази (α' -фаза) (рис.3.9).

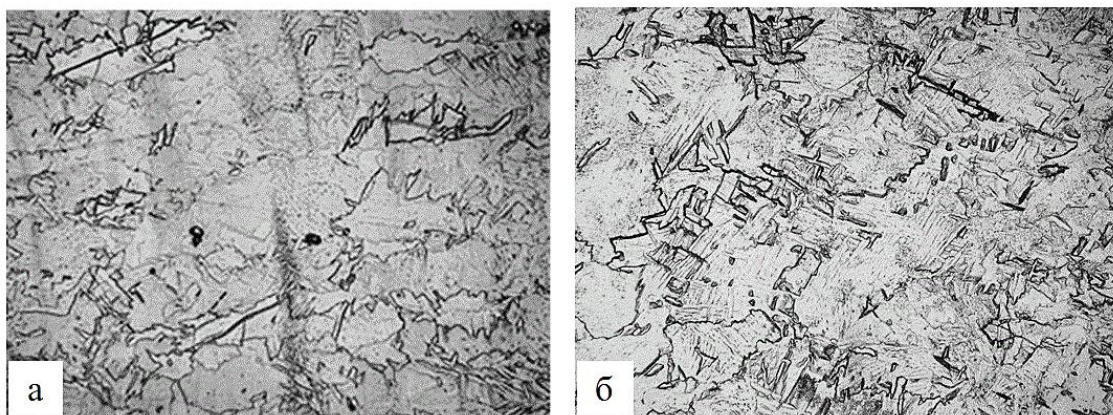


Рисунок 3.9. Мікроструктура наплавлення у центральній частині накладання шарів: зразки а – (x200); б – (x100)

В структурі зразка, що досліджувався, не виявлено дефектів - пор та несплавлень.

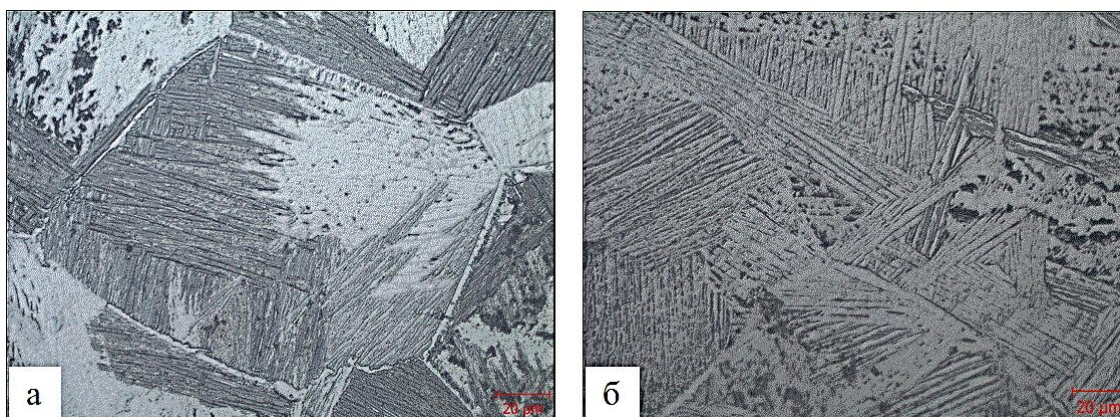


Рисунок 3.10. Мікроструктура шарів: а – шар 350мкм, б – шар 120мкм

Мікроструктура металу в наплавлених шарах надана на рис. 3.10.

Як впливає з аналізу мікроструктур наплавленого металу, у структурі зразка формуються характерні структурні зони, розмір яких залежить від їхнього положення за висотою наплавлення.

3.2. Дослідження застосування порошків титанового сплаву ВТ20

Для досліджень задіяний титановий порошок ВТ20 виробництва компанії ТОВ «Ті Текнолоджі» із Запоріжжя. Порошок є сплавом системи Ti-Mo-Al-V-Zr з гранулами довільної форми і литою мікроструктурою частинок (рис. 3.11). Сплав має відмінні антикорозійні, жаростійкі та механічні властивості. ВТ20 застосовують для виготовлення виробів авіаційного призначення, які тривалий час працюють в умовах температур до 500°C [59].

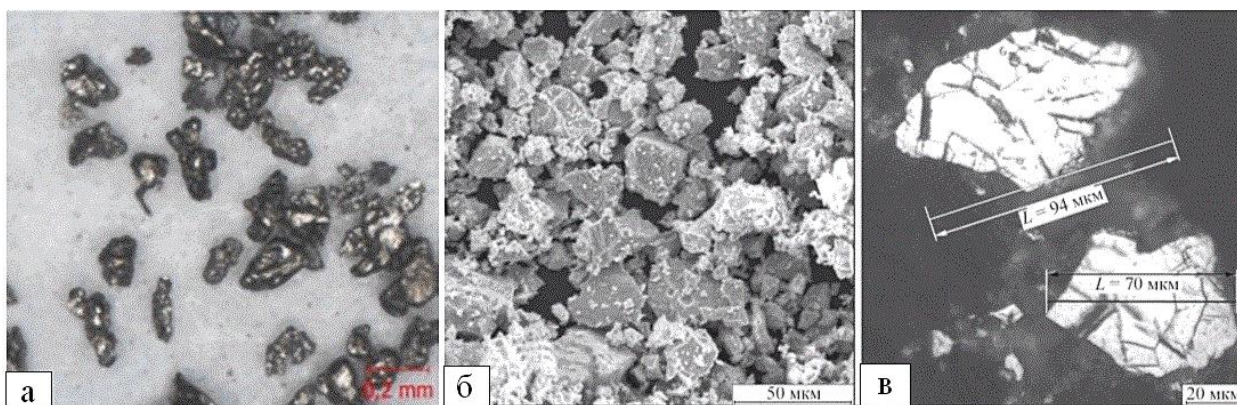


Рисунок 3.11. Зовнішній вигляд (а) та мікроструктура (б та в) порошків НДН ВТ20 фракції від 60 до 140 мкм

Експериментальний порошок був отриманий методом термохімічного окрихчення воднем спеченої заготовки сплаву ВТ20 (метод гідрування-дегідрування, НДН) [73]. Для досліджень обрано фракцію з розміром частинок від 60 до 140 мкм. Хімічний склад порошку ВТ20 наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2. Хімічний склад порошку ВТ20

Склад легуючих елементів, % мас. часток				Склад домішок, % мас. часток		
Zr	Mo	V	Al	N	H	O
1,5 – 2,5	0,5 – 2,0	0,8 – 2,5	5,5 – 7,0	0,05	0,015	0,15

Роботи з наплавлення виконували на створеному експериментальному адитивному обладнанні (рис. 2.2) [60].

Зразок виробу у формі полого циліндра вирощувався у вакуумній камері з тиском 10^{-2} Па.

Кожен шар виробу попередньо розігрівався електронним променем до стану початкового спікання гранул порошку, після чого порошок розплавлявся. Пучок електронів рухався за спіраллю Архімеда від більшого діаметра до меншого. По закінченню наплавлення формували наступний шар порошку. Таким чином виріб вирощувався за шаром. Висота шару порошку складала 300 мкм. Після наплавлення деталь охолоджували у вакуумі протягом 18 годин [59].

Фото виробу в камері 3D принтера надане на рис. 3.12.

Геометричні розміри зразка становлять: висота 35 мм, діаметр зовнішній 85 мм, внутрішній 55 мм,.



Рисунок 3.12. Виріб у вакуумній камері 3D принтера

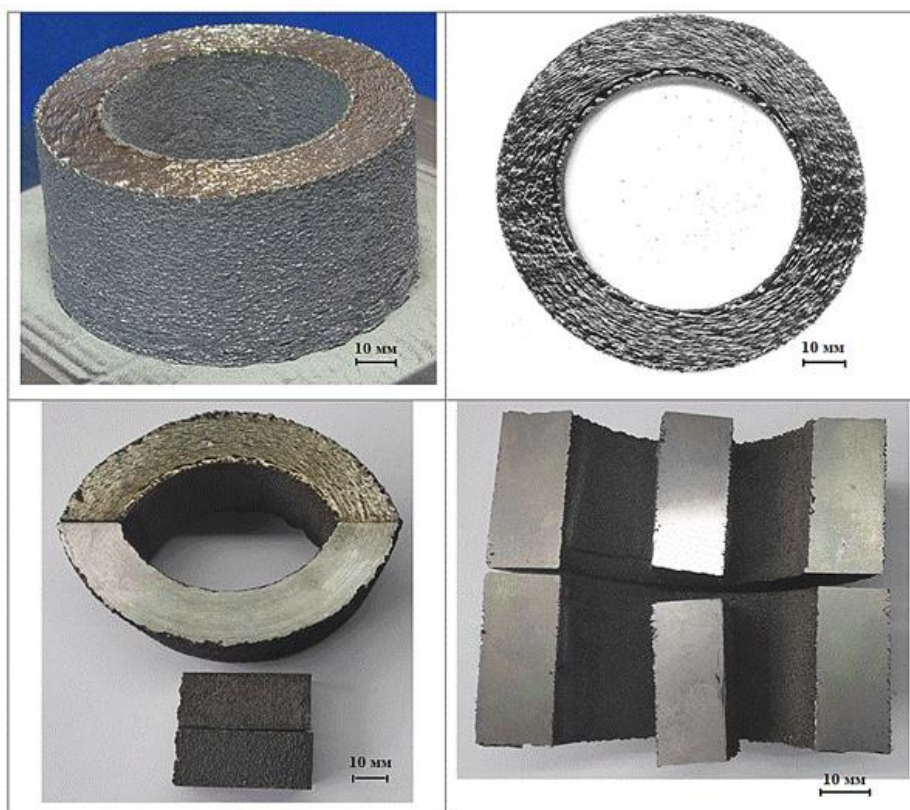


Рисунок 3.13. Зразок виробу

Дослідний зразок рис. 3.13 був підготовлений до подальших металографічних випробувань. Досліджували особливості формування структури наплавлення.

На електроерозійному верстаті здійснили поперечні різи, які шліфували наждачним папером та полірували з алмазною суспензією. Поверхні травили водяним розчином 15% HNO_3 та 5% HF . Мікроструктуру досліджували мікроскопом «Neophot-32», зображення фіксували фотокамерою Olympus C-500. Твердість за Вікерсом вимірювали на мікротвердометрі M-400 LEKO (навантаження 0,3Н, час докладання зусилля 10 секунд). Структуру і хімічний склад зразків досліджували методом електронної мікроскопії та рентген-дисперсійного мікроаналізу. Задіяли скануючий електронний мікроскоп JSM 7001F з прискорюючою напругою 20 кВ. За структурою спостерігали в режимі вторинних електронів (SEI) і в режимі зворотного розсіювання електронів (COMPO). Хімічний склад аналізували детектором INCA PentaFETx3 із застосуванням програми Oxford Instruments INCA 4.11. Для калібрування кількісного аналізу задіяли стандарт кобальту з чистотою

99,99%. Дослідження ступеня розподілу хімічних елементів проводили в режимі картування [59].

Досліджували поперечні розрізи зразка (рис. 3.14).



Рисунок 3.14. Макрошліф виробу з титанового сплаву BT20

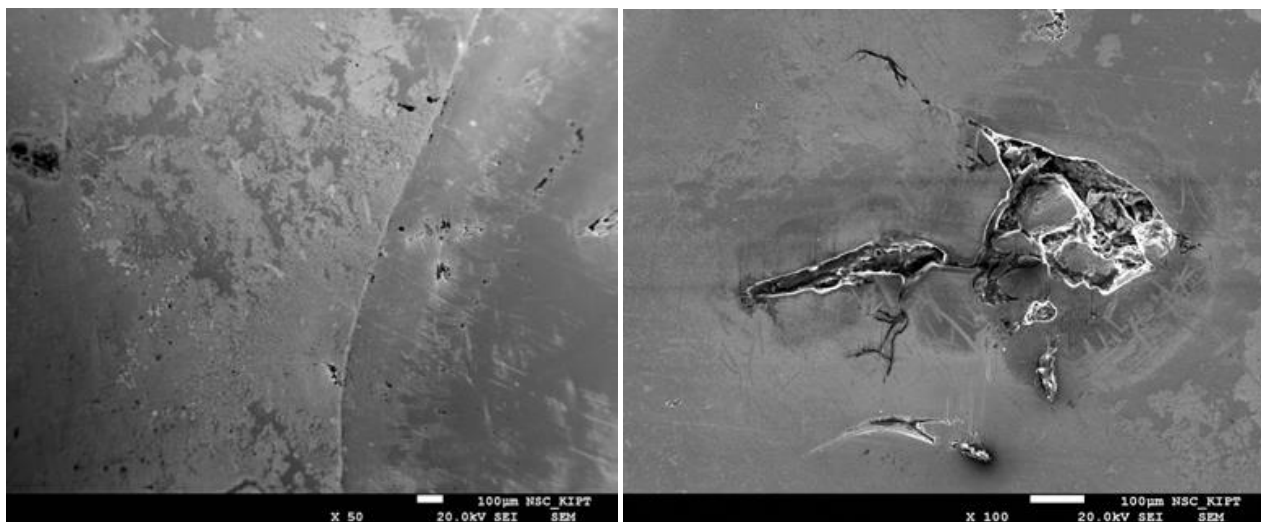


Рисунок 3.15. Дефекти на поверхні поперечного перерізу зразка

Аналіз шліфів визнав наявність щільної литої структури наплавленого металу. В цілому дефекти формування відсутні. Ближче до бокових поверхонь фіксуються окремі несплавлення (рис.3.15), які свідчать про необхідність коригування технологічного процесу наплавлення крайових шарів виробу. Способом усунення дефектів може бути попереднє

формування зовнішнього і внутрішнього контуру з подальшим заповненням міжконтурного простору.

Хімічний склад досліджували із застосуванням рентгеноспектрального мікроаналізу (РСМА), що є методом визначення складу речовини шляхом аналізу характеристичного рентгенівського випромінювання. Результати досліджень надані на рис. 3.16 та рис. 3.17. На дослідний об'єкт впливали електронним променем, який викликав рентгенівське випромінювання. За аналізом характеристичного рентгенівського випромінювання визначали які елементи та в яких кількісних співвідношеннях входять до складу речовини. Більшому вмісту елемента відповідає більш інтенсивний колір (рис. 3.16) або наявність піків на кривій інтенсивності за лінією або площею сканування (рис. 3.17) [59].

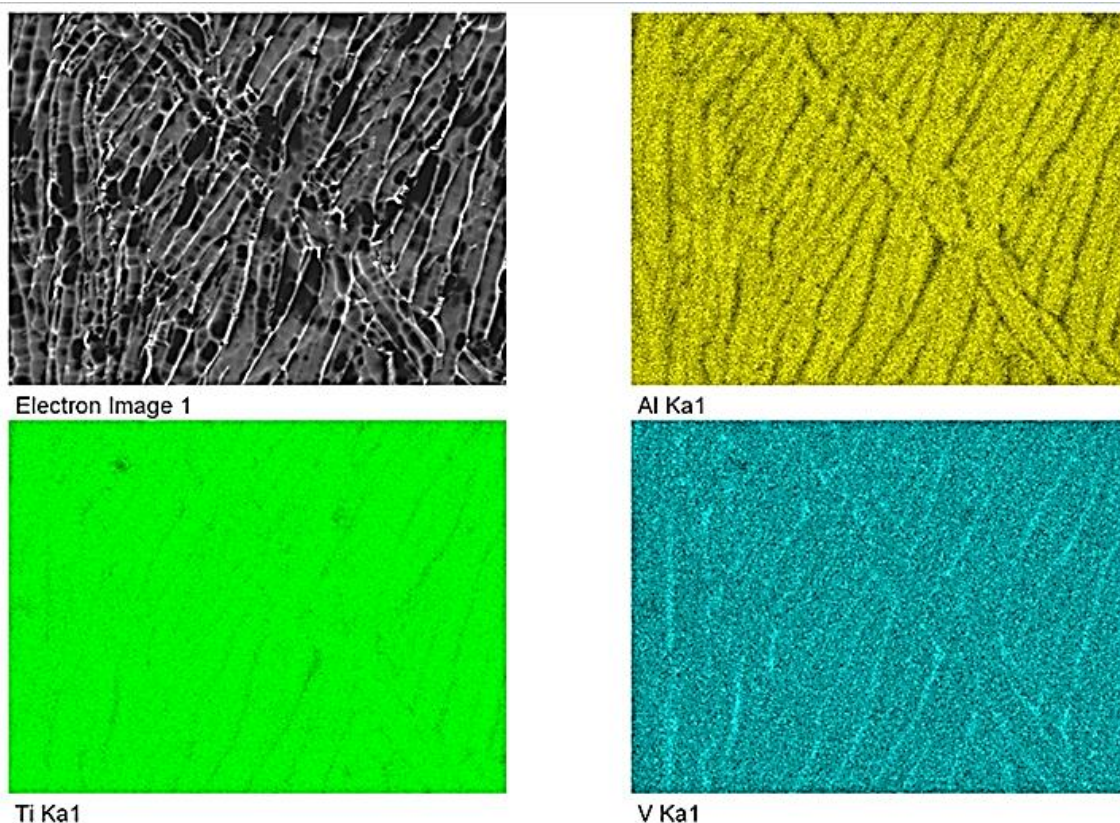


Рисунок 3.16. Рентгеноспектральний мікроаналіз розподілу алюмінію, титану та ванадію у зразку (зліва зверху – електронне зображення)

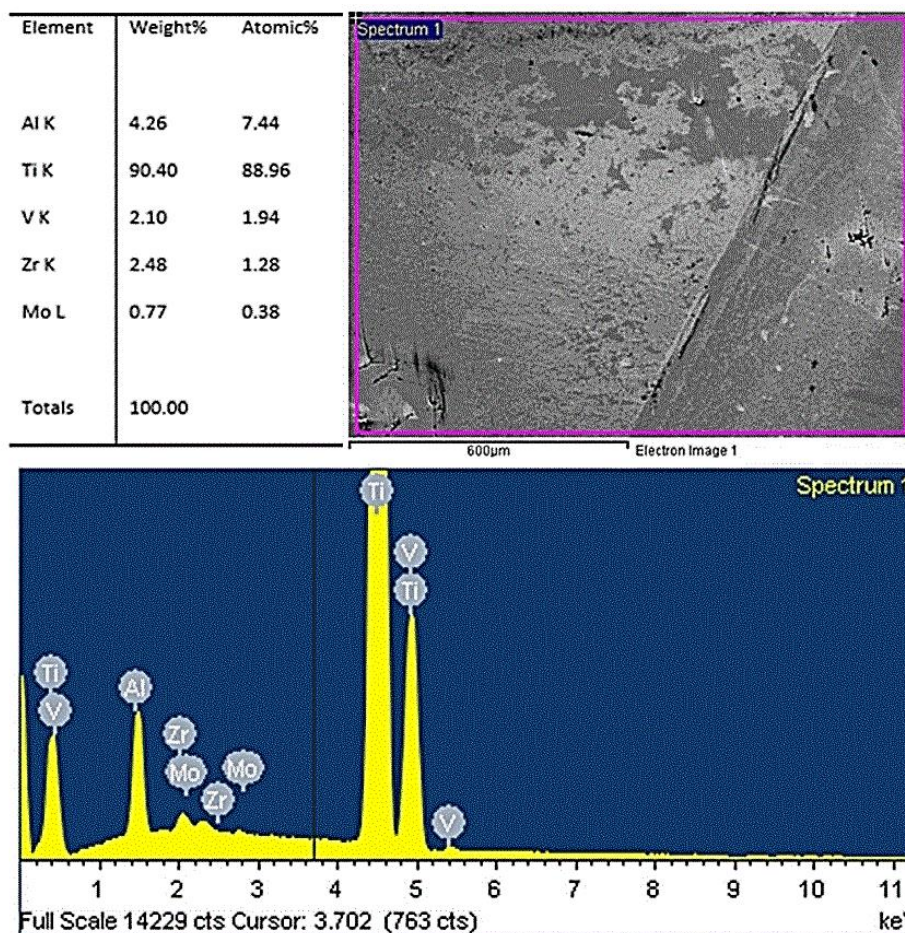


Рисунок 3.17. Елементний EDX аналіз зразка

Рентгеноспектральний мікроаналіз (рис. 3.16) підтверджує, що легуючі елементи розподілені рівномірно. Крім того, ванадій має підвищену концентрацію на межі зерен α -фази, що є характерним для титанових сплавів цієї системи легування.

Але, як показав інтегральний EDX-аналіз (метод енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії) (рис. 3.17), вміст алюмінію дещо відрізняється від хімічного складу сировини - порошку VT20 (табл. 3.2). 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. Відсоткове перевищення вмісту алюмінію у вихідній шихті слід підбирати емпірично залежно від типу сплаву[59].

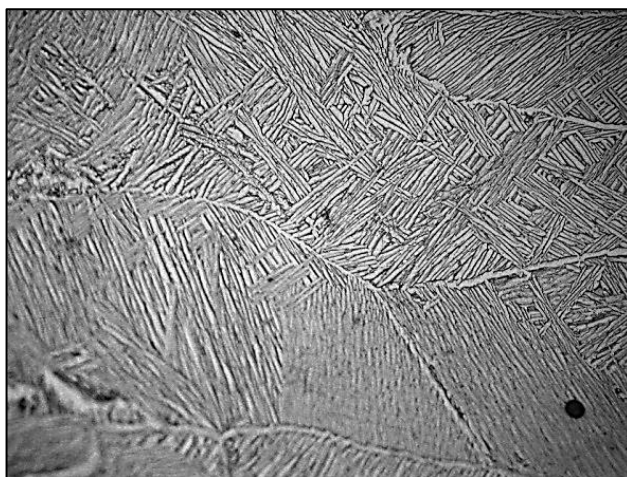


Рисунок 3.18. Мікроструктура наплавленого металу (порошок VT20), x500

В цілому мікроструктура наплавленого металу дрібнодисперсна і рівномірна за всім перерізом шліфа, являє собою кристаліти, які витягнуті в напрямку тепловідведення. Структура наплавлення в тілі кристалітів в основному є голчастою α' -фазою (пересичений твердий розчин заміщення легуючих елементів в α -титані) з незначним вмістом β -фази (рис.3.18). Межі зерен чисті без включень. Досліджуваний зразок не має пор, що свідчить про повне проплавлення порошкового шару в процесі 3D друку.

Твердість металу на всіх ділянках суттєво не відрізняється і знаходиться в межах від HV 3960 МПа до HV 4150 МПа.

Таким чином, дослідження показали, що розроблені адитивні способи електронно-променевого наплавлення дозволяє отримувати з несферичних порошків титанових сплавів VT-20 вироби складної форми з наявністю в них сформованих порожнин [59].

Висновки до розділу 3.

1. Досліджено адитивне електронно-променево наплавлення HDH порошків титанового сплаву VT1-0. Встановлено, що структура наплавленого металу складається з пластинчастої α -фази. Визначено, що структурні відмінності виявляються у розмірах та складових структури α -фази, що є наслідком різної швидкості охолодження шарів. Важливим є той факт, що незалежно від фракції порошку та розмірів шарів структури зразків являють

собою характерну для литих титанових сплавів α -фази. Це дозволяє зробити висновок, що форма порошкових матеріалів, у нашому випадку несферична, не впливає на структуру наплавленого металу.

2. Досліджено адитивне електронно-променеве наплавлення HDH порошоків титанового сплаву VT20 з гранулами довільної форми. Дослідження показали, що технологія адитивного електронно-променевого наплавлення дозволяє отримувати з порошоків титанових сплавів VT-20 складні вироби з хорошим формуванням литої структури наплавленого металу та однорідним хімічним складом. Виявлено, що мікроструктура наплавленого металу 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. Виявлено незначну пористість та підвищену шорсткість на краях виробу. Намічено способи їх усунення.

3. 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.

4. Показано впевнену роботу обладнання, що підтверджує правильність прийнятих конструктивних рішень. Визначено напрями подальших досліджень для вдосконалення адитивних електронно-променевих технологій.

Результати експериментальних досліджень даного розділу наведено в таких публікаціях:

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 BT1-0, Автоматическая сварка, 3, 5-10.

2. 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.

3. Нестеренков В.М., Матвейчук В.А., Русыник М.О., Янко Т.Б., Дмитренко А.Е. (2019) Микроструктура сплавов титана BT20, полученных методом послойной электронно-лучевой наплавки с применением отечественных порошковых материалов, Автоматическая сварка, 9, 7-13.

4. Матвійчук В.А., Нестеренков В.М. (2020) Адитивне електронно-промене обладнання для пошарового виготовлення металевих виробів із порошкових матеріалів, Автоматичне зварювання, 2, 44-49.

5. 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

6. 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.

7. 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

8. 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

9. 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

10. 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.

Розділ 4. Дослідження адитивних електронно-променевих процесів

У розділі 1.7 дисертації визначені труднощі, з якими стикаються виробники продукції при застосуванні адитивного обладнання. Номенклатура матеріалів і режими їх обробки обмежені виробником устаткування. Технологічні режими часто невідомі, бо приховані у програмному забезпеченні. При спробі вийти за ці обмеження для використання інших необхідних виробнику матеріалів виникають об'єктивні труднощі, які пов'язані з невизначеністю технологічних режимів для друку виробів з потрібними властивостями.

В роботі створено спосіб визначення раціональних режимів друку, досліджені та винайдені раціональні режими наплавлення виробів із титанових сплавів Ti-6Al-4V та TA15, які широко використовують в промисловості та в медичній галузі. Такий спосіб дозволив отримати стабільну та прогнозовану структуру виробів з підвищеними механічними властивостями. Це означає, що отриманий науковий результат є цікавим з теоретичної точки зору. З практичної точки зору результат досліджень дозволяє визначити раціональні режими друку виробів. Таким чином, прикладним аспектом використання отриманого наукового результату є можливість вдосконалення типового технологічного процесу електронно-променевого наплавлення. Це складає передумови для трансферу отриманих технологічних рішень у виробництво.

4.1 Технологічні процеси адитивного електронно-променевого виробництва

Створення адитивної електронно-променевої технології передбачає потребу визначити послідовність технологічних процесів наплавлення, провести аналіз параметрів друку та визначити етапи адитивного виробництва.

4.1.1 Послідовність технологічних операцій

Процес наплавлення за адитивною електронно-променевою технологією передбачає наступні технологічні операції [14, 23, 50].

1. *Вакуумування.* Для побудови виробів тиск в камері має бути приблизно 10^{-2} Па. Також у вакуумну камеру періодично вводиться невелика кількість інертного гелію при парціальному тиску $\sim 2 \times 10^{-1}$ Па для теплової стабільності процесу та запобігання електричного заряджання порошку [81, 99].

2. *Нагрівання платформи* виконують перед початком друку. Температура нагріву платформи залежить від типу матеріалу, що застосовують для наплавлення. Температура платформи для сплавів на основі титану становить ~ 730 °C [16], для сплавів на основі Ni-Fe ~ 1020 °C [14]

3. *Переміщення платформи.* Платформа зазвичай рухається вниз від 50 до 250 мкм в залежності розміру гранул металевого порошку та висоти шару.

4. *Нанесення порошку.* Шар порошку наносять на платформу.

5. *Попередній нагрів та спікання.* Розподілений на платформі шар металевого порошку потребує попереднього нагріву. Температура шару має становити від 60 до 80% від температури плавлення порошку. Нагрів виконують несфокусованим електронним променем до незначного спікання порошку, що допомагає підвищити електропровідність між гранулами [44].

6. *Формування опор.* Опори використовують переважно для забезпечення механічної цілісності виробу. Опори запобігають появі деформацій, які можливі внаслідок дії сил тяжіння або зростаючих механічних напружень [45].

7. *Створення контурів.* Як показано на рис. 4.1, край деталі є контуром і розплавляється, щоб отримати бажані поверхні виробу. Перевагами контурного плавлення є оптимізована обробка поверхні та забезпечення точності геометрії виробу. Як правило виконують два контури – внутрішній і зовнішній. Однак кількість внутрішніх контурів може бути більшою. Існує

перекриття між внутрішніми і зовнішніми контурами, а також між контуром та внутрішньою поверхнею виробу. Оптимізація параметрів формування контуру, наприклад струму пучка, його швидкості та фокусування, стратегії побудови контурів, їх кількості та перекриття є важливими для визначення якості поверхні виробів [80].

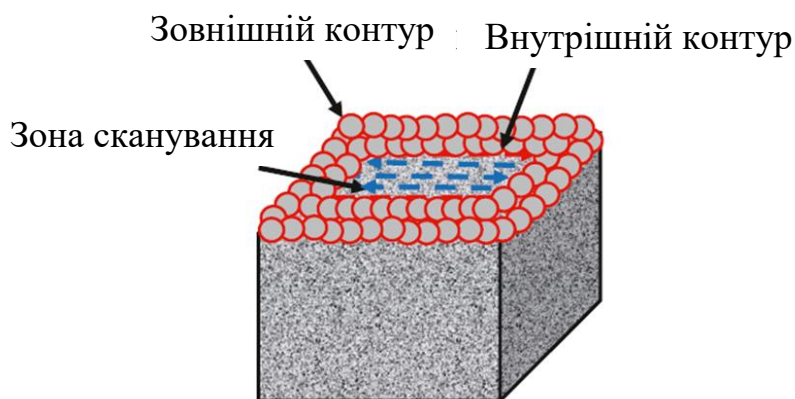


Рисунок 4.1. Схема формування контурів та зони побудови

8. *Сканування* є процесом, де відбувається формування внутрішнього простору виробу, його перерізу (рис. 4.1). Як правило при побудові використовують стратегію сканування «змійкою», яка передбачає лінійне та безперервне плавлення, коли промінь рухається вперед і назад [80].

9. *Кінцевий нагрів* виконують несфокусованим променем. Цей крок зазвичай застосовують після сканування для підтримування постійної температури збірки [81].

10. *Поступове створення виробу*: кроки з 3-го по 9-й повторюють для наступних шарів до закінчення побудови виробу.

11. *Охолодження*. Після завершення побудови виробу охолоджують до температури 100°C [98].

12. *Відновлення порошку*. Спечені частинки порошку видаляють в спеціалізованій камері шляхом очищення стисненим повітрям з додаванням металевго порошку. Як правило, видалений порошок використовується повторно [99].

4.1.2. Аналіз технологічних параметрів

В процесі електронно-променевого наплавлення існує багато параметрів які можливо прямо або опосередковано змінювати. Це передбачає, що деякі параметри задаються при налаштуванні обладнання, а деякі змінюються автоматично в процесі друку. До основних технологічних параметрів належать: струм променя, його фокусування і швидкість переміщення, стратегія сканування, товщина шару порошку [15].

Швидкість переміщення променя має зворотній вплив на кількість введеної енергії на одиницю об'єму матеріалу (густина енергії), отже швидкість суттєво впливає на мікроструктурні властивості виробу. Також важливий вплив на густину енергії має стратегія сканування – крок сканування та діаметр пучка електронів, який залежить від струму фокусування. Взаємозв'язок між цими параметрами наданий в (4.1) [16, 23, 39].

$$E = \frac{P}{S \times l \times h}, \quad (4.1)$$

де

E – густина енергії, Дж/мм³;

P – потужність електронного променя, Вт;

S – швидкість переміщення променя, мм/с;

l – крок зміщення траєкторії, мм;

h – товщина шару наплавлення, мм.

Потужність електронного променя визначається за рівнянням:

$$P = U \times I, \quad (4.2)$$

де

P – потужність електронного променя, Вт;

U – прискорююча напруга електронно-променевої гармати, кВ;

I – струм електронного променя, мА.

Струм променя має прямий зв'язок з введеною енергією (4.1), (4.2).

Зв'язок між струмом променя та швидкістю сканування дуже важливий для

процесу наплавлення через їх значний вплив на усунення дефектів і визначення зеренності структури [17, 23].

Фокусування електронного променя залежить від струму в котушках статичного і динамічного фокусування електронно-променевої гармати. При формуванні виробу струм в котушці статичного фокусування незмінний, для корекції фокусу задіяна котушка динамічного фокусування. Зміщення фокусу відбувається залежно від значення струму фокусування та його напрямку, що істотно впливає на геометрію розплавлених доріжок [80].

Схематична ілюстрація зміщення фокусу надана на рис. 4.2.

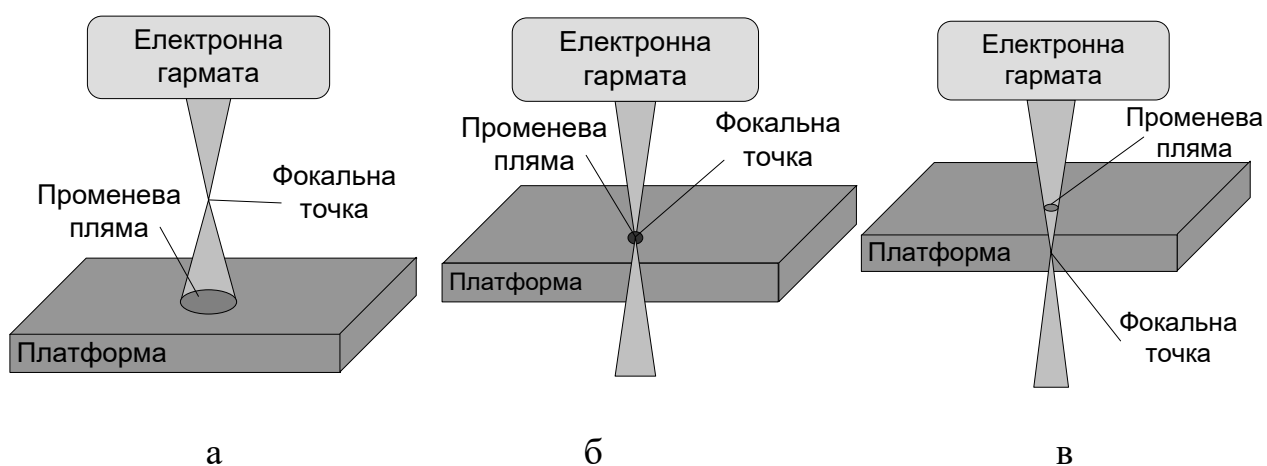
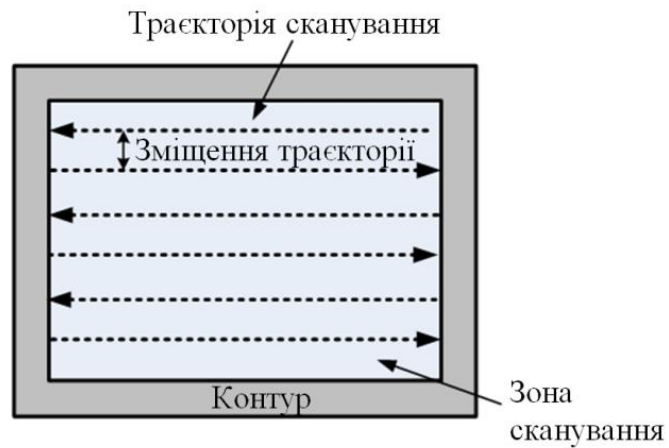


Рисунок 4.2. Схематична ілюстрація зміщення фокусу: положення фокальної точки *а* – над платформою; *б* – на платформі; *в* – під платформою

На розмір променевої плями впливає положення фокальної точки. Вона може бути вище платформи (рис.4.2 а), на платформі (рис.4.2 б) або нижче платформи (рис.4.2 с), та в більшості залежить від струму динамічного фокусування. Струм може мати негативне або позитивне значення в межах від $-2,0$ до $2,0\text{A}$.

Зміщення траєкторії. Параметр який визначає відстань між двома сусідніми проходами сканування променя [26]. Схематична ілюстрація зміщення траєкторії надана на рис 4.3.



a



б



в

Рисунок 4.3. Схематична ілюстрація: *a* – зміщення траєкторії; *б* – області перекриття з більшим зміщенням траєкторії; *в* – області з меншим зміщенням траєкторії

Зміщення траєкторії визначає відстань між двома сусідніми проходами променя (рис. 4.3 *a*). Оптимізація цього параметра є одним із підходів до зменшення кількості пор. Зміною зміщення траєкторії можна покращити перекриття між двома сусідніми проходами, що зменшує ризик присутності

нерозплавленого порошку у виробі. Навпаки, для більшого зміщення траєкторії ризик появи нерозплавленого порошку у нижній частині області перекриття може бути високим (рис. 4.3 б, в) [18, 26, 40].

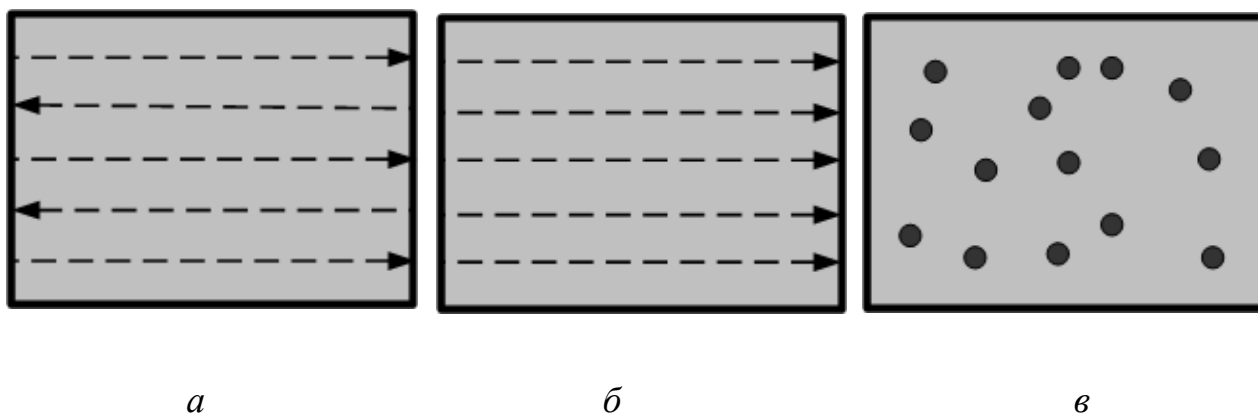


Рисунок 4.4. Стратегії сканування: *a* – односпрямоване;
б – двоспрямоване (змійчасте); *в* – точкове плавлення

Вибір траєкторії переміщення електронного променя під час наплавлення називається стратегією сканування, яку можна використовувати як інструмент для оптимізації структури виробу [19]. Можуть застосовуватися різні стратегії сканування (рис. 4.4), які включають односпрямоване (рис. 4.4 а), двоспрямоване (змійчасте) (рис. 4.4 б), та точкове плавлення (рис. 4.4 в).

У разі одно- або двоспрямованої стратегії, зазвичай застосовують обертання напрямку сканування під заздалегідь визначеним кутом між кожним шаром. Крім того, для конкретної стратегії сканування швидкість променя і струм повинні бути оптимізовані [2].

4.2. Етапи адитивного виробництва

Послідовність етапів адитивного електронно-променевого виробництва надана на рис. 4.5 [8, 128].



Рисунок 4.5. Етапи адитивного електронно-променевого виробництва

Спочатку створюється 3D-модель об'єкта для друку. Цю модель можна розробити за допомогою програмного забезпечення з використанням автоматизованого проектування (CAD) або за допомогою методів зворотної інженерії, наприклад, за допомогою об'єктного лазерного сканування. CAD-файл необхідно перетворити у стандартний формат для адитивного виробництва – зазвичай це файл STL. Для максимального заощадження витрат та зменшення відходів, слід перевірити розміщення та кількість об'єктів на платформі збірки виробів. Зазвичай за один раз друкують кілька деталей. Комп'ютерна модель збірки із застосуванням програмних засобів розкладається на шари [50].

Наступний етап вимагає передачі файлу до машини та її налаштування.

Далі машина, якою управляє комп'ютер, буде виробити шар за шаром. Товщина шару визначає остаточну якість і залежить від машини та особливостей процесу. Розмір виробів залежить від розміру машини [74].

Після побудови і охолодження виробів, збірку можна видалити з машини. Потім виконують очищення, полірування, та оздоблення поверхні деталей. Також може відбутися додаткова їх обробка до потрібного стандарту, наприклад термічна обробка або гаряче ізостатичне пресування. Це вимагає використання інших машин та інструментів.

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

Для розвитку технологій адитивного виробництва важливими є дослідження щодо пошуку технологічних режимів, які забезпечують формування виробів з необхідними властивостями з потрібної виробнику сировини. При цьому важливим є також вирішення задачі отримання якісних виробів з точки зору забезпечення бездефектної структури при відсутності несплавлень, пор, включень, тощо, у тому числі формування поверхонь з однорідним рельєфом.

4.3.1. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Визначення технологічних параметрів наплавлення за адитивною електронно-променевою технологією є необхідною складовою отримання виробів з потрібними властивостями [57,58,61,63,64].

В роботі [78] наведені результати досліджень впливу режимів електронно-променевого наплавлення на шорсткість поверхонь виробів з Ti-6Al-4V. Показано, що струм променя та функція швидкості є найважливішими параметрами обробки для стратегії спрямованого сканування. Але залишилися невирішеними питання, пов'язані з впливом фокусування електронного променя (зміщення фокусу) на формування поверхні виробів.

В роботі [79] результати показали, що зміщення фокусу надавало основний вплив на шорсткість поверхні виробів, більшою мірою, ніж струм і швидкість променя. Також в роботі зазначено, що зміщення фокусу сильно

вплинуло на густину виробів, більше ніж інші параметри. Але залишилися невирішеними питання, пов'язані з впливом технологічних параметрів на формування структур поверхні виробів.

В роботі [80] зроблено спробу системно, з використанням методів математичного аналізу зрозуміти вплив технологічних параметрів на формування поверхні виробів. Але практичного застосування ця робота не має, оскільки методи визначення режимів наплавлення відсутні.

В роботі [81] зазначено, що якість поверхні виробу залежить від функції швидкості та зміщення фокусу. Наплавлена поверхня виробу має виглядати рівною і гладкою, щоб отримати повністю щільні частини. Але в роботі відсутні методи визначення технологічних параметрів та режими наплавлення.

В роботі [82] стверджується, що оптимізовані параметри процесу електронно-променевого наплавлення виробів із титанового сплаву Ti-6Al-4V призводять до виготовлення деталей з аналогічними, якщо не кращими, механічними властивостями, ніж вироби, виготовлені з кованого металу.

Таким чином, подальша оптимізація параметрів процесу електронно-променевого наплавлення має першоступеневе значення для досягнення кращої якості поверхні виробів [83].

В роботі [80] зазначено, що на сьогоднішній день є обмежена кількість досліджень щодо впливу технологічних режимів на стан поверхні виробів. Тому все це дає підстави стверджувати, що доцільним є дослідити процес електронно-променевого наплавлення та визначити оптимальні технологічні параметри.

4.3.2. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є визначення раціональних технологічних режимів електронно-променевого наплавлення на основі виявлення впливу основних параметрів процесу на якісні показники виробів. Це дасть можливість застосувати отримані результати для виготовлення металевих виробів адитивним методом.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- проаналізувати технологічні параметри наплавлення;
- визначити технологічні режими друку;
- виготовити дослідні зразки;
- дослідити вплив параметрів друку на структуру поверхонь виробів та наявність дефектів.

4.3.3. Матеріали та методи дослідження

4.3.3.1 Устаткування та матеріали

Зразки для досліджень були виготовлені методом пошарового електронно-променевого 3Д друку на дослідному устаткуванні (рис. 4.6), створеному в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона (Україна) [60,62].



Рисунок 4.6. Експериментальна установка для електронно-променевого 3Д друку: 1 – вакуумна камера; 2 – електронно-променева гармата; 3 – шафи управління; 4 – високовольтне джерело

Процес наплавлення відбувався у вакуумній камері 1 електронно-променевого устаткування (рис. 4.6). Прискорююча напруга електронно-променевої гармати 2 становила 60 кВ. Попередній нагрів шару порошку до температури 730 °С здійснювали растровим променем потужністю 1700 Вт із

швидкістю сканування 14,6 м/с (задіяна схема растрування з 8 проходів). Робочий тиск у вакуумній камері при наплавленні складав 10^{-2} Па.

Для друку зразків задіяний порошок титанового сплаву Ti-6Al-4V ELI виробництва китайської компанії Sino-Euro Materials Technologies of Xi'an Co., Ltd. Порошок отриманий методом плазмової плавки та відцентрового розпилення (технологія PREP). Гранули порошку мають сферичну форму з мінімальними дефектами.

Технологічні характеристики і хімічний склад порошку Ti-6Al-4V ELI відповідають стандарту ASTM F2924 та надані в табл. 4.1, 4.2 [84, 24].

Таблиця 4.1. Технологічні характеристики порошку Ti-6Al-4V ELI

Фракція, мкм		45–106
Розподіл по фракціях (PSD), мкм	D10	53–58
	D50	85–90
	D90	125–130
Плинність, с/50г		20–25
Густина, г/см ³		2.5–2.7
Вміст кисню, ppm		500–1800

Таблиця 4.2. Хімічний склад порошку Ti-6Al-4V ELI за ASTM F2924

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	Баланс	≤0,08	≤0,05	≤0,015

Порошок PREP є кращим для електронно-променевого адитивного виробництва [12].

4.3.3.2. Методи досліджень

Для досліджень надруковано партію експериментальних зразків. Кожен зразок був випробуваний. Досліджено вплив параметрів друку на формування поверхні виробу.

На першому етапі випробувань досліджено шорсткість поверхні зразків.

Для цього визначено параметри висоти мікронерівностей рельєфу (рис. 4.7): h_i - відстань між лінією западин та виступів на поверхні виробу, які утворюються під впливом електронного променя, та параметр S_i – крок нерівностей виступів між вершинами.

Дослідження морфології поверхні зразків проводили з використанням аналітичної растрової електронної мікроскопії (РЕМ, мікроскоп SEM-515 фірми Philips, Нідерланди).

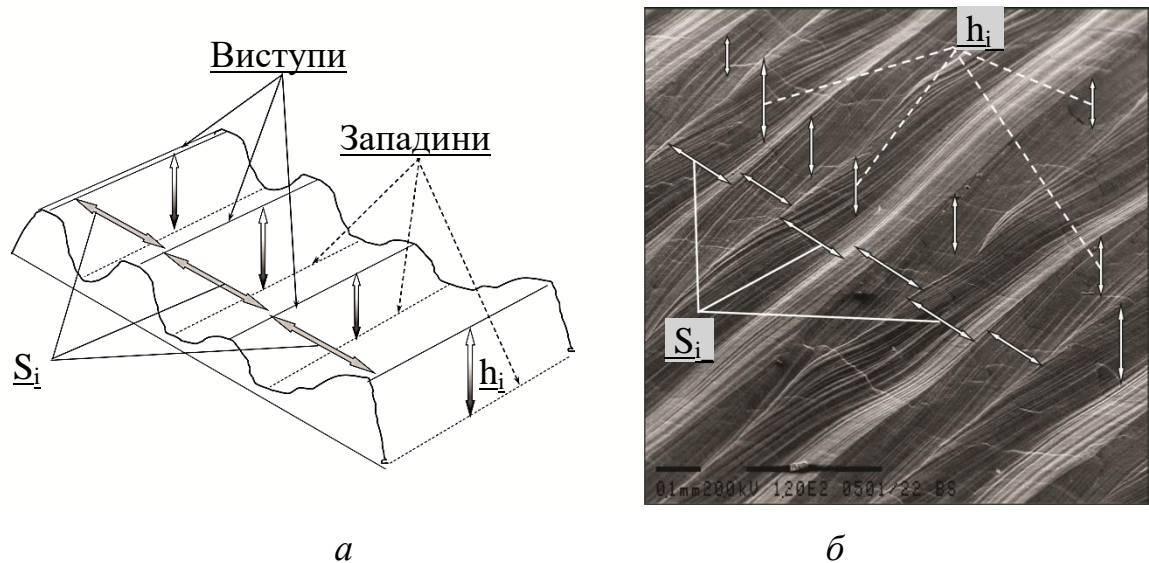


Рисунок 4.7. Зображення мікрорельєфу поверхні дослідних зразків: *a* – схема; *б* – структура

Для кожного виробу проведено зйомку структури в центральній зоні та за контуром при різних збільшеннях, у тому числі з нахилом зразка для вимірювання параметру h_i . Досліджено наявність дефектів: пор, несплавлень, включень. Проведено опис структур та вимірювання параметрів шорсткості поверхні у досліджуваних зонах. Визначено вплив технологічних режимів на утворення дефектів.

4.3.4. Результати досліджень технологічних параметрів наплавлення та їх впливу на якісні показники виробів

4.3.4.1. Визначення технологічних режимів друку

Важливим етапом досліджень є визначення технологічних параметрів друку. Для цього необхідно отримати режими електронного променя: потужність, швидкість переміщення, струм фокусування. Також потрібно

визначити технологічні параметри: товщину шару наплавлення, стратегію сканування, діаметр променя, крок зміщення траєкторії друку.

Товщину шару наплавлення встановлено 0,1 мм, що дорівнює максимальному розміру гранул порошку Ti-6Al-4V ELI. Гранулометричний склад наданий в табл. 4.2.

Діаметр пучка електронів становить 0,25 мм для струму фокусування променевої гармати 570 мА. Струм фокусування винайдений експериментально, шляхом впливу електронного променя на мішень із міді. Знайдено фокусування, яке відповідає найменшому діаметру плями променя на платформі, де вирощується виріб. Методом сканування вольфрамового дроту визначено ефективний діаметр пучка електронів.

Крок зміщення траєкторії прийнятий 0,2 мм, що забезпечує достатнє перекриття ліній сканування при переміщенні електронного променя.

Далі необхідно визначити параметри швидкості переміщення променя та його потужність.

Оскільки ці параметри залежать від властивостей сировини (порошку Ti-6Al-4V ELI), то була проведена серія експериментів з наплавлення виробів за різними технологічними режимами. Фото отриманих зразків надане на рис. 4.8.

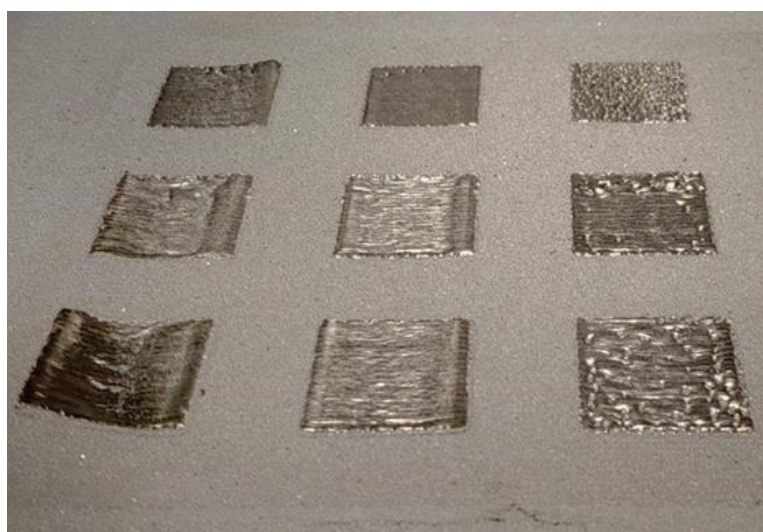


Рисунок 4.8. Експериментальні зразки

В результаті експериментів отримані вироби з гладкою і бездефектною структурою поверхні (рис. 4.9) та знайдені оптимальні режими наплавлення (табл. 4.3), які відповідають малій (240 мм/с), середній (540 мм/с) та великій (780 мм/с) швидкості переміщення променя [27,31,37].



a

б

в

Рисунок 4.9. Зразки виробів: *a* – зразок № 1; *б* – зразок № 2; *в* – зразок № 3

Таблиця 4.3. Технологічні режими друку зразків

Номер зразка	Параметри променя	
	Швидкість, мм/с	Потужність, Вт
1	240	270
2	540	495
3	780	675

За результатами експерименту обраховано оптимальне співвідношення між швидкістю переміщення променя та його потужністю (рис. 4.10), створена функція швидкості. В межах цієї функції із порошку Ti-6Al-4V ELI забезпечується висока якість виробів.

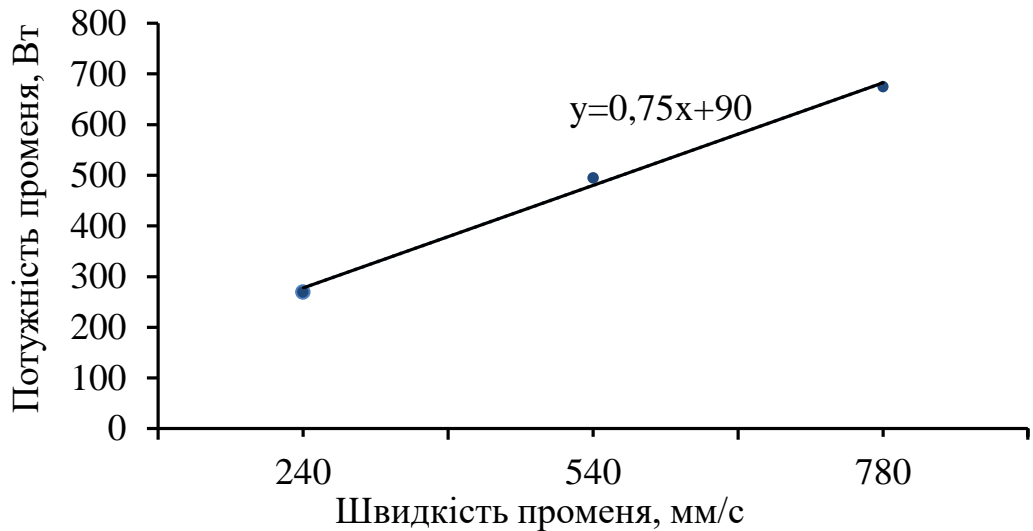


Рисунок 4.10. Функція швидкості для порошку Ti-6Al-4V ELI

Співвідношення між потужністю та швидкістю переміщення променя визначено за рівнянням (4.3), яке є емпіричним:

$$P = 0,75 S + 90, \quad (4.3)$$

де P – потужність електронного променя, Вт;

S – швидкість переміщення, мм/с.

За (4.1) обчислено густину енергії, яку необхідно ввести на одиницю об'єму матеріалу для формування шару наплавлення.

Оптимальне значення густини енергії, необхідної для побудови виробу (зразок № 2, рис. 4.9) з порошку Ti-6Al-4V ELI відповідно до даних табл. 4.3 (зразок №2), становить:

$$E = \frac{495 \text{ Вт}}{540 \frac{\text{мм}}{\text{с}} \times 0,2 \text{ мм} \times 0,1 \text{ мм}} = 45,8 \frac{\text{Дж}}{\text{мм}^3}, \quad (4.4)$$

де 495 Вт – потужність променя; 540 мм/с – швидкість його переміщення; 0,2 мм – крок зміщення траєкторії; 0,1 мм – товщина шару порошку.

Розрахункове значення густини енергії для інших режимів наплавлення надане в табл. 4.4

Таблиця 4.4. Густина енергії для порошку Ti-6Al-4V ELI

№ п/п	Потужність променя, Вт	Швидкість переміщення, 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					44,5

Середнє значення густини енергії (табл. 4.4), необхідної для формування виробів із порошку Ti-6Al-4V ELI, становить:

$$E = 44,5 \frac{\text{Дж}}{\text{мм}^3} . \quad (4.5)$$

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

4.3.4.2. Виготовлення дослідних зразків

Із порошку титанового сплаву Ti-6Al-4V ELI [84] для подальших випробувань надруковано партію дослідних зразків (рис. 4,11).

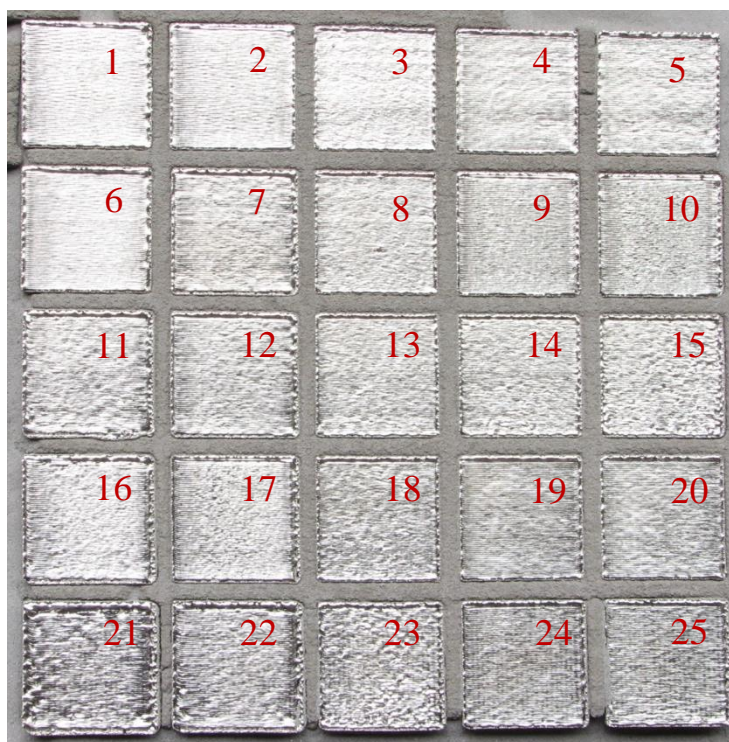


Рисунок 4.11. Дослідні зразки з титанового сплаву Ti-6Al-4V ELI

Вироби мають прямокутну форму розміром 24×24 мм та висоту 10 мм, з якої 5 мм складають технологічні опори і 5 мм тіло виробу.

Морфологія поверхні типового дослідного зразка надана на рис. 4.12.

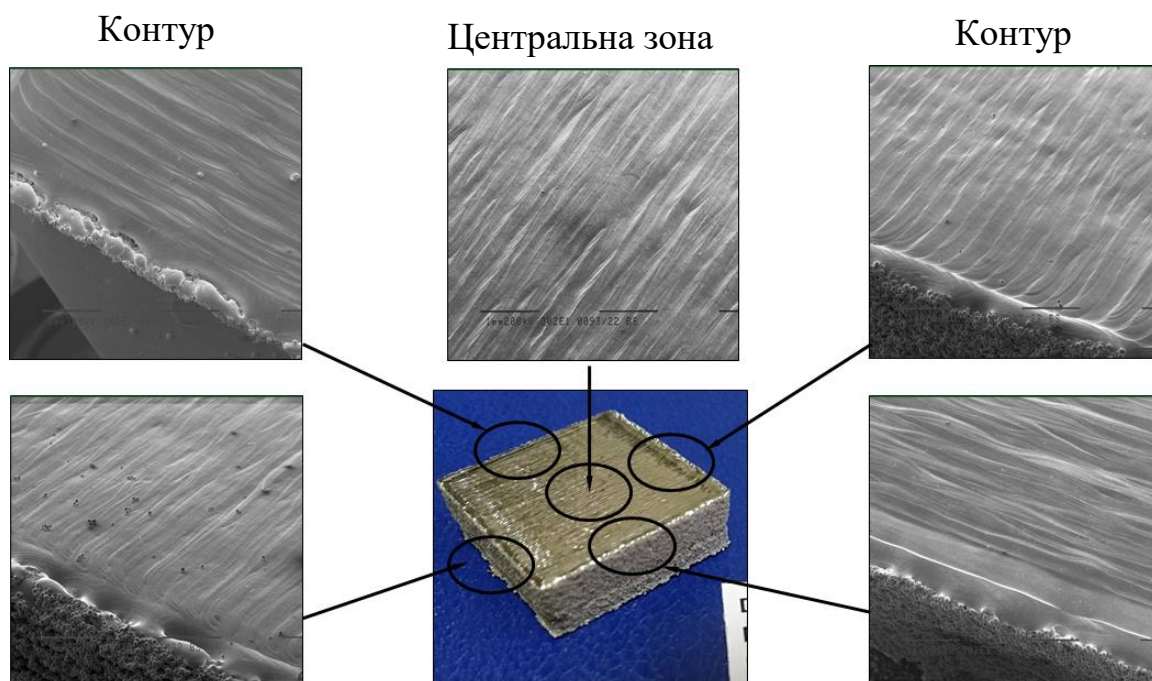


Рисунок 4.12. Морфологія типового дослідного зразка

Для друку задіяли технологічні параметри: густина енергії 44,5 Дж/мм³; крок зміщення траєкторії променя 0,2 мм; товщина шару порошку 0,1 мм; стратегія сканування – двоспрямована з обертанням напрямку на 90° для кожного шару.

За (4.1) визначені швидкість переміщення променя та його потужність.

Параметри друку наведені в табл. 4.5.

Таблиця 4.5. 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

4.3.4.3. Дослідження впливу параметрів друку на структуру поверхонь виробів та наявність дефектів

Досліджено зразки виробів, що надруковані на трьох технологічних режимах друку (табл. 4.3). Для кожного із виробів змінним параметром був струм динамічного фокусування (I_{df}), який змінювався від $-1,2$ А до $1,27$ А (табл. 4.5). Характерну морфологію поверхні зразків для третього режиму друку (табл. 4.4) наведено на рис. 4.13.

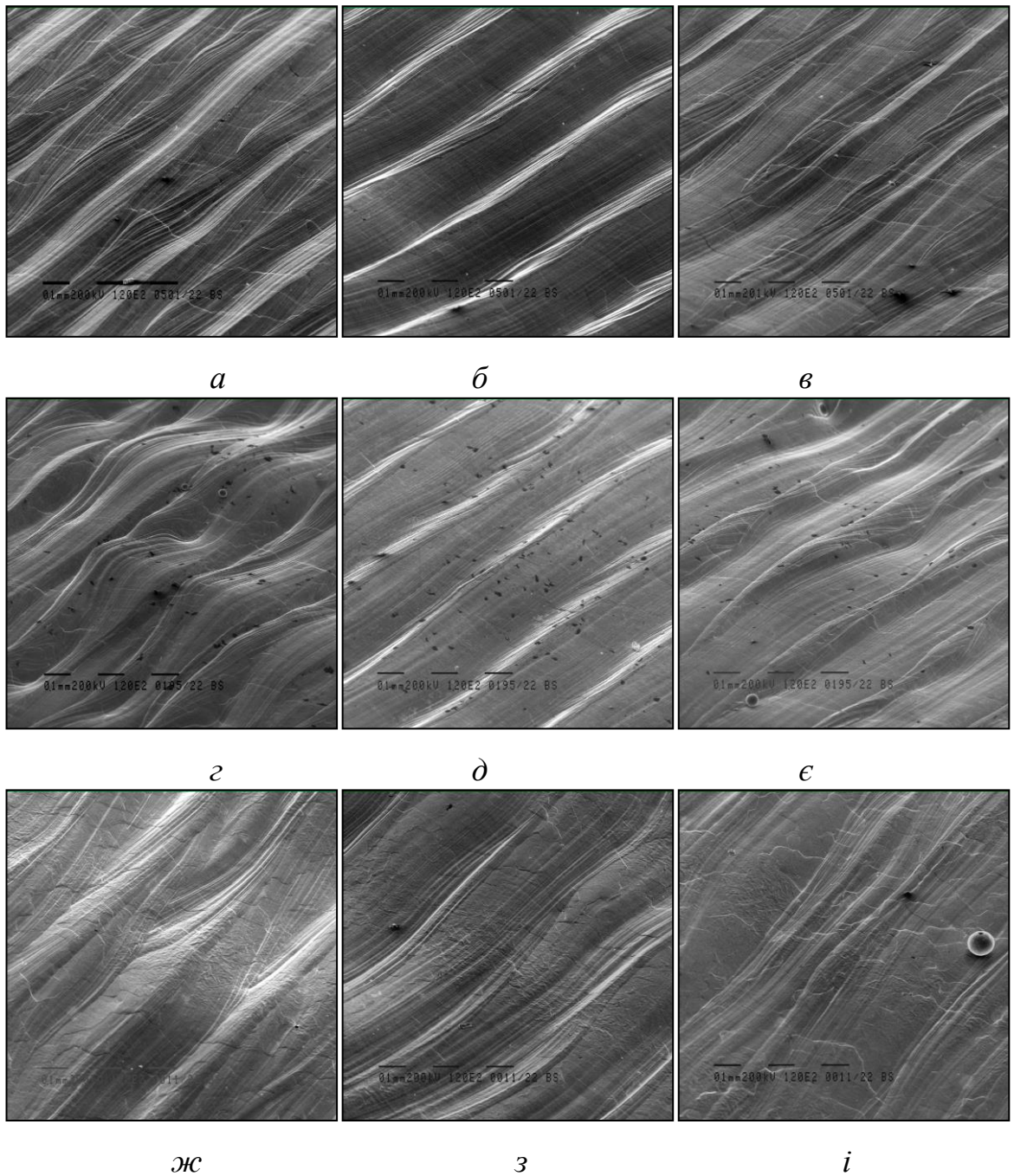


Рисунок 4.13. Рельєф поверхні ($\times 120$) у різних зонах виробів при швидкості променя 780 мм/с та потужності 675 Вт в залежності від струму динамічного фокусування (I_{df}): *a* – у центральній зоні при $I_{df}=-1,2$ А (зразок № 6); *б* – у зоні контуру з одного боку при $I_{df}=-1,2$ А (зразок № 6); *в* – у зоні контуру з іншого боку при $I_{df}=-1,2$ А (зразок № 6); *г* – у центральній зоні при $I_{df}=0$ А (зразок № 17); *д* – у зоні контуру з одного боку при $I_{df}=0$ А (зразок № 17); *е* – у зоні контуру з іншого боку при $I_{df}=0$ А (зразок № 17); *ж* – у центральній зоні при $I_{df}=1,27$ А (зразок № 21); *з* – у зоні контуру з одного боку при $I_{df}=1,27$ А (зразок № 21); *и* – у зоні контуру з іншого боку при $I_{df}=1,27$ А (зразок № 21)

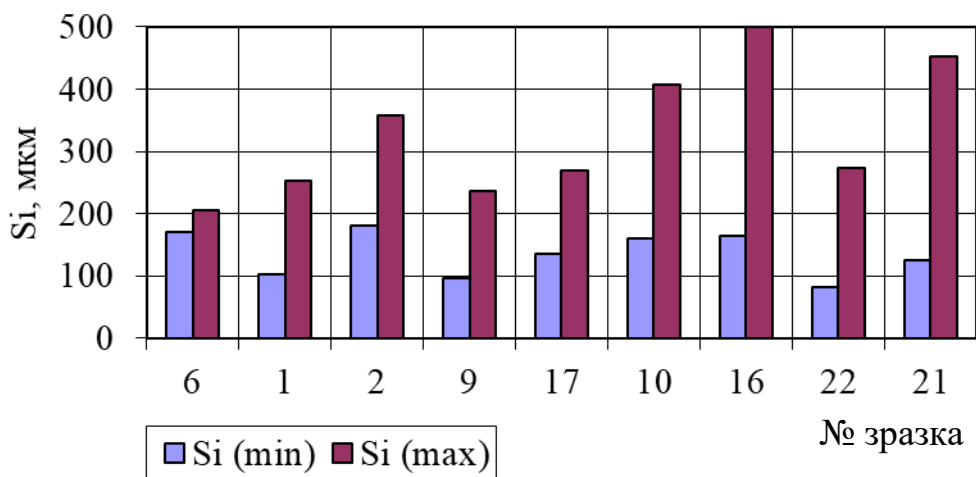
Для виробів, що надруковані із швидкістю переміщення електронного променя 780 мм/с та потужністю 675 Вт (№1, 2, 6, 9, 10, 16, 17, 21, 22, табл. 4.5), встановлено наступне. У зонах контуру зразків у порівнянні з центральною зоною виробів (рис. 4.13 *a–e*) крім режимів при I_{df} : 0,65 та 1,27 А (рис. 4.13 *ж–i*), спостерігається збільшення параметру S_i .

Така ж тенденція зберігається і для параметра висоти мікронерівностей рельєфу (h_i). Максимальні значення S_i у центральній зоні зразків характерні для виробів, які отримані зі струмом динамічного фокусування I_{df} : 0,33; 0,65; 1,27 А (рис. 4.13 *ж*, рис. 4.14 *a*). Найменші значення S_i у центральній зоні спостерігаються для режимів I_{df} : –1,2 (рис. 4.13 *a*); –0,9; –0,61; –0,31; 0 (рис. 4.13 *z*) та 0,96 А. При цьому мінімальна висота мікрорельєфу (h_i) забезпечується при I_{df} : –1,2; –0,9; –0,61; 0 А (рис. 4.13 *z–e*, рис. 4.14 *b*).

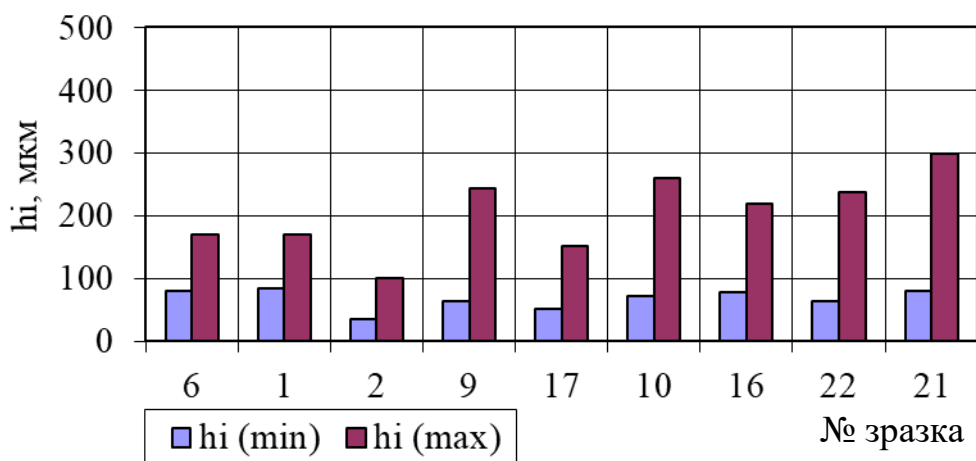
Також для поверхонь виробів характерна наявність таких дефектів, як мікронерівності, усадочні пори, несплавлення (в зоні контуру) і оплавлені ділянки (на межі контуру зразків). Відсутність усадочних пор та несплавлень характерна для зразків, які отримані за режимами I_{df} : –0,61; –0,31 А. Поодинокі пори спостерігаються у центральній зоні виробів, що отримані за режимами I_{df} : –1,2; –0,9 А. Найбільша, але не значна, кількість усадочних пор спостерігається у зразках, які отримані за режимами I_{df} : 0,65; 0,96; 1,27 А.

Аналогічні дослідження були проведені для всіх зразків, що надруковані (табл. 4.5).

Аналіз експериментальних досліджень мікроструктури поверхонь методом РЕМ, а також статистичні результати вимірювань параметрів мікронерівностей поверхні профілю дослідних зразків дозволили зробити узагальнення отриманих результатів. Встановлено, що вироби характеризуються переважно однорідним мікрорельєфом профілю поверхонь.



a

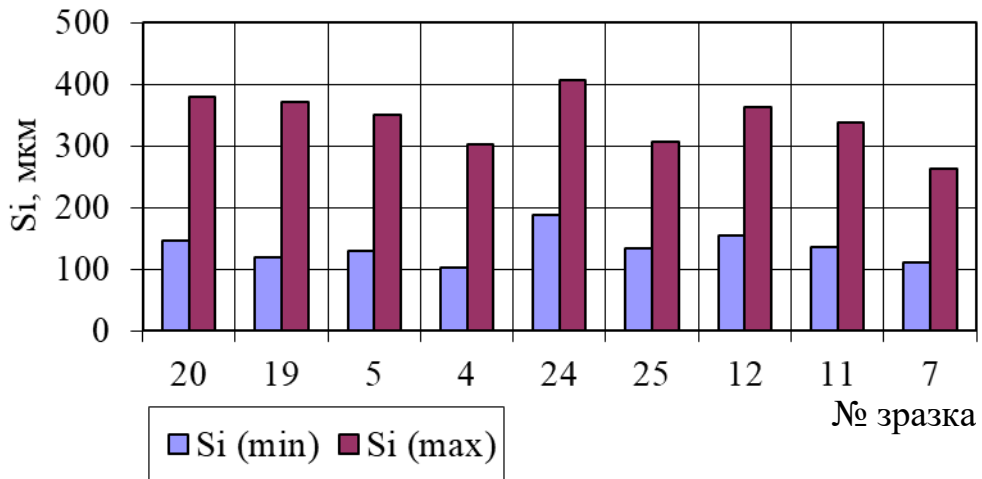


б

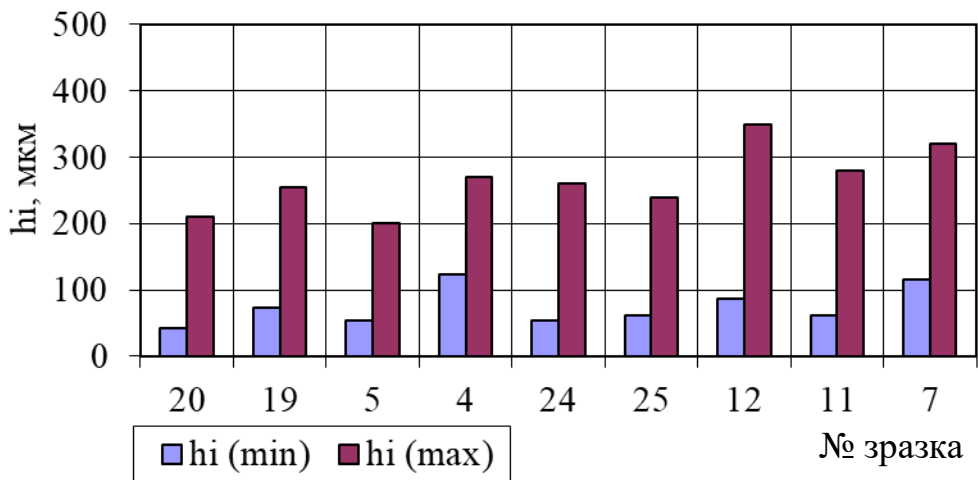
Рисунок 4.14. Параметри мікрорельєфу поверхні у центральній зоні зразків при швидкості променя 780 мм/с та потужності 675 Вт: *a* – крок нерівностей виступів між вершинами (S_i); *б* – висота мікронерівностей рельєфу (h_i)

Вироби, які надруковані із швидкістю переміщення електронного променя 780 мм/с та потужністю 675 Вт характеризуються однорідним мікрорельєфом профілю поверхні та одиничними дефектами у вигляді усадочних пор та невеликих несплавлень (у зоні контуру). Мінімальні параметри мікрорельєфу поверхонь (h_i та S_i) забезпечуються при I_{df} : -1,2; -0,9; -0,61; 0 А (рис. 4.14). Відсутність усадочних пор та несплавлень забезпечується при режимах: 0,61; -0,31 А, одиничні пори спостерігаються у зразках, отриманих на режимах I_{df} : -1,2; -0,9 А.

Мінімальні параметри мікрорельєфу поверхонь (h_i та S_i) виробів, які надруковані із швидкістю переміщення електронного променя 540 мм/с та потужністю 495 Вт забезпечуються при I_{df} : -0,61; -0,31; 0; 0,33; 0,65 А (рис. 4.15).



a



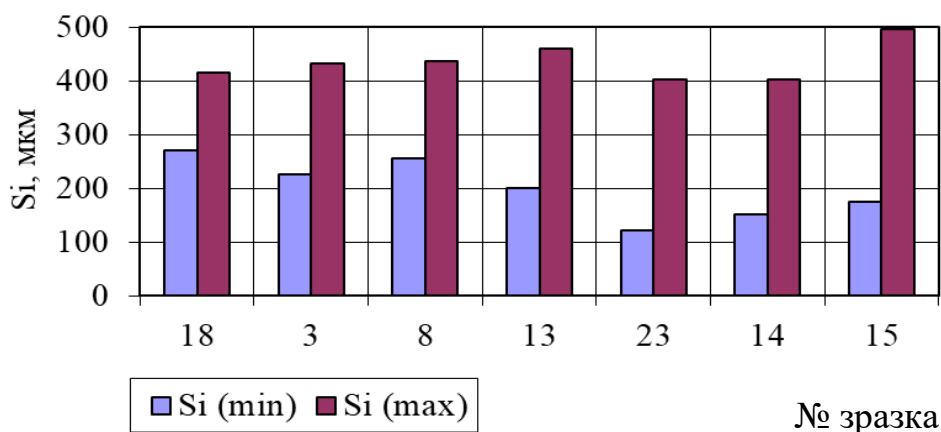
б

Рисунок 4.15. Параметри рельєфу поверхні у центральній зоні зразків при швидкості променя 540 мм/с та потужності 495 Вт: *a* – крок нерівностей виступів між вершинами (S_i); *б* – висота мікронерівностей рельєфу (h_i)

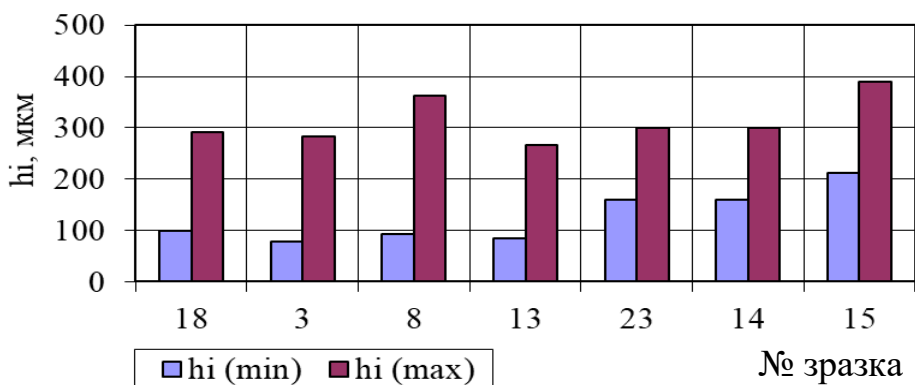
Вироби характеризуються також однорідним мікрорельєфом профілю поверхні за наявності включень, незначних мікронерівностей хвилеподібного характеру та невеликих ділянок з несплавленнями (в зоні контуру). Одиначні пори спостерігаються у зразках, отриманих на режимах: I_{df} : 0; 1,27 А.

Вироби, що отримані із швидкістю переміщення електронного променя 240 мм/с та потужністю 270 Вт характеризуються як однорідним мікрорельєфом профілю поверхні з одиничними дефектами, так і наявністю неоднорідного рельєфу. На поверхні виробів з неоднорідним рельєфом спостерігається велика кількість усадочних пор та несплавлень.

Мінімальні показники параметрів висоти мікронерівностей рельєфу h_i при приблизно однакових значеннях S_i характерні для режимів I_{df} : $-1,2$ А; $-0,9$ А; $-0,31$ А; $0,33$ А (рис. 4.16).



a



б

Рисунок 4.16. Параметри рельєфу поверхні у центральній зоні зразків при швидкості променя 240 мм/с та потужності 270 Вт: *a* – крок нерівностей виступів між вершинами (S_i); *б* – висота мікронерівностей рельєфу (h_i)

Відсутність усадочних пор та несплавлень забезпечується режимами при I_{df} : $-0,61$ А; $-0,31$ А. Максимальна кількість дефектів: значні мікронерівності (h_i до 700 мкм), великі пори, скупчення включень, масивні

несплавлення у зоні контуру та у центральній зоні, спостерігаються при режимі $I_{df}=0$ А. Найменшою мірою дефектна структура характерна для зразка, отриманого при режимі $I_{df}=0,65$ А.

4.3.5. Обговорення результатів досліджень впливу технологічних параметрів наплавлення на якісні показники виробів

В результаті проведених досліджень доказано, що основні параметри технологічного процесу електронно-променевого наплавлення: потужність променя, швидкість його переміщення та струм динамічного фокусування мають суттєвий вплив на мікрорельєф поверхонь виробів та утворення дефектів. Це пояснюється особливостями процесів плавлення металевих порошків та властивостями розплавленого металу.

Дослідженнями встановлено раціональне значення густини енергії електронного променя для порошку титанового сплаву Ti-6Al-4V ELI, яке складає $44,5$ Дж/мм³. Цей параметр має бути універсальним при використанні порошків сплаву Ti-6Al-4V ELI з гранулами розміром від 45 до 106 мкм.

За результатами досліджень (4.1) визначено вплив швидкості переміщення електронного променя на інші параметри технологічного процесу. Цей параметр важливий, оскільки від нього залежить загальний час побудови виробів.

Також в дослідженнях зазначений зв'язок між швидкістю електронного променя та його потужністю, який визначений функцією швидкості. Збільшення швидкості переміщення променя потребує збільшення потужності, та навпаки.

Важливим фактором впливу на формування виробів визначено струм динамічного фокусування, зміна якого призводить до зміщення фокусу, та значно впливає на мікрорельєф поверхонь.

Дослідження впливу параметрів друку при електронно-променевому пошаровому наплавленні на структуру поверхонь виробів показали, що усі дослідні поверхні мають шорсткість. Шорсткість поверхонь зразків

відрізняється за параметрами мікронерівностей рельєфу.

При застосуванні режиму друку із швидкістю променя 240 мм/с та потужністю 270 Вт на поверхні виробів формується мікрорельєф з параметрами h_i (min/max)=78...211/262...390 мкм та S_i (min/max)=121...271/403...500 мкм (рис. 4.16). При режимі друку із швидкістю променя 540 мм/с та потужністю 495 Вт параметри мікрорельєфу зменшуються до h_i (min/max)=54...123/240...350 мкм та S_i (min/max)=102...146/262...407 мкм (рис. 4.15). А у разі використання режиму друку при швидкості променя 780 мм/с та потужністю 675 Вт поверхні виробів характерна шорсткість з мінімальними параметрами рельєфу h_i (min/max)=36...85/100...298 мкм при S_i (min/max)=82...180/205...500 мкм (рис. 4.14). У разі збільшення швидкості переміщення променя спостерігається формування бездефектної структури, а саме відсутність крупних усадочних пор та включень. При швидкості променя 240 мм/с на поверхні виробів формується неоднорідний рельєф з великою кількістю усадочних пор.

Але для кожного з трьох режимів швидкості переміщення променя шорсткість поверхонь виробів також має різні параметри. У цьому випадку проявляється вплив фокусування електронного променя. Зміщення фокусу, та, відповідно, зміна розміру променевої плями мають суттєвий вплив на параметри шорсткості поверхонь виробів та якість виробів (отримання бездефектної структури).

Так для режиму друку із швидкістю променя 240 мм/с та потужністю 270 Вт максимальні значення кроку нерівностей профілю поверхонь по вершинах (S_i) у центральній зоні зразків характерні для виробів, отриманих при струмі динамічного фокусування I_{df} : -0,31; 0,65 А (рис. 4.16 а). Максимальна висота мікрорельєфу (h_i) спостерігається при I_{df} : -0,61; 0,65 А (рис. 4.16 б). Максимальна кількість дефектів: значні мікронерівності (h_i до 700 мкм), великі пори, скупчення включень, масивні несплавлення у зоні контуру та у центральній зоні, спостерігаються при режимі $I_{df}=0$ А.

Найменші показники параметрів висоти мікронерівності рельєфу ($hi \leq 300$ мкм) характерні для режимів *Idf*: -1,2; -0,9; -0,31; 0,33 А (рис. 4.16 б).

При режимі друку із швидкістю променя 540 мм/с та потужністю 495 Вт найменші відстані між вершинами рельєфу поверхонь спостерігаються для режимів *Idf*: -0,61; -0,31; 0,33; 0,65; 0,96, 1,27 А (рис. 4.15 а). Мінімальна висота мікрорельєфу (hi) забезпечується при: -1,2; -0,9; -0,61; -0,31; 0; 0,33; 0,65 А (рис. 4.15 б).

У разі використання режиму друку при швидкості променя 780 мм/с та потужністю 675 Вт найменші відстані між вершинами рельєфу поверхонь спостерігаються для режимів *Idf*: -1,2; -0,9; -0,61; -0,31; 0; 0,96 А (рис. 4.14 а). При цьому мінімальна висота мікрорельєфу (hi) забезпечується при: *Idf*: -1,2; -0,9; -0,61; 0 А (рис. 4.14 б).

Потрібно зазначити, що дослідження проведені в умовах деяких обмежень. Технологічні параметри: швидкість електронного-променя та його потужність отримані експериментальним шляхом. Цей метод є складним, потребує багато часу та зусиль для проведення серії експериментів. В подальшому необхідно розробити теоретичні основи процесів наплавлення, що забезпечить можливість визначення технологічних параметрів розрахунковим методом.

Також перспективним є комп'ютерне моделювання адитивних процесів з можливістю прогнозування властивостей виробів.

Таким чином, за результатами досліджень встановлено, як параметри друку при електронно-променевому пошаровому наплавленні впливають на структуру поверхонь виробів. Наступний етап досліджень буде присвячено вивченню структури отриманих виробів у поперечному перерізі зразків та зіставлення структурних параметрів в залежності від швидкості променя та потужності.

4.4. Визначення впливу параметрів технологічного процесу електронно-променевого наплавлення на мікроструктуру і мікротвердість сплаву Ti-6Al-4V

Значний інтерес для авіакосмічної та біомедичної галузей має титановий сплав Ti-6Al-4V, якому притаманні високі механічні характеристики, зносо- і корозійна стійкість, механічна та біологічна сумісність з кістковою тканиною. Актуальними слід вважати подальше удосконалення виробів із сплаву Ti-6Al-4V шляхом пошуку раціональних технологічних режимів їх друку. Це надасть можливість отримати максимальні механічні властивості виробів з урахуванням раціональних технологічних параметрів друку.

4.4.1. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Визначення технологічних параметрів наплавлення за адитивною електронно-променевою технологією є необхідною складовою отримання виробів з потрібними властивостями [63].

В роботі [63] визначено вплив технологічних параметрів наплавлення на формоутворення виробів із сплаву Ti-6Al-4V, але механічні властивості не досліджувались.

В роботі [85] автори дослідили властивості виробів з Ti-6Al-4V, отриманих при максимальному завантаженні робочої камери адитивного устаткування. Проведено комплексний порівняльний аналіз надрукованих зразків для критичної оцінки якості та продуктивності виробів як у готовому стані, так і після механічної обробки поверхні. Але вплив технологічних параметрів на якість зразків не досліджувався.

В роботі [86] досліджено мікроструктури та механічні властивості зразків із сплаву Ti-6Al-4V, отриманих за електронно-променевою технологією, але не вирішена проблема зв'язку властивостей з технологічними режимами друку.

В роботі [87] досліджені мікроструктури та мікротвердість промислового виробу із Ti-6Al-4V. Але вплив технологічних параметрів на

властивості виробу не досліджувались.

В роботі [88] досліджено вплив стратегії сканування електронного променя на структуру і мікротвердість виробів з Ti-6Al-4V. Вплив інших параметрів друку не досліджувався.

В роботі [89] наведені результати досліджень впливу технологічних параметрів на мікроструктуру і механічні властивості сплаву Ti-6Al-4V. Автори змінювали основні параметри процесу наплавлення: швидкість і потужність електронного променя, його фокусування та крок зміщення траєкторії. Показано, що варіація кроку зміщення траєкторії електронного променя від 0,16 мм до 0,28 мм має найбільший вплив на механічні властивості виробів. Але залишилися невирішеними питання, пов'язані з впливом саме швидкості та потужності електронного променя на властивості виробів, при незмінних значеннях інших параметрів технологічного процесу.

В роботі [90] досліджено вплив швидкості електронного променя на структуру та механічні властивості виробів із сплаву Ti-6Al-4V. Зазначено про помітний вплив швидкості на особливості формування структури виробів. Але дослідження проведені на устаткуванні, де технологічні параметри закриті виробником та представлені у вигляді типових функцій швидкості. Це унеможливує застосування результатів досліджень для широкого використання, оскільки взаємозв'язок технологічних параметрів невідомий.

Швидкість та потужність електронного променя є основними параметрами адитивного процесу, які насамперед впливають на якісні показники виробів. Дослідження впливу цих параметрів на формування структури металу та його механічні властивості є необхідним для створення виробів з наперед прогнозованими властивостями.

4.4.2. Мета та задачі дослідження

Метою досліджень є пошук раціональних технологічних режимів друку із сплаву Ti-6Al-4V, що дасть можливість виготовляти адитивним методом вироби з необхідними властивостями міцності.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

- отримати дослідні зразки за різними технологічними параметрами друку;
- дослідити їх мікроструктуру;
- визначити мікротвердість зразків;
- винайти режими друку, що забезпечують формування найкращого структурного стану.

4.4.3. Матеріали та методи досліджень

4.4.3.1. Об'єкт та гіпотеза досліджень

Об'єктом досліджень є адитивний процес виготовлення виробів з порошку титанового сплаву Ti-6Al-4V методом електронно-променевого наплавлення. Гіпотеза дослідження полягала в тому, що технологічні параметри – швидкість та потужність електронного променя мають переважний вплив на формування структури та властивості міцності виробів. Цей вплив необхідно дослідити та визначити раціональні технологічні параметри наплавлення. Для цього передбачено визначити мікроструктуру та мікротвердість експериментальних зразків. Інші технологічні параметри: густина енергії променю, його фокусування, крок зміщення траєкторії друку залишаються незмінними. Це дасть можливість визначити вплив виключно швидкості та потужності електронного променя на властивості виробів. Комплексний вплив та взаємодія всіх параметрів адитивного процесу є складним явищем, яке потребує додаткових та поступових досліджень.

4.4.3.2. Матеріали та устаткування

Зразки для досліджень друкували з порошку титанового сплаву Ti-6Al-4V ELI виробництва компанії Sino-Euro Materials Technologies of Xi'an Co., Ltd (Китай), який виготовлений методом плазмової плавки та відцентрового розпилення (технологія PREP). Гранули порошку мають правильну сферичну форму розмірами від 45 до 106 мкм. Технологічні характеристики та хімічний склад порошку Ti-6Al-4V ELI надані в табл. 4.1, 4.2 [84].

Для досліджень надрукували 25 зразків (рис. 4.11) розміром 24x24 мм висотою 10 мм, де 5 мм становлять технологічні опори та 5 мм тіло виробу. Зразки виготовлені методом пошарового електронно-променевого наплавлення на дослідному адитивному устаткуванні (рис. 4.6), створеному в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона (Україна) [60].

4.4.4. Методи досліджень

Дослідження мікроструктури виконували традиційними методами. На електроерозійному верстаті здійснили поперечні різи зразків, які шліфували наждачним папером та полірували з алмазною суспензією. Поверхні травили водяним розчином 15 % HNO_3 та 5 % HF . Структури досліджували з використанням оптичного мікроскопа Neophot-32. Зображення фіксували фотокамерою Olympus. Твердість за Вікерсом вимірювали на мікротвердометрі M-400 LEKO при навантаженнях 1,0 кг (HV10) з кроком 500 мкм у напрямку від технологічних опор до поверхні зразка, а також вздовж поверхні виробу та в шарах середньої частини зразка на відстані 2,5 мм від основи.

4.4.5. Результати досліджень експериментальних зразків

4.4.5. 1. Отримання дослідних зразків за різними технологічними параметрами друку

Для друку дослідних зразків задіяли наступні технологічні параметри:

- товщина шару порошку 0,1 мм;
- густина енергії електронного променю 44,5 Дж/мм³;
- струм динамічного фокусування I_{df} : -0,31 А;
- крок зміщення траєкторії 0,2 мм;
- стратегія сканування двоспрямована з пошаровим обертанням напрямку на 90°.

Змінні параметри друку надані в табл. 4.6.

Таблиця 4.6. Технологічні параметри друку

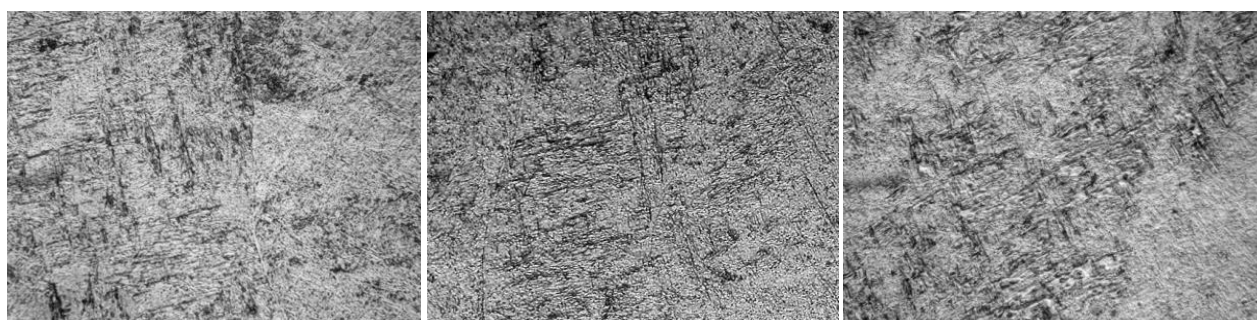
Параметри променя	Зразок		
	№ 13	№ 4	№ 9
Потужність, Вт	240	495	675
Швидкість переміщення, мм/с	270	540	780

Досліджували зразки № 4, № 9 та № 13 (рис. 4.11). Для кожного із зразків змінювали швидкість електронного променя, та його потужність. Досліджували вплив параметрів електронного променя на структуру виробів при незмінному значенні густини енергії променя, фокусування та кроку зміщення траєкторії.

4.4.5.2. Дослідження мікроструктури

Аналіз поперечних шліфів зразків визначає отримання щільної литої структури наплавленого металу.

Дослідженнями мікроструктури із збільшенням $\times 500$ встановлено, що для зразків характерна структура, яка складається переважно з пластинчасто-голчастої α' -фази (рис. 4.17).



a

б

в

Рисунок 4.17. Мікроструктура зразків ($\times 500$): *a* – № 13 (270 мм/с; 240 Вт); *б* – № 4 (540 мм/с; 495 Вт); *в* – № 9 (780 мм/с; 675 Вт)

Згідно з [10, 38] структура містить в собі незначну кількість β -фази, яка залягає у вигляді тонких прошарків між голчастими виділеннями α' -фази.

Металографічними дослідженнями зразка № 13 встановлено, що структура складається з кристалітів з різним ступенем травлення, ширина кристалітів становить від 80 до 500 мкм (рис. 4.18 *a*).

Структура за всією висотою зразка однорідна. Спостерігаються дрібні включення розміром до 30 мкм та поодинокі пори розміром від 20 до 40 мкм.

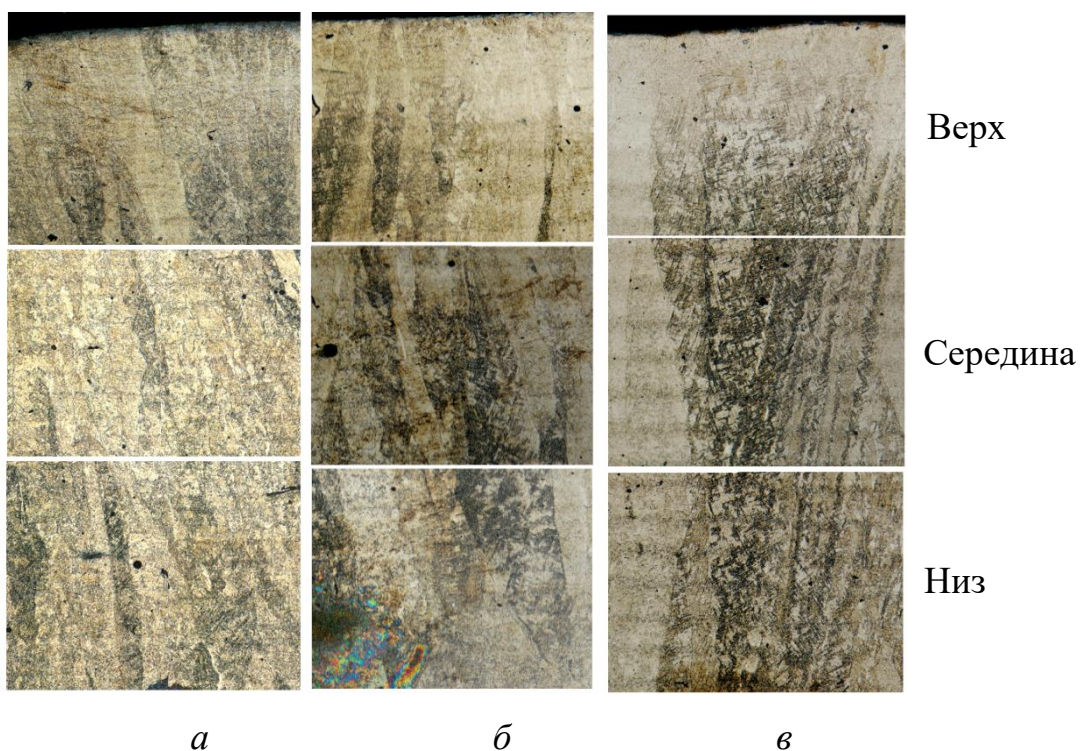


Рисунок 4.18. Мікроструктура зразків ($\times 100$): *a* – № 13 (270 мм/с; 240 Вт); *б* – № 4 (540 мм/с; 495 Вт); *в* – № 9 (780 мм/с; 675 Вт)

Металографічними дослідженнями зразка № 4 встановлено, що структура складається з великих кристалітів з різним ступенем травлення. Ширина кристалітів становить від 80 до 600 мкм (рис. 4.18 *б*).

За всією висотою зразка формується однорідна пластинчасто-голчаста структура. Спостерігаються дрібні включення розміром до 30 мкм та поодинокі пори розміром від 20 до 70 мкм.

Дослідженнями зразка № 9 встановлено, що його структура складається з кристалітів великих розмірів з різним ступенем травлення, довжину яких можна порівняти з висотою зразка. Ширина кристалітів становить від 100 до

800 мкм (рис.4.18 в). За всією висотою формується однорідна пластинчасто-голчаста структура. Спостерігаються дрібні включення розміром від 10 до 50 мкм, найбільш характерні для зони біля поверхні виробу.

4.4.5.3. Визначення мікротвердості

Зміни твердості (HV) у поперечному перерізі шліфу зразка № 13 за всією висотою від основи до поверхні (вертикально) надані на рис. 4.19. Зміни твердості вздовж поверхні (горизонтально) надані на рис.4.20, в шарах середньої частини зразка на відстані близько 2,5 мм від основи – на рис.4.21.

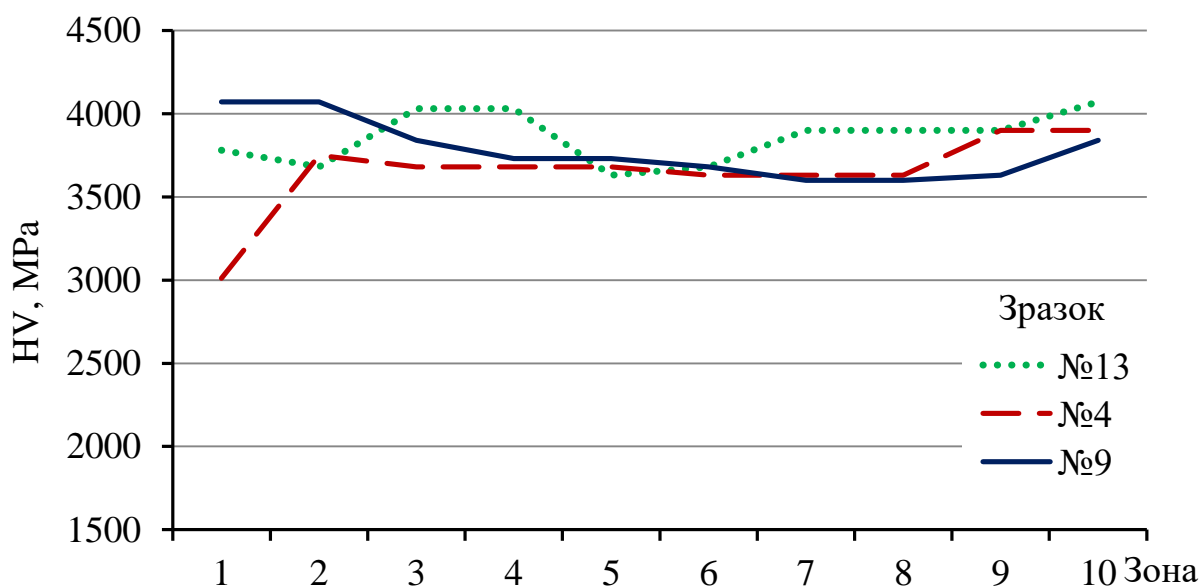


Рисунок 4.19 - Варіації мікротвердості (HV) у поперечному перерізі шліфу

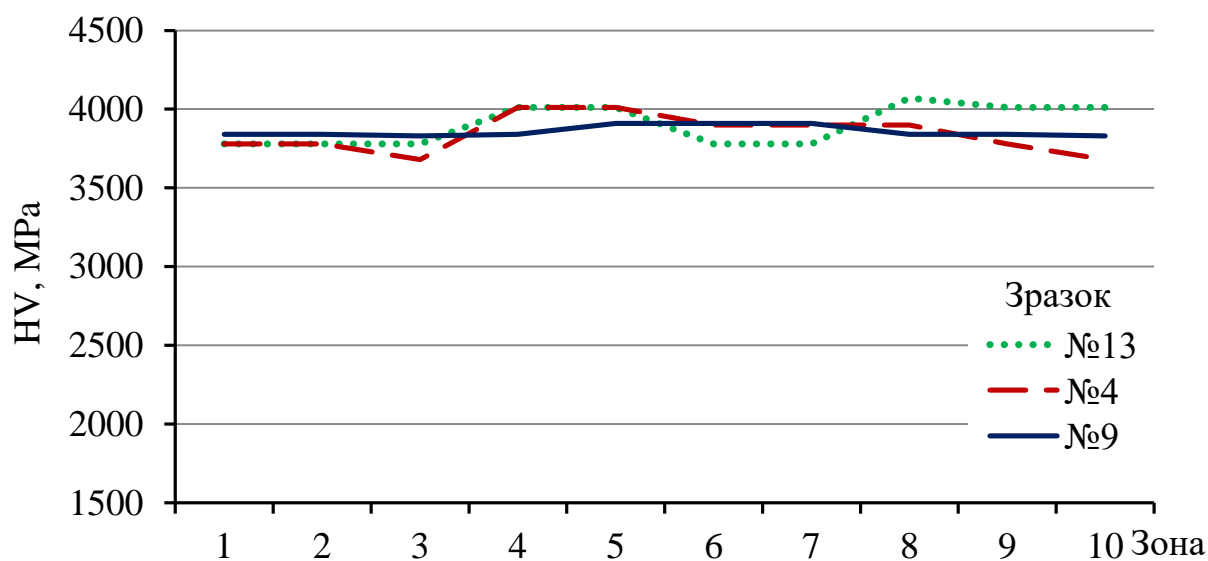


Рисунок 4.20. Варіації мікротвердості (HV) вздовж поверхні шліфу

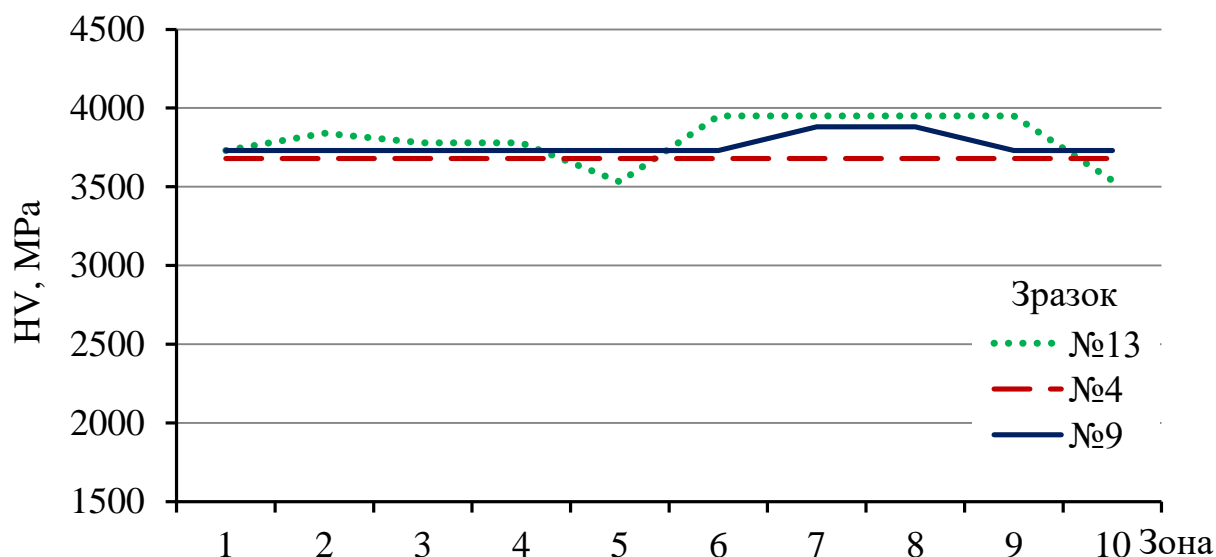


Рисунок 4.21. Варіації мікротвердості (HV) в шарах середньої частини

зразка

За висотою зразка № 13 твердість має нерівномірний розподіл, спостерігаються градієнти від 350 до 400 МПа (рис. 4.19).

За поверхнею зразка рівень мікротвердості переважно рівномірний (рис. 4.20) з підвищенням (в середньому на 6 %) від загального рівня твердості за всією висотою зразка. Спостерігаються невеликі градієнти біля 300 МПа з твердістю від $HV=3780$ до $HV=4070$ МПа.

Вимірювання ланцюжка відбитків індентора поспіль у кількох локальних шарах середньої частини зразка на відстані 2,5 мм від основи свідчать, що рівень мікротвердості в локальних шарах не рівномірний ($HV=3530\dots3950$ МПа), спостерігаються градієнти до 420 МПа (рис. 4.21).

Отже, дослідженнями зразка № 13 встановлено, що структура у поперечному перерізі шліфу за його висотою однорідна, переважно без дефектів (наявні декілька пор) з незначними градієнтами твердості за висотою і вздовж поверхні.

Вимірюванням мікротвердості зразка № 4 встановлено, що у нижній частині зразка (рис. 4.19) на відстані 0,5 мм від основи твердість зменшена в середньому на 18 % ($HV=3010$ МПа) від загального рівня ($HV=3630\dots3750$ МПа).

За поверхнею зразка № 4 рівень мікротвердості переважно рівномірний (рис. 4.20) з підвищенням в середньому на 6 % від загального рівня твердості за висотою. Спостерігаються невеликі до 300 МПа градієнти твердості від $HV=3680$ до $HV=4010$ МПа.

Вимірювання ланцюжка відбитків індентора поспіль у кількох локальних шарах середньої частини зразка на відстані близько 2,5 мм від основи свідчать, що рівень мікротвердості в локальних шарах рівномірний $HV=3680$ МПа (рис. 4.21).

Отже, дослідженнями зразка № 4 встановлено, що структура у поперечному перерізі шліфу за висотою однорідна, переважно без дефектів (наявні декілька пор) при рівномірній твердості за висотою зразка і вздовж його поверхні.

Дослідженням мікротвердості зразка № 9 показано, що мікротвердість має рівномірний характер. Значення твердості HV з кроком 500 мкм та її варіації за всією висотою від основи до поверхні зразка (вертикально) та вздовж поверхні (горизонтально) наведені на рис. 4.19, 4.20 відповідно.

У нижній частині зразка (рис. 4.19) на відстані 1 мм від основи рівень твердості (4070 МПа) дещо більший, в середньому на 9 % від загального рівня твердості за висотою ($HV=3600\dots3840$ МПа).

За всією поверхнею зразка № 9 (рис. 4.20) рівень мікротвердості рівномірний ($HV=3830\dots3910$ МПа) без градієнтів та з деяким підвищенням в середньому на 6 % від загального рівня твердості за висотою (рис. 4.19).

Вимірювання ланцюжка відбитків індентора (рис. 4.19) поспіль у кількох локальних шарах середньої частини зразка на відстані близько 2,5 мм від основи свідчать, що рівень мікротвердості в локальних шарах рівномірний ($HV=3730\dots3880$ МПа).

4.4.5.4. Встановлення режимів друку, що забезпечують формування найкращого структурного стану

Дослідженнями зразків із сплаву системи Ti-6Al-4V, яке отримано при різних технологічних параметрах друку, встановлено вплив швидкості та потужності електронного променя на мікротвердість та мікроструктуру, яка формується при електронно-променевому наплавленні. Встановлено, що структура в поперечному перерізі усіх шліфів однорідна, переважно без дефектів при рівномірному значенні мікротвердості як за висотою зразків, так і вздовж їх поверхні. При режимі потужності електронного променя 240 Вт та швидкості його переміщення 270 мм/с (зразок № 13) ширина кристалітів складає 80...500 мкм при середньому значенні мікротвердості по висоті зразка 3844 МПа. При збільшенні потужності електронного променя до 540 Вт та 780 Вт при швидкостях його переміщення до 540 мм/с та 780 мм/с ширина кристалітів зростає, відповідно, до 80...600 мкм та 100...800 мкм. При цьому спостерігається зменшення мікротвердості в середньому до 3844 МПа (зразок № 4) та до 3676 МПа (зразок № 9). Таким чином, режим потужності електронного променя 240 Вт при швидкості його переміщення 270 мм/с приводить до формування більш дрібнішої структури при зростанні показників мікротвердості. Можна зазначити, що цей режим буде забезпечувати комплекс властивостей міцності та в'язкості матеріалу отриманих виробів та є найбільш раціональним технологічним режимом друку для виготовлення адитивним методом виробів із сплаву Ti-6Al-4V з необхідними властивостями міцності.

4.4.6. Обговорення результатів досліджень експериментальних зразків

Дослідження мікроструктури отриманих зразків показали, що у всіх зразках в результаті термічної обробки при накладенні шарів формуються великі кристаліти з однорідною пластинчасто-голчастою структурою α' -фази. Мікротвердість становить: $HV=3600...3880$ МПа для зразка № 9; $HV=3630...3680$ МПа для зразка № 4; $HV=3680...4030$ МПа для зразка № 13.

Для верхніх шарів з боку зовнішньої поверхні зразків характерно витончення голчастої складової α' -фази (рис. 4.18). Для середніх та нижніх шарів характерно потовщення голчастої складової α' -фази. Це пов'язано зі швидкістю охолодження металу [89]. Із зменшенням швидкості охолодження металу нижніх шарів зразків голчасті виділення (фази) потовщуються. При отриманні верхніх шарів зразків швидкість охолодження металу зростає. Тому розміри голок та пластин потоншуються [91].

Дослідження мікротвердості металу отриманих зразків показали, що на відстані 400...500 мкм від краю поверхні мікротвердість збільшується на 5...6 % порівняно із загальним рівнем твердості за висотою до значень: $HV=3830...3910$ МПа для зразка № 9; $HV=3680...4010$ МПа для зразка № 4; $HV=3680...4070$ МПа для зразка № 13. Найбільший рівень мікротвердості за висотою у верхніх шарах характерний для зразка № 13 (швидкість променя 240 мм/с; потужність 270 Вт). В цьому режимі також відбувається деяке подрібнення структури. Ширина кристалітів становить $h_{кр}=80...500$ мкм порівняно із зразком № 9 (780 мм/с; 675 Вт), де $h_{кр}=100...800$ мкм. Ширина кристалітів зменшується загалом в 1,55 раз. У порівнянні із зразком № 4 (540 мм/с; 495 Вт), де $h_{кр}=80...600$ мкм, ширина кристалітів зменшується загалом у 1,17 раз. Це демонструють мікроструктури зі збільшенням $\times 100$ (рис. 4.18).

Деяке збільшення мікротвердості металу зразка № 13 (швидкість променю 240 мм/с; потужність 270 Вт) пояснюється загальним подрібненням структури (зменшенням ширини кристалітів). Це пов'язано із зміною параметрів друку, а саме зменшенням потужності променю та, відповідно часом формування структури.

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. Також варіації мікротвердості можуть бути пов'язані з вмістом α - та β -фаз.

За результатами досліджень можна зазначити, що режим наплавлення: швидкість променя 240 мм/с; потужність 270 Вт є найбільш раціональним режимом друку методом адитивного наплавлення із сплаву Ti-6Al-4V. На цьому режимі відбувається подрібнення структури: зменшення ширини кристалітів в 1,55 раза у порівнянні з іншими режимами.

Для детальної оцінки, а тим більше при отриманні виробів у нерівноважних умовах, необхідне застосування більш точнішого підходу до інформації про об'ємну частку структурних складових, параметрів субзеренної та дислокаційної структури.

Відмінністю проведених досліджень є встановлення зв'язку формування мікроструктури та мікротвердості металу з параметрами друку зразків. Основне обмеження проведених досліджень це застосування тільки металографічних досліджень. В подальшому доцільно провести дослідження методом трансмісійної мікроскопії для встановлення впливу технологічних режимів друку на тонку структуру, а саме субструктуру, розміри дисперсних голчасто-пластинчастих складових α' -фази та рівень щільності дислокацій. Дослідження на дислокаційному рівні методом трансмісійної електронної мікроскопії дозволять отримати більш точну інформацію про структурно-фазові особливості металу.

Недоліком досліджень є відсутність вивчення вмісту α - та β -фаз у дослідних зразках із сплаву системи Ti-6Al-4V, що отримано на різних режимах друку при електронно-променевому наплавленні. В перспективі цей недолік може бути усунене завдяки додатковим дослідженням. Для визначення точного фазового складу зразків, отриманих з використанням порошку сплаву Ti-6Al-4V, а саме вмісту (%) α -титану та β -титану, необхідно провести дослідження методом рентгеноструктурного фазового аналізу. Можливо, що для різних швидкостей процесу отримання виробів вміст β -титану може змінюватися в межах кількох відсотків.

Розвитком наведених досліджень є використання друку із порошків титанових сплавів для формування композитних матеріалів на основі титану

з добавками порошків зміцнюючих фаз. Це дозволить створювати вироби заданої форми з високими характеристиками міцності.

4.5. Визначення технологічних параметрів отримання заготовок титанового сплаву TA15 з підвищеними механічними характеристиками методом електронно-променевого 3D друку

Використання технологій 3D друку є перспективним напрямком отримання заготовок складної форми, максимально наближених до розмірів кінцевого виробу. Ця технологія може бути використана для виробництва деталей на основі цифрової моделі, отриманої в системах автоматизованого проєктування (CAD) безпосередньо в установці для 3D друку. Це дозволяє скоротити технологічний процес отримання кінцевого виробу за рахунок виключення деяких операцій формоутворення, таких як лиття або пластична деформація заготовки. Також можливо зменшити об'єм механічної обробки заготовки. Але це накладає підвищені вимоги до якості макро- та мікроструктури матеріалу. Для реалізації переваг технології 3D друку необхідно забезпечити формування заданої структури уже в процесі виробництва. Оскільки форма та розміри кінцевого виробу вже сформовані, можливість коригування структури виробу подальшою пластичною деформацією відсутня.

При виготовленні виробів з хімічно активних металів та сплавів необхідно використовувати такі технологічні процеси, які виключають взаємодію матеріалу з навколишнім середовищем, що запобігає розвитку процесів окислення. З цієї точки зору технологія пошарового сплавлення металів в вакуумі електронним променем є дуже перспективною. Вона також дозволяє керувати процесом формування виробу шляхом змінення багатьох технологічних параметрів, таких, як тип та параметри вихідного матеріалу для друку, параметри подачі матеріалу у зону сплавлення, геометричні та енергетичні параметри електронного променя. Але така багатofакторність

процесу потребує визначення раціональних значень його параметрів, що потребує проведення досліджень закономірностей формування комплексу характеристик виробів. Тому дослідження у вказаному напрямку є актуальними для визначення конкретних параметрів процесу і, в перспективі, створення промислових технологій електронно-променевого 3D друку. Також вони необхідні для розвитку теоретичних уявлень щодо механізму формування структури і властивостей заготовок титанових сплавів при використанні цієї технології [113].

4.5.1. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Визначення параметрів технологічного процесу пошарового сплавлення металів в вакуумі електронним променем (electron beam melting) – відносно нової технології – викликає великий інтерес у дослідників. Зокрема, у роботі [92] розглянуті результати порівняльного дослідження зразків, отриманих селективним лазерним та електронно-променевим плавленням, виготовлених із попередньо легованих, розпилених порошків прекурсорів. До них належать Cu, Ti-6Al-4V, сплав 625 (суперсплав на основі Ni), суперсплав на основі Co та нержавіюча сталь 17-4 PH. Ці системи досліджувалися методами оптичної металографії, скануючої і трансмісійної електронної мікроскопією, рентгенівської дифракції. Проте в даному дослідженні не розглянуто питання формування комплексу фізико-механічних характеристик в залежності від параметрів процесу плавлення.

У роботі [93] розвинено інший підхід до аналізу процесів формування виробу при використанні технології електронно-променевого наплавлення. Формування матеріалу аналізується з точки зору перебігу процесів тепло- та масопереносу. Авторами розроблені математичні моделі формування розплавленої ванни та її кристалізації, що дозволяє прогнозувати стан поверхні виробів. Проте, дослідження проведені для варіанту технології, коли матеріал для наплавлення вводиться у вигляді дроту. Це не дозволяє прямо перенести отримані висновки на процес наплавлення з використанням

порошків.

У роботі [94] розглянуті технологічні параметри, які впливають на якість виробів, отриманих методами електронно-променевого наплавлення та наведена класифікація дефектів макро- та мікроструктури, які можуть виникати при реалізації процесу. Важливим моментом є те, що автори підкреслюють можливість формування анізотропії механічних характеристик при використанні цієї технології. Проте в роботі не розглянуто питання формування характеристик саме титанових сплавів.

Автори роботи [95] розглядають вплив швидкості сканування електронного променя на процес адитивного формування виробу з порошку сплаву Ti-6Al-4V. Вони приходять до висновку, що підвищення швидкості сканування у дослідженому діапазоні приводить до підвищення характеристик міцності сплаву. Проте автори не наводять інші енергетичні параметри процесу, тому перенос цих даних на інші системи потребує проведення додаткових досліджень.

В роботі [96] автори досліджують це ж питання і проходять до схожих висновків, але закритість інформації про інші параметри процесу не дозволяє користуватися цими рекомендаціями.

Автори роботи [97] розглядають особливості протікання процесів спікання та плавлення металевих порошків під впливом електронного променя при реалізації процесу електронно-променевого наплавлення. Важливим є те, що в процесі адитивного формування виробу при відносно низькій енергії променя, можливе протікання процесів спікання. При підвищенні потужності променя починається процес плавлення часток порошку. Автори зазначають, що отримання безпористого матеріалу в процесі спікання потребує значного часу витримки, тому для значного зниження пористості режим плавлення є основним.

Систематизоване дослідження впливу параметрів технологічного процесу електронно-променевого наплавлення на властивості сплаву Ti-6Al-4V наведені в роботах [98, 99]. Автори розглядають вплив таких параметрів

як відстань від робочої платформи та розмір деталі [98], введена енергія, орієнтація та розташування виробу [99]. Автори стверджують, що існує широкий діапазон вказаних параметрів, у якому комплекс механічних характеристик залишається стабільним. Найбільший вплив на механічні властивості, за думкою авторів, має геометрична схема формування зразка, яка може привести до формування значної анізотропії механічних характеристик. Це співпадає з даними [94], проте входить у деяке протиріччя з даними [95], де відзначено підвищення міцності зі збільшенням швидкості сканування електронного променя. В той же час, автори [100] вважають, що на механічні властивості титанових сплавів, отриманих методом 3D друку, основний вплив має наявність або відсутність дефектів (пористості, мікротріщин). Їх поява і є індикатором неоптимальності технологічних параметрів. Крім того, результати [98, 99] отримані при дослідженні сплаву Ti-6Al-4V і не можуть бути прямо перенесені на інші титанові сплави.

З аналізу літературних даних витікає, що використання технології електронно-променевого наплавлення для 3D друку виробів із титанових сплавів є перспективним з точки зору можливості отримання виробів складної форми з високими механічними характеристиками [62]. Але для реалізації потенційних переваг технології необхідно визначення конкретних параметрів процесу для даного сплаву та особливостей устаткування, яке використовується. Крім того, більшість дослідників вказує та небезпеку формування просторової анізотропії механічних характеристик, яка залежить від схеми формування виробів. Тому подальші дослідження необхідно спрямовувати на оптимізацію процесу 3D друку для визначеного сплаву з урахуванням вказаних особливостей.

Це дасть можливість отримувати вироби з формою та розмірами, близькими до кінцевих, та з підвищеними механічними характеристиками у порівнянні з литим станом.

4.5.2. Мета та задачі дослідження

Метою досліджень є пошук раціональних технологічних режимів 3D друку заготовок з титанового сплаву TA15 системи легування Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V, що дасть можливість виготовляти адитивним методом вироби з щільною макроструктурою та підвищеними механічними характеристиками.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

- отримати дослідні зразки за різними технологічними параметрами друку;
- дослідити мікроструктуру виробів;
- винайти режими друку, що забезпечують формування дисперсної однорідної мікроструктури з відсутністю дефектів у вигляді несучільностей;
- визначити механічні характеристики дослідних зразків у порівнянні зі зразками, виготовленими за технологією електронно-променевого переплаву.

4.5.3. Матеріали та методи досліджень

4.5.3.1. Об'єкт та гіпотеза досліджень

Об'єктом досліджень є адитивний процес виготовлення виробів з порошку титанового сплаву TA15 методом електронно-променевого наплавлення. Гіпотеза дослідження полягала в тому, що оскільки сплави системи Ti-6,5Al-2Zr-1Mo-1V мають дуже вузький температурний інтервал «ліквідус – солідус», то механізм процесу утворення матеріалу з порошку матиме ступінчастий перехід від твердофазного спікання до плавлення. Зміна механізму процесу буде супроводжуватися відповідним змінням макроструктури металу. Тому параметри процесу необхідно підбирати за таким показниками, як відсутність макродефектів типу пористості при збереженні максимально дисперсної мікроструктури. Було зроблено припущення, що надмірна питома енергія, яку отримує об'єм матеріалу, що сплавляється, приводить до огрублення дендритної структури утвореного матеріалу та, відповідно, до зниження механічних характеристик отриманої заготовки. Тому інструментами впливу на процеси формування матеріалу можуть бути такі параметри, як потужність електронного променя,

швидкість сканування, крок зміщення лінії сканування та товщина шару порошку. Варіювання цих параметрів приводить до зміни значень питомої енергії, яка припадає на одиницю об'єму порошку, що сплавляється та, відповідно, змінює кінетику плавлення і подальшої кристалізації. Тому для вибору раціональних параметрів режиму 3D друку титанового сплаву TA15 необхідно проведення комплексного дослідження впливу особливостей формування макро- та мікроструктури на комплекс механічних характеристик сплаву.

4.5.3.2. Матеріали та устаткування

Для досліджень задіяли порошок титанового сплаву TA15, який виготовлений методом плазмової плавки та відцентрового розпилення (технологія PREP). Гранули порошку мають правильну сферичну форму розмірами від 45 до 113 мкм. Хімічний склад порошку наведений у таблиці 4.7.

Таблиця 4.7. Хімічний склад порошку сплаву TA15, % (мас).

Al	V	Zr	Mo	Fe	Si	O	C	N	H	Ti
5.5-7.1	0.8-2.5	1.5-2.5	0.5-2.0	≤0.25	≤0.15	≤0.15	≤0.08	≤0.05	≤0.015	Bal

Зразки для досліджень були виготовлені методом пошарового електронно-променевого 3D друку на дослідному устаткуванні, створеному в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона (Україна) [60].

Процес наплавлення відбувався у вакуумній камері електронно-променевого устаткування (рис. 4.6) Прискорююча напруга електронно-променевої гармати становила 60 кВ. Попередній нагрів шару порошку до температури 730 °С здійснювали растровим променем потужністю 1800 Вт із швидкістю сканування 14,6 м/с (задіяна схема растрування з 8 проходів). Робочий тиск у вакуумній камері при наплавленні складав 10^{-2} Па.

Для визначення структур металу було надруковано партію зразків (рис.4.22) розміром 25x25 мм, висотою 7,5 мм, де 2,5 мм становлять технологічні опори та 5 мм тіло виробу.

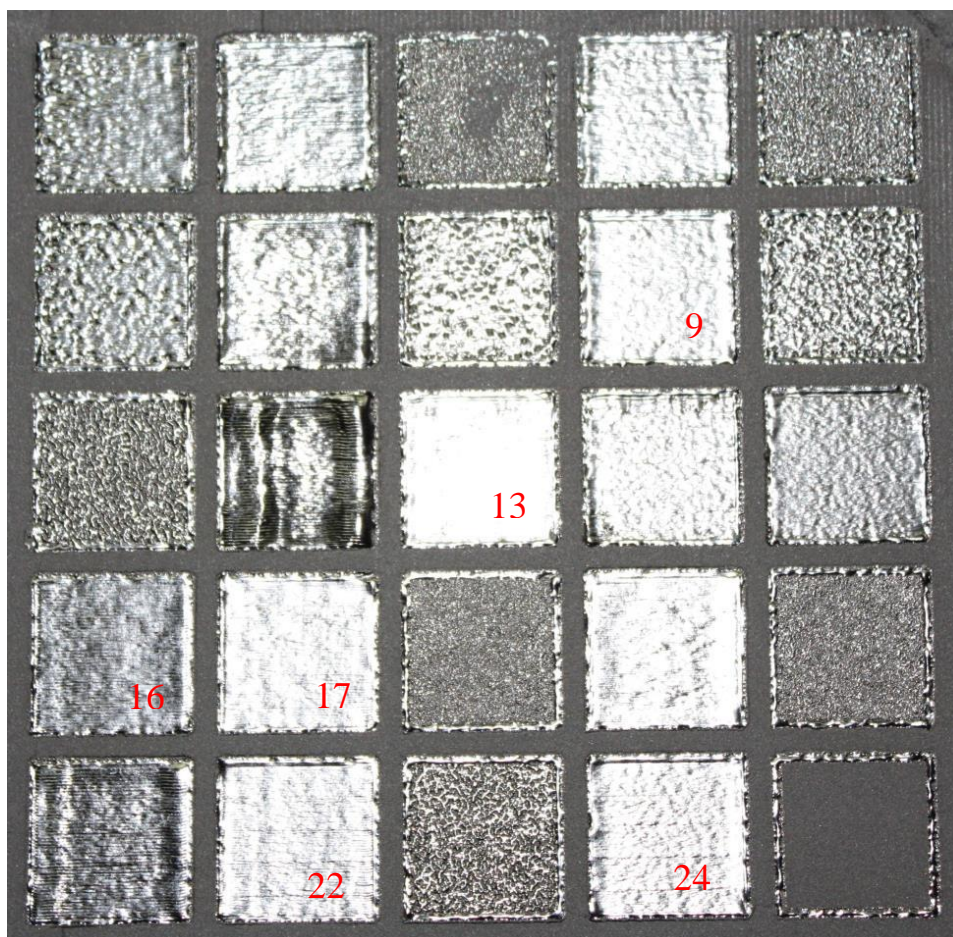


Рисунок 4.22. Дослідні зразки з титанового сплаву ТА15

Для дослідження механічних характеристик надруковано партію експериментальних зразків (рис. 4.23) шириною 12 мм, довжиною 62 мм та висотою 14,5 мм, з яких 2,5 мм становлять технологічні опори.

Отримані заготовки були використані для виготовлення зразків для випробування на одновісне розтягнення та ударний вигин. Режим друку для визначення механічних властивостей був вибраний на основі результатів дослідження макро- та мікроструктури зразків для металографічних досліджень.

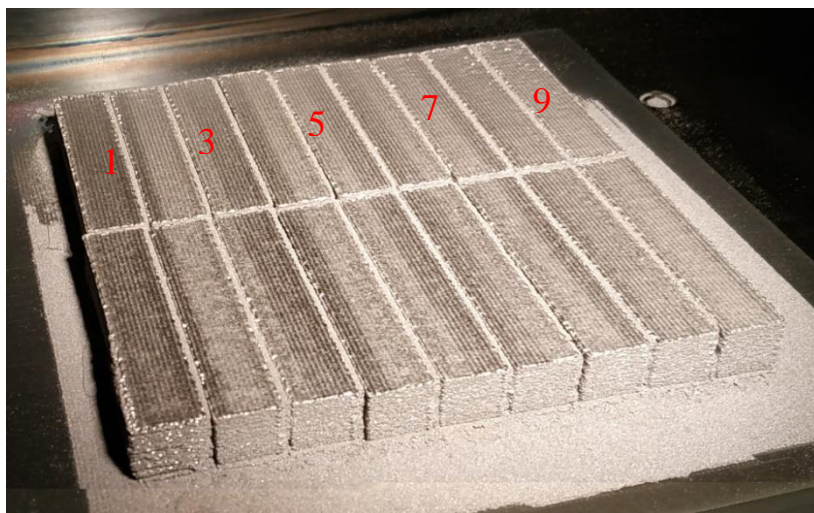


Рисунок 4.23. Зразки з титанового сплаву TA15 для механічних випробувань

Для порівняння мікроструктури також були відібрані зразки сплаву TA15, отриманого за технологією електронно-променевого плавлення з проміжною ємністю і порційною подачею рідкого металу в водоохолоджуваній кристалізатор. Реалізація цієї технології описана в роботі [101].

4.5.3.3. Методи досліджень

Дослідження мікроструктури зразків виконували традиційними методами. На електроерозійному верстаті здійснили поперечні різи, які шліфували наждачним папером та полірували з алмазною суспензією. Поверхні травили водяним розчином 15 % HNO_3 та 5 % HF. Структури досліджували з використанням оптичного мікроскопа Neophot-32 (Німеччина). Зображення фіксували фотокамерою Olympus (Японія).

Для дослідження механічних характеристик задіяли заготовки розміром $12 \times 12 \times 60$ мм, виготовлені методом електронно-променевого 3D друку [60] та вирізаних із зливку сплаву титану TA15, отриманого за технологією електронно-променевої плавки [102, 103].

Випробування на одновісний розтяг проводили на універсальному сервогідролічному випробувальному комплексі MTS 318.25 з максимальним зусиллям 250 кН. З заготовок відповідно до стандарту ISO 6892-1:2019 виготовили пропорційні зразки діаметром 5 мм з циліндричною робочою частиною.

Випробування проводили відповідно до ISO 6892-1:2019. Швидкість навантаження контролювали за переміщенням активного захвату випробувальної машини. Для більш точного визначення умовної границі плинності основного металу швидкість руху захвату на лінійній ділянці діаграми «напруження – деформація» і в зоні пружно пластичної деформації становила 2 мм/хв. На цьому етапі задіяли екстензометричний датчик MTS 632.27F-20 з базою вимірювання деформації 25 мм. Точність вимірювання становила 0,001 мм, база вимірювань 25 мм. В подальшому швидкість навантаження до руйнування зразка становила 10 мм/хв.

Випробування на ударний згин виконували методом Шарпі згідно з ISO 148-1:2016 при кімнатній температурі на маятниковому копрі КМ-30 з автоматичним електричним приводом підйому маятника. Для випробувань застосували заготовки із сплаву TA15, які в подальшому фрезерувалися та піддавалися шліфуванню. Висота зразків становила 10 мм, висота нерівностей поверхонь не перевищувала 1,25 мкм. Надрізи на зразках шириною та глибиною 2 мм виготовляли на фрезерному верстаті.

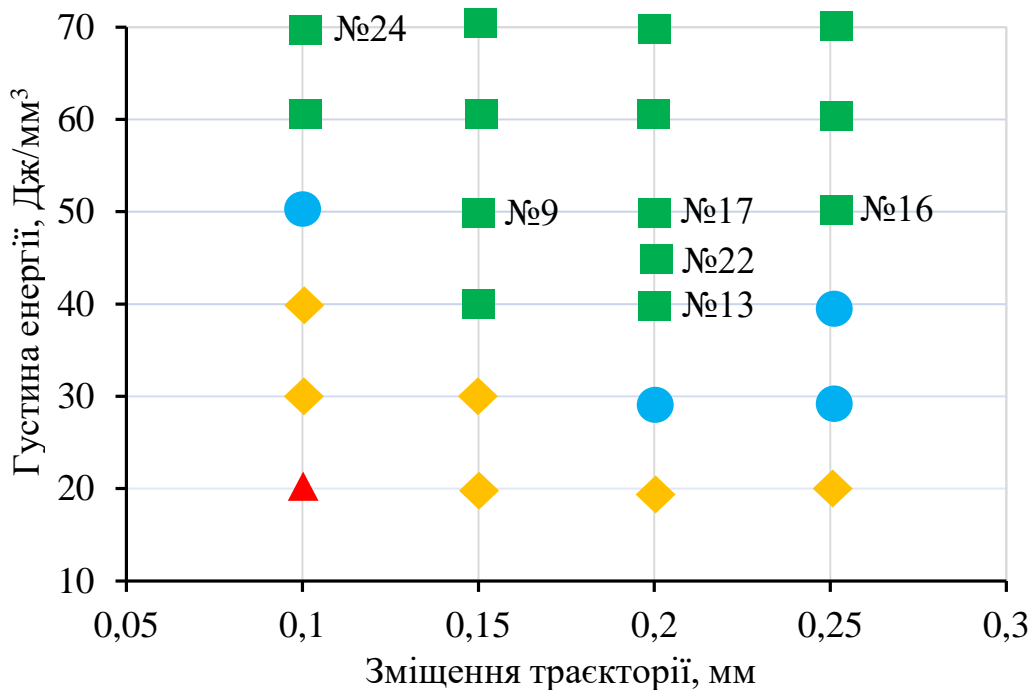
4.5.4. Результати досліджень експериментальних зразків

4.5.4.1. Отримання дослідних зразків за різними технологічними параметрами друку

Зразки для досліджень структури металу (рис. 4.22) друкували з порошку титанового сплаву TA15. Швидкість електронного променя становила 500 мм/с. Товщина шару металевого порошку була 100 мкм. Стратегія сканування обрана двоспрямована, змійчаста. Крок зміщення траєкторії променя змінювали від 0,1 до 0,25 мм з інтервалом 0,05 мм. При цьому напрям сканування повертався на 90° для кожного шару. Густина енергії електронного променя змінювали від 20 до 70 Дж/мм³ для кожного значення кроку зміщення траєкторії. Опис технологічних параметрів наплавлення та їх взаємозв'язок наданий в [64, 103].

Стан поверхні зразків оцінювали візуально. Первинний огляд поверхонь дозволив розділити зразки на чотири групи: непроплавлені, з мозаїчною

будовою, сплавлені з окремими дефектами, сплавлені без помітних дефектів. Відповідність технологічних параметрів друку та стан поверхні зразків надані на рис. 4.24.



a



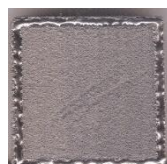
■ Сплавлений



● Окремі дефекти



◆ Мозаїчний



▲ Несплавлене

б

Рисунок 4.24. Вплив технологічних параметрів друку на морфологію поверхні зразків: а – групування зразків по типу морфології поверхні; б – морфологія поверхні зразків, покладена в основу групування

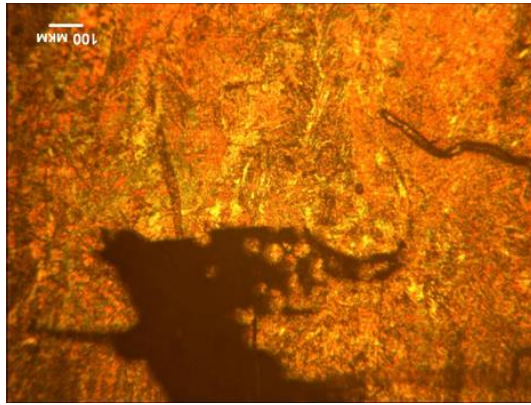
Як видно з даних рис. 4.24, висока якість поверхні (тип морфології – сплавлений) була отримана при використанні різних комбінацій технологічних параметрів. Така морфологія поверхні формувалася при деяких значеннях густини енергії в межах від 40 до 70 Дж/мм³ та зміщенні траєкторії від 0,1 до 0,25 мм. Для подальших досліджень були відібрані зразки № № 9, 13, 16, 17, 22, 24 з найбільш високою якістю поверхні. Номера зразків на рис. 4.24 а відповідають стану поверхні, показаному на рис. 4.22. Режими їх 3D друку мають понижені значення густини енергії та підвищені значення зміщення траєкторії. Ці режими є перспективними з точки зору зниження енерговитрат та підвищення швидкості друку.

4.5.4.2. Дослідження мікроструктури зразків

Для аналізу структури металу відібрані зразки без дефектів поверхні після наплавлення, які отримані методом 3D друку з порошку титанового сплаву TA15 (рис. 4.22). У зразках для оцінки особливостей структури матеріалу були виділені наступні зони:

- підкладки, на якій відбувалося формування зразків;
- основного металу;
- поверхні.

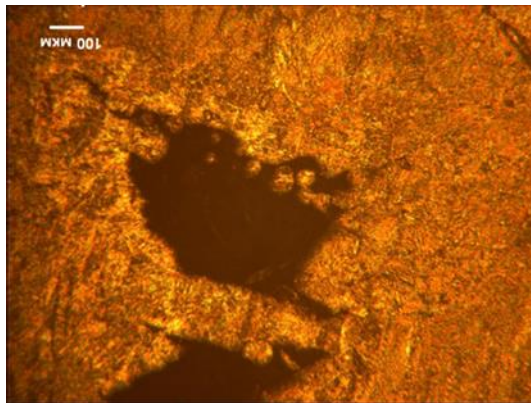
Додатково була розглянута мікроструктура в зоні основного металу при підвищеному збільшенні, а також розглянуті деякі особливості структури окремих зразків. На рис. 4.25 наведені структури досліджених зразків в зоні підкладки.



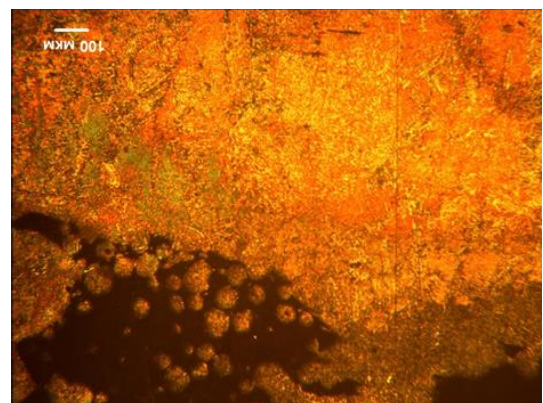
a



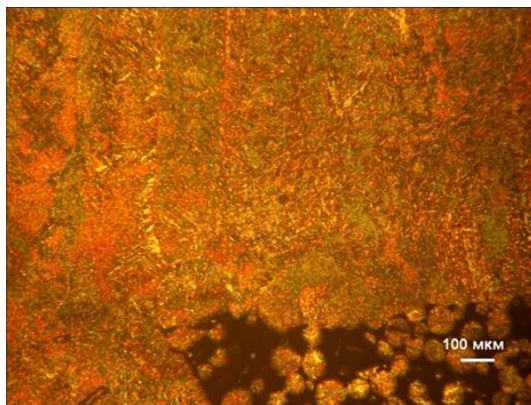
б



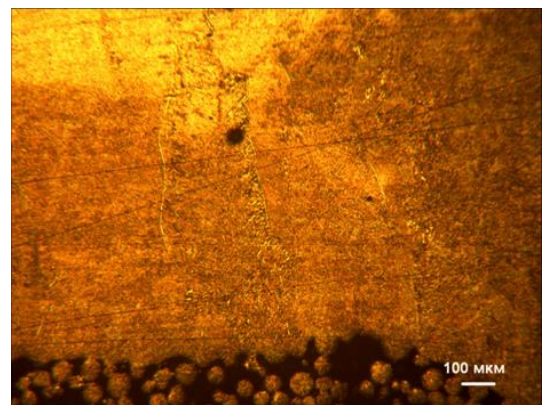
в



г



д



е

Рисунок 4.25. Структура зразків у зоні підкладки ($\times 100$): *a* – зразок №13, *б* – зразок №16, *в* – зразок №17, *г* – зразок №22, *д* – зразок №24, *е* – зразок №9

В цілому мікроструктура типова для сплаву TA15 і складається з кристалів α' -фази голчастої морфології та невеликої кількості β -фази. Для всіх зразків характерна присутність несуцільностей в зоні контакту з підкладкою, причому в цих несуцільностях можна спостерігати окремі частки порошку, який використовувався для друку. Наявність несуцільностей пов'язано з особливостями формування технологічних опор шириною 0,5 мм у формі решітки із стороною 3 мм. Проте спостерігаються деякі відмінності у загальній морфології будови цієї зони.

У зразках № 13 (рис. 4.25 а) № 16 (рис. 4.25 б) № 17 (рис. 4.25 в) № 22 (рис. 4.25 г) видно формування несуцільностей неправильної форми, у яких спостерігається невелика кількість часток порошку. Самі несуцільності мають макророзміри (1–2 мм) і їх формування може бути пов'язане з непроплавленням часток порошку на поверхні підкладки. Але в ділянках, де проплавлення відбулося, спостерігається формування суцільної структури без ознак пористості. Мікроструктура матеріалу дуже дисперсна, видимої переважної орієнтації зерен не спостерігається. Це пов'язано з повним проплавленням часток порошку з наступною дуже швидкою кристалізацією, яка приводить до формування дисперсної ненаправленої структури. При цьому зразок № 13 має найбільш неоднорідну мікроструктуру з формуванням відносно грубих виділень α -фази, а далі у послідовності зразків № № 16, 17, 22 ця неоднорідність зменшується.

У зразках № 24 (рис. 4.25 д) та № 9 (рис. 4.25 е) окремих макронесуцільностей в зоні підкладки не спостерігається. Кількість сферичних часток, асоційованих з проплавленим металом, збільшується, зона швидкої кристалізації, що прилягає до підкладки, стає менш протяжною. З'являються ознаки формування орієнтованої дендритної структури. Орієнтація подовжніх осей дендритів перпендикулярна підкладці, що співпадає з напрямком відводу тепла. Особливо характерна у цьому випадку структура зразка № 9, де формування дендритів починається практично від підкладки, а зона дисперсної неорієнтованої структури практично відсутня.

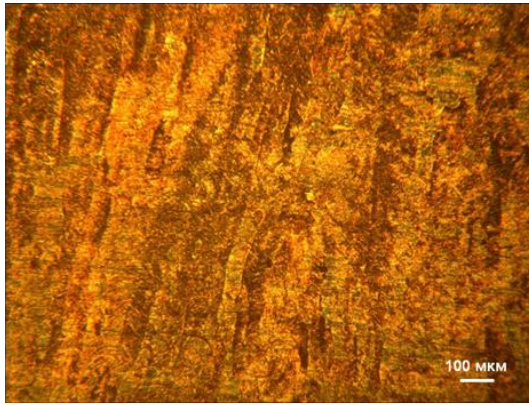
Також тільки у цьому зразку спостерігається формування вторинної усадочної пористості у міждендритних ділянках. Пори є одиничними, мають сферичну форму та діаметр 30–50 мкм.

Зміни у морфології зони, що прилягає до підкладки, пов'язані з різницею у питомій енергії, що вводиться у матеріал в процесі друку. 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 (зразок № 9).

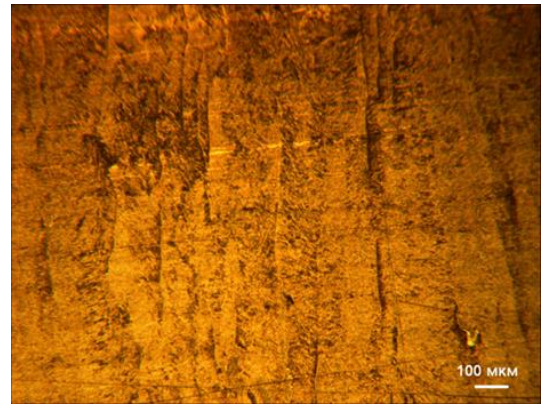
Кращими з точки зору локалізації макронесуцільностей та однорідності мікроструктури можна вважати зразки № № 22, 24.

На рис. 4.26 приведені фото дендритної структури, яка формується в основному металі.

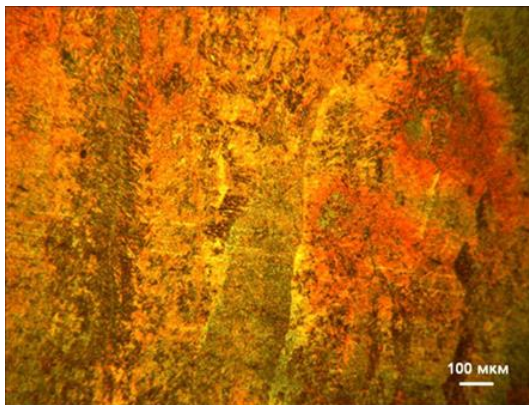
Видно, що зміна режиму наплавлення приводить до змін параметрів дендритної структури. Найменший поперечний розмір дендритів зафіксовано у зразку № 13 (рис. 4.26 *a*), проте близькі до нього параметри має зразок № 9 (рис. 4.26 *б*). Але слід зазначити, що для зразка № 9 характерна неоднорідність, і у основному металі є ділянки з огрубленою структурою. Далі розмір дендритів зростає у послідовності у зразках № 17 (рис. 4.26 *з*), № 22 (рис. 4.26 *д*), № 24 (рис. 4.26 *е*). Максимальний розмір дендритів сформувався у зразку № 16 (рис. 4.26 *в*).



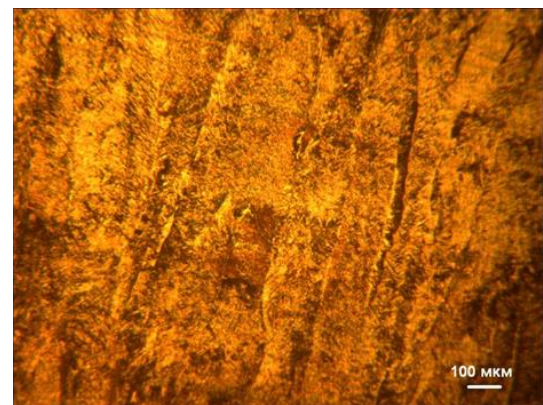
а



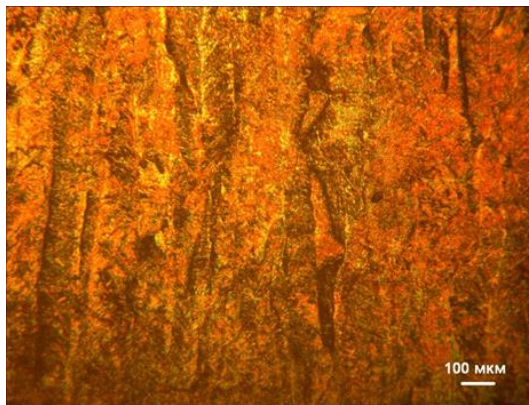
б



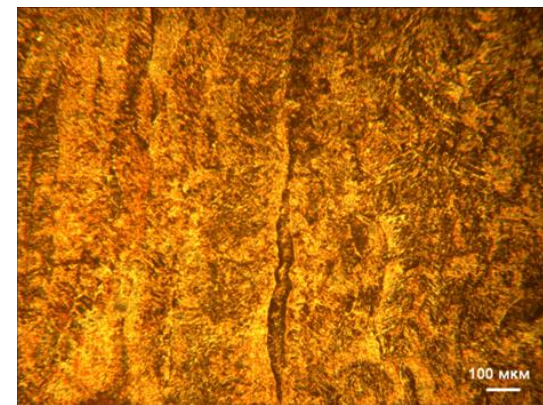
в



г

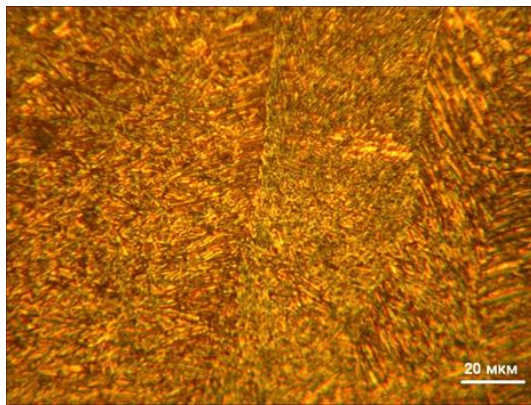


д

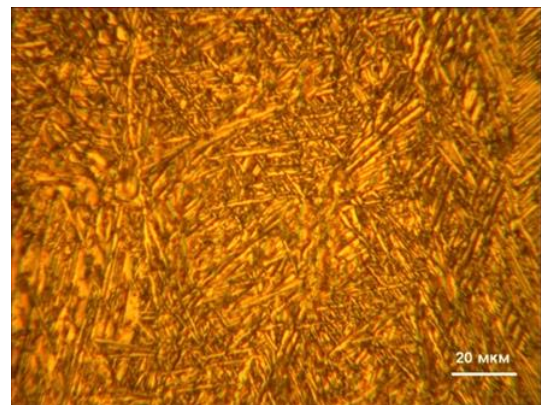


е

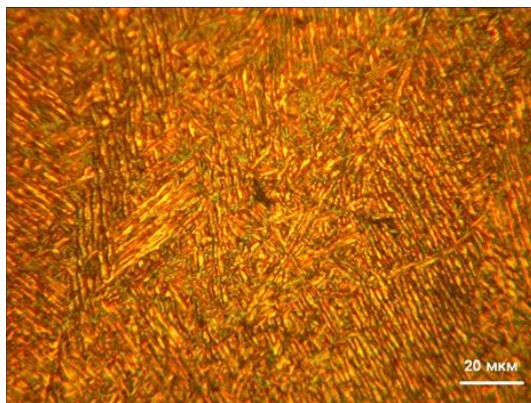
Рисунок 4.26. Дендритна структура основного металу зразків ($\times 100$): *a* – зразок №13, *б* – зразок №9, *в* – зразок №16, *г* – зразок №17, *д* – зразок №22, *е* – зразок №24



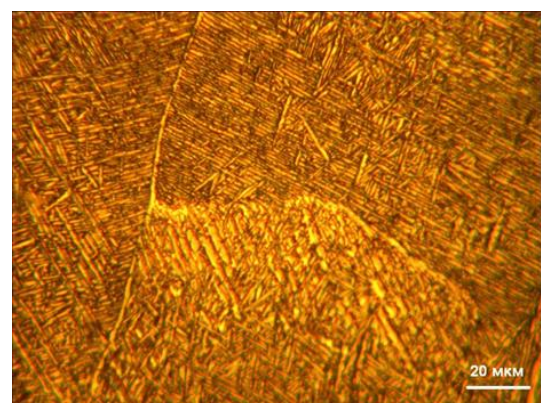
а



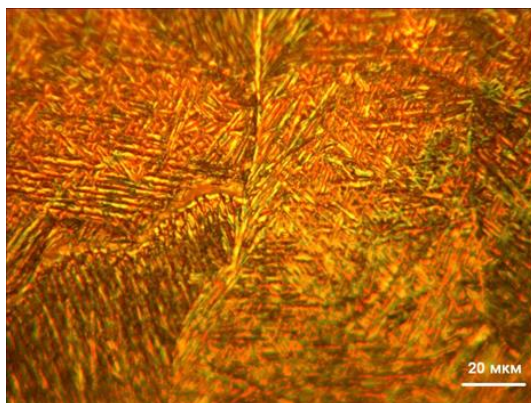
б



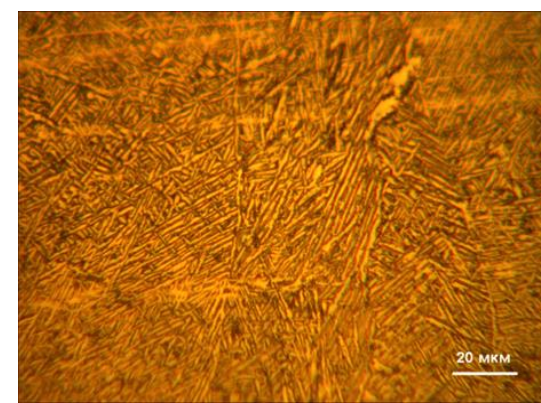
в



г



д



е

Рисунок 4.27. Морфологія голчастих кристалів α' - фази основного металу ($\times 500$): а – зразок № 13, б – зразок № 24, в – зразок № 16, г – зразок № 17, д – зразок № 22, е – зразок № 9

На рисунку 4.27 наведена структура будови α' - β матриці сплаву. З даних рисунку видно, що всі зразки мають структуру, типову для псевдо α -сплавів, але відрізняються дисперсністю суміші голчастих кристалів.

Найбільш дисперсна структура сформувалася у зразку №13 (рис. 4.27 а). Далі у порядку зменшення дисперсності розташувалися зразки №16 (рис. 4.27 в), №17 (рис. 4.27 г), №22 (рис. 4.27 д), №9 (рис. 4.27 є), №24 (рис. 4.27 б). Слід зазначити, що різниця між зразками №№ 22, 9, 24 невелика, але вони значно відрізняються від групи зразків №№13, 15 – 17.

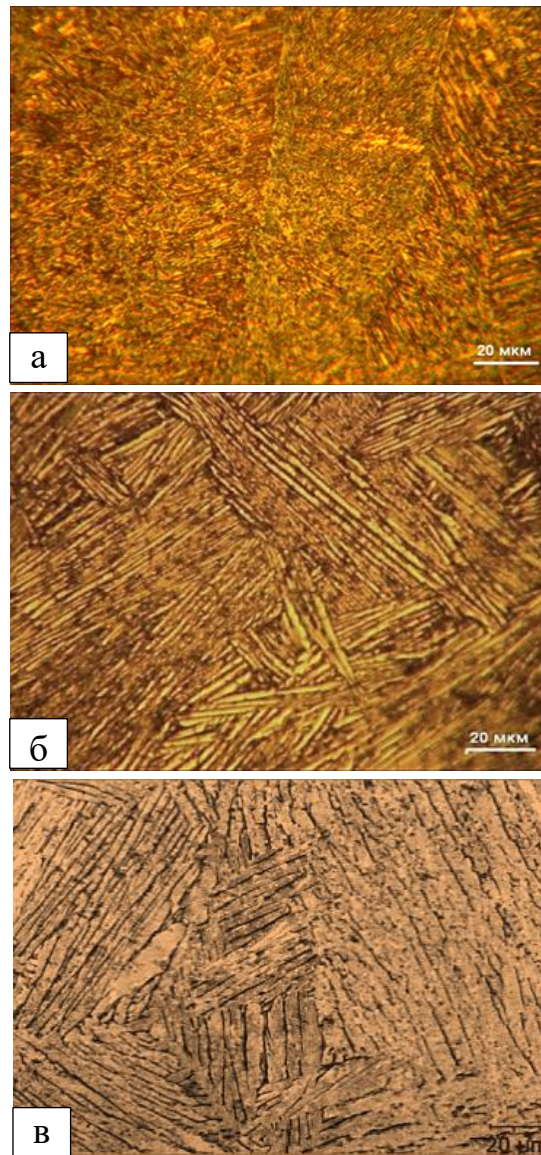


Рисунок 4.28. Мікроструктура матеріалу із сплаву TA15: а – зразок № 13 – електронно-променевий 3D друк; б – зразок, отриманий електронно-променевою плавкою; в – зразок деформованого металу.

На рис. 4.28 приведені порівняльні структури матеріалів, отриманих електронно-променевим 3D друком (рис. 4.28 а), електронно-променевою плавкою (рис. 4.28 б) та деформованого металу (рис. 4.28 в).

Як видно з рис. 4.28, мікроструктура матеріалів відрізняється як на рівні дендритної структури, так і на рівні морфології виділень кристалітів α та β фаз. Причини формування цієї різниці та вплив особливостей мікроструктури на механічні властивості буде обговорений далі.

4.5.4.3. Встановлення режимів друку, що забезпечують формування найкращого структурного стану

При визначенні режимів друку, які забезпечують найкращі характеристики структури, встановлено що зразок № 13 має високу якість поверхні (рис. 4.22) з повним проплавленням. Він також має найбільш дисперсну дендритну структуру (рис. 4.26) та найменший розмір голчастих кристалів α -фази (рис. 4.27). Слід зауважити, що для цього зразка спостерігається формування несучільностей неправильної форми в зоні підкладки (рис. 4.25) але їх протяжність не перевищує 0,3–0,4 мм (рис. 4.26).

З даних рис. 4.24 витікає що режим його 3D друку здійснювали з кроком сканування 0,2 мм, енергія променя становила 40 Дж/мм³. Це забезпечує найменше енергоспоживання серед зразків з високою якістю поверхні та близьке до максимального зміщення траєкторії сканування. Тому цей режим був вибраний для виготовлення зразків для механічних випробувань.

4.5.4.4. Визначення механічних характеристик дослідних зразків

Для досліджень надрукували експериментальні зразки (рис. 4.23), які отримані методом 3D друку з порошку титанового сплаву TA15. Технологічні параметри друку відповідали режимам зразка №13 (рис. 4.24). Для порівнянь механічних характеристик застосовані зразки, що виготовлені із зливку сплаву титану TA15, отриманого за технологією електронно-променевої плавки.

Випробування проводили на одновісний розтяг та ударний згин.

4.5.4.4.1 Випробування на одновісний розтяг

Досліджували зразки (рис. 4.23), що отримані методом електронно-променевого 3D друку, виготовлені за технологією електронно-променевої плавки (литий метал) та зразки деформованого металу.

Механічні характеристики титанових сплавів визначали за діаграмами деформування (рис. 4.29) згідно з ISO 6892-1:2019 [29]. Значення характеристик механічних властивостей титанових сплавів за результатами випробувань зразків на одновісний розтяг надані в табл. 4.8 [127].

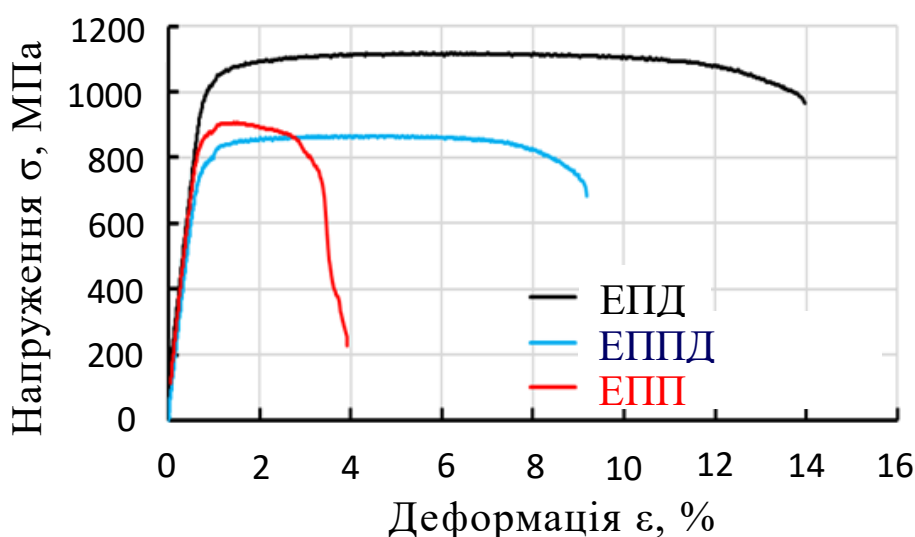


Рисунок 4.29. Діаграми деформування одновісним розтягом зразків титанових сплавів, виготовлених методами: ЕПД – електронно-променевий 3D друк, ЕПП – електронно-променева плавка (литий метал), ЕППД – електронно-променева плавка (деформований метал)

Таблиця 4.8. Механічні характеристики зразків з ТА15, виготовлених за технологіями електронно-променевого 3D друку (ЕПД) та електронно-променевої плавки (ЕПП), деформованого металу (ЕППД)

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

Із таблиці 4.8 видно, що значення характеристик міцності титанового сплаву TA15, що отриманий методом електронно-променевого 3D друку, досягають вищих значень меж міцності та текучості відповідно на 27% та 24% у порівнянні з сплавом отриманим за традиційною технологією електронно-променевої плавки. Відносне видовження матеріалу, виготовленого адитивним методом, вище у 3,2 рази у порівнянні з литим металом.

4.5.4.4.2. Випробування на ударний згин

Досліджували зразки №№ 3, 7 (рис. 4.23), які отримані методом електронно-променевого 3D друку, та зразки №№ 5–10, виготовлені за технологією електронно-променевої плавки.

Випробування проводились методом Шарпі відповідно до ISO148-1:2016. За результатами випробувань було визначено роботу, витрачену на руйнування зразка, та розраховано ударну в'язкість. Результати випробувань на ударний згин представлено на рис. 4.30.

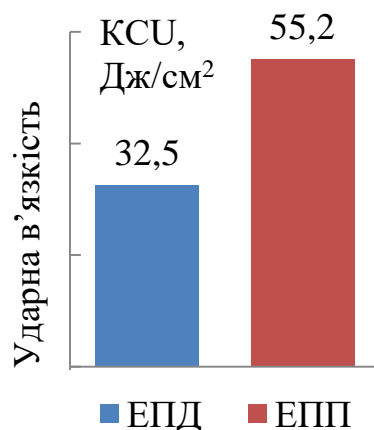


Рисунок 4.30. Середні значення ударної в'язкості зразків, що виготовлені за технологіями електронно-променевого 3D друку (ЕПД) та електронно-променевої плавки (ЕПП)

З діаграми на рис. 4.30 видно, що значення ударної в'язкості становить $KCU=55 \text{ Дж/см}^2$ для зразків, що виготовлені зі злитку сплаву титану за технологією електронно-променевої плавки (ЕПП). Це майже вдвічі вище ніж $KCU=35 \text{ Дж/см}^2$ для зразків, які створені методом електронно-променевого 3D друку (ЕПД). Причини цього будуть обговорені у розділі 4.5.5.

4.5.4.4.3. Дослідження опору втомі

Для досліджень опору втомі із заготовок №9-18 (рис. 4.23), які отримані із сплаву титану TA15 адитивним методом (ЕПД), виготовлені дослідні зразки. Також досліджені зразки із заготовок сплаву TA15, які отримані методом електронно-променевої плавки з литого (ЕПП) та деформованого металу (ЕПД).

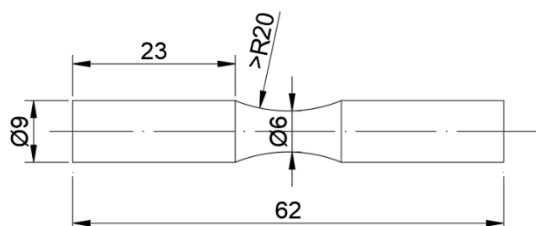


Рисунок 4.31 – Ескіз зразка для випробувань на втомі

Зразки виготовлені відповідно до ISO 1099:2017. Вид і геометричні розміри зразків надані на рис. 4.31. Зразки випробовувалися при значеннях асиметрії циклу напруження 0,1 при різних значеннях розмаху

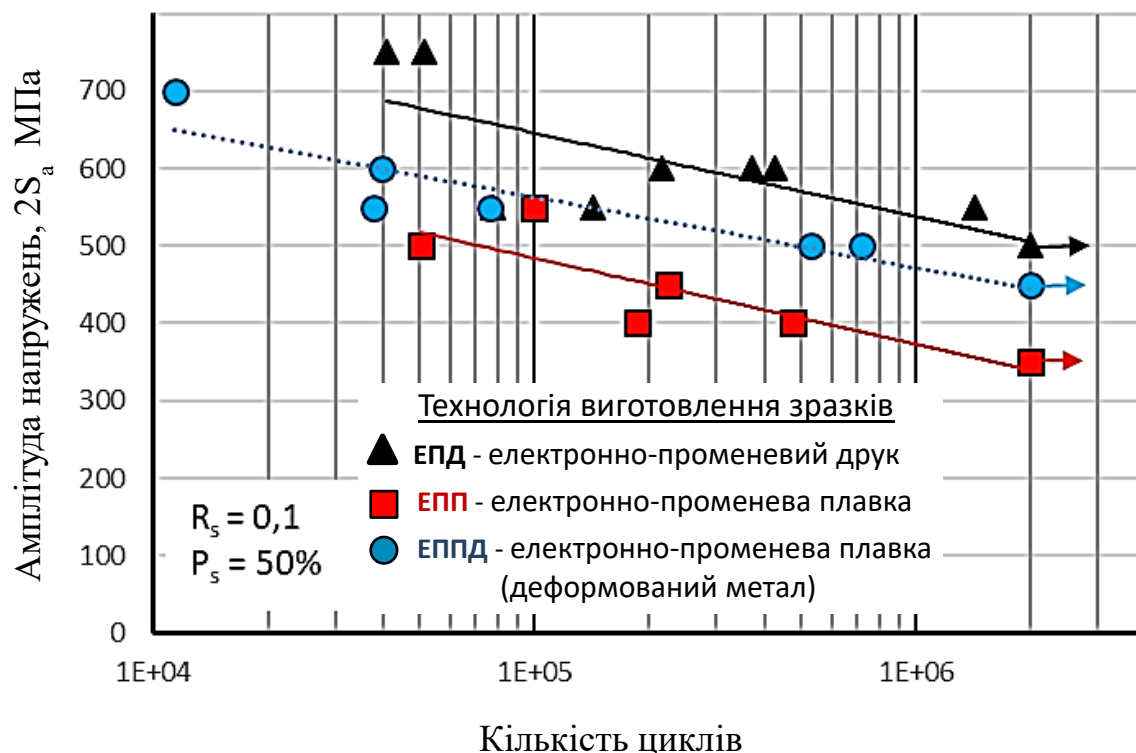


Рисунок 4.32 - Криві втоми дослідних зразків із сплаву титану TA15

Дослідженнями опору втомі визначено, що крива втоми (рис. 4.32) зразків 3Д друкованого 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 друкованого металу на 32% та 11% перевищує відповідні показники для литого та деформованого металу [127].

4.5.5. Обговорення результатів досліджень структури та властивостей заготовок сплаву TA15, отриманих 3D друком

З результатів візуального контролю стану поверхні зразків видно, що в дослідженому діапазоні зміни густини енергії променю та зміщення траєкторії сканування, морфологія поверхні змінюється в широкому діапазоні. З рис. 4.22 видно, що можна виділити 4 типи стану поверхні (несплавлення, мозаїчна структура, наявність окремих дефектів, сплавлення). Досліджені у роботі інтервали зміни технологічних параметрів дозволили встановити інтервал зміни густини енергії променю та значення зміщення траєкторії сканування, в межах яких можливо отримання матеріалу з бездефектною поверхнею (рис. 4.22). В межах визначеного інтервалу були визначені комбінації параметрів, які забезпечують отримання високої якості поверхні (рис. 4.24).

Дослідження макро- та мікроструктури наплавленого матеріалу показали, що навіть у зразків з бездефектною поверхнею спостерігається формування дефектів типу непроплавлення в зоні, яка безпосередньо контактує з підкладкою (рис. 4.25). Це пов'язано з інтенсивним відводом тепла у підкладку на перших етапах формування зразку. Підвищення питомої енергії променю (на одиницю об'єму порошку) сприяє зниженню прояви цього дефекту, але має негативні наслідки у формуванні направленої дендритної структури, яка огрублюється зі зростанням питомої енергії променю. При максимальних значеннях енергії можливо виникнення вторинної пористості внаслідок перегріву розплаву і збільшення усадки при кристалізації (рис. 4.26) Тому в даному випадку необхідно шукати раціональне співвідношення параметрів процесу. З точки зору отримання дисперсної структури основного об'єму матеріалу і, як наслідок, підвищених

механічних характеристик, параметри процесу мають забезпечувати повне проплавлення часток порошку, але не проводити до формування вказаних вище дефектів (рис. 4.27)

Вибір режиму 3D друку, який забезпечує найкращі параметри макро- та мікроструктури, був зроблений також з урахуванням енергоспоживання процесу та його продуктивності. Для підвищення енергоефективності слід вибирати режими з мінімальним значенням густини енергії променя, а продуктивність процесу підвищується із зростанням значень зміщення траєкторії сканування. З отриманих даних (рис. 4.25–4.28) витікає, що найбільш перспективним є режим друку зразка № 13.

Раціональність такого підходу підтверджується результатами механічних випробувань. При виборі режиму отримання зразків за основу був узятий режим отримання зразка 13. Такий режим дозволив отримати найбільш дисперсну мікроструктуру серед зразків з повним проплавленням. При цьому в структурі зразка не спостерігається формування прошарків α -фази на границях дендритів. Внаслідок формування такої структури вдалося отримати механічні властивості при випробуваннях на розтягнення (значення межі міцності) на 27 % вище, ніж у сплава, виплавленого по традиційній технології електронно променевого плавлення. Для межі плинності перевищення становить 24 %, а відносне подовження у матеріалу, що виготовлений за технологією 3D друку, вище у 3,2 рази (рис. 4.29 та дані табл. 4.8). Дослідженнями закономірностей опору втомі показано, що обмежена границя для 3D друкованого металу на 13% та 31% перевищує відповідні показники для деформованого металу (рис. 4.32). Це пояснюється формуванням дисперсної структури за рахунок невеликого перегріву розплаву та швидкого відводу надлишкового тепла у раніше закристалізовані шари матеріалу. Дане пояснення ілюструється рис. 4.28.

З порівняння структур на рис. 4.28 видно, що технологія 3D друку дозволяє отримати значно більш дисперсну структуру виділень кристалітів α та β фаз. Проте для зразка, отриманого 3D друком (рис. 4.28 а), характерна

наявність яскраво вираженої текстури, утвореної однаково орієнтованими дендритами. Зразки, отримані електронно-променевою плавкою з литого (рис. 4.28 б) та деформованого металу (рис. 4.28 в), мають ізотропну структуру, сформовану відносно рівновісними зернами. При статичному розтягуванні дисперсна структура забезпечує підвищення характеристик міцності та пластичності одночасно.

Отриманий результат пояснюється тим, що виходячи з основної гіпотези дослідження, ключовим параметром процесу є саме питома енергія променю. Саме її зростання обумовлює перехід від механізмів спікання до плавлення часток порошку. Але після такого переходу починається процес перегріву розплаву і огрублення структури. Тому на відміну від підходу, запропонованого у [95–97], геометричні параметри друку (швидкість сканування та зміщення траєкторії) не є основними, а мають вибиратися з умови досягнення оптимальних значень питомої енергії. При чому ці значення мають двосторонні обмеження. Ведення процесу у режимі плавлення не повинно приводити до старту процесів огрублення структури. Ось чому, на відміну від рекомендацій [98], ознаками оптимальної структури є не тільки відсутність макродефектів, але й дисперсна мікроструктура з мінімально можливою відстанню між осями дендритів.

Це підтверджується результатами випробувань на ударний вигин. При несприятливій орієнтації однонаправлених дендритів відносно напрямку прикладення зусилля при випробуваннях на ударний згин, можливо зниження значень цієї характеристики. Цей ефект спостерігався у даному дослідженні (рис. 4.30). Це припущення підтверджується результатами отриманими авторами [90, 98, 99]. Тому при проектуванні виробів, які отримують методом 3D друку, необхідно враховувати напрям прикладення максимальних ударних навантажень і формувати виріб таким чином, щоб забезпечити найкращу орієнтацію текстури відносно напрямку навантаження.

Слід зазначити, що при даній схемі виготовлення зразків 3D друком, випробування на однісіне розтягування проводилося у найбільш несприятливому напрямку прикладення навантаження – попереk орієнтації дендритів. Тому значення підвищення механічних характеристик можуть бути ще вищими при сприятливому напрямку прикладення навантаження вздовж осей дендритів.

Вплив анізотропії на значення ударної в'язкості було виявлено в ході дослідження, коли заготовки для визначення властивостей при випробуваннях на ударний вигин були вже сформовані. Їх розміри не дозволяли виготовити зразки з орієнтацією дендритів відносно напрямку прикладення навантаження, відмінного від дослідженого в роботі. Тому перевірити вищевказане твердження в ході поточного дослідження не вдалося. Для цього в подальшому необхідно виготовити зразки, в яких напрямок росту дендритів буде перпендикулярним до напрямку прикладення навантаження.

Отримані результати можуть бути використані для подальшого удосконалення режимів 3D друку виробів із сплаву TA15. Запропонований підхід полягає в оптимізації параметрів процесу з метою отримання дисперсної структури з раціональною орієнтацією дендритів відносно напрямку прикладення навантаження. Він може бути використаний для вдосконалення режимів виробництва і інших сплавів. Очікуваний ефект полягає в зниженні матеріалоемності процесу отримання виробу з одночасним підвищенням комплексу механічних характеристик за рахунок використання оптимізованої технології 3D друку.

До параметрів, які мають вплив на формування дендритної структури, відноситься також гранулометричний склад порошку. В дослідженні він підтримувався незмінним, що дещо обмежує застосування отриманих результатів до випадків використання порошоків іншої гранулометрії. Слід продовжити дослідження в цьому напрямі. Оптимізація гранулометричного складу порошоків саме для технології електронно-променевого 3D друку

дозволить зменшити ступінь розвитку однонаправленої дендритної текстури у готовому виробі. Це, в свою чергу дозволить отримати меншу анізотропію значень ударної в'язкості.

Недоліком даного дослідження слід вважати те, що при вивченні взаємозв'язку структури та механічних властивостей не був проведений фрактографічний аналіз. Зниження ударної в'язкості може мати і інші пояснення крім несприятливої орієнтації дендритів. В подальшому, використання методів скануючої електронної мікроскопії дозволить уточнити механізм руйнування при ударному вигині і розробити ефективні методи підвищення цієї характеристики.

Висновки до розділу 4

1. Визначені технологічні операції адитивного електронно-променевого процесу наплавлення та їх послідовність.

2. Надані технологічні параметри адитивного процесу, аналітично визначено взаємозв'язок між параметрами.

3. Визначені основні етапи адитивного електронно-променевого виробництва.

4. Проведено аналіз технологічних параметрів наплавлення виробів із титанового сплаву Ti-6Al-4V. Зазначено, що основні параметри друку: потужність електронного променя, швидкість переміщення, крок зміщення траєкторії, товщина шару наплавлення визначають густину енергії електронного променя. Раціональне значення густини енергії для порошку титанового сплаву Ti-6Al-4V становить 44,5 Дж/мм³. Також вивчено співвідношення (4.1) між швидкістю електронного променя та його потужністю, що надає можливість в процесі підготовки виробів до друку визначати потужність променя відповідно до його швидкості. Від швидкості променя залежить загальний час побудови виробу.

5. Вивчені технологічні режими друку виробів з порошку титанового сплаву Ti-6Al-4V ELI. Параметри друку становлять: товщина шару порошку

0,1 мм, крок зміщення траєкторії електронного променя 0,2 мм, стратегія сканування двоспрямована з обертанням напрямку на 90° для кожного шару. Потужність електронного променя становить 240 Вт для швидкості його переміщення 270 мм/с, 495 Вт для 540 мм/с, 675 Вт для 780 мм/с.

6. За адитивною технологією з порошку титанового сплаву Ti-6Al-4V виготовлено 25 дослідних зразків розміром 24×24 мм та висотою 10 мм, з яких 5 мм складають технологічні опори і 5 мм тіло виробу. Параметри друку індивідуальні для кожного зразка. В дослідженнях використано три режими швидкості електронного променя: 270, 540 та 780 мм/с. Для кожного режиму змінювали струм динамічного фокусування від $-1,2$ А до $1,27$ А з кроком біля $0,3$ А.

7. Проведено лабораторні дослідження морфології 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 (швидкість променю 780 мм/с; потужність 675 Вт; $I_{df} = -1,2; -0,9; -0,61; 0$ А), що забезпечують мінімальні параметри мікрорельєфу поверхонь (h_i до 200 мкм; S_i до 300 мкм) та відсутність дефектів.

8. Металографічними дослідженнями мікроструктури металу 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, 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.

9. Дослідженнями мікротвердості 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 № 13 з режимом наплавлення: швидкість променя 240 мм/с; потужність 270 Вт.

10. Режим друку зразка № 13 із сплаву Ti-6Al-4V можна вважати найбільш раціональним з точки зору формування найкращого 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 Ti-6Al-4V.

11. Методом електронно-променевого 3D друку з порошку титанового сплаву TA15 було отримано партію зразків для структурних досліджень та 18 зразків для визначення механічних характеристик. Крок зміщення траєкторії променя змінювали від 0,1 до 0,25 мм з інтервалом 0,05 мм. Питому енергію електронного променя змінювали від 20 до 70 Дж/мм³ для кожного значення кроку зміщення траєкторії.

12. 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 питомій 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.

13. Для титанового сплаву TA15 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. Це дозволяє отримати підвищений комплекс механічних характеристик.

14. Винайдений режим друку забезпечує отримання вищих значень меж міцності та текучості відповідно на 27% та 24% у порівнянні з сплавом отриманим за традиційною технологією електронно-променевої плавки. 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.

15. Дослідженнями опору втоми втомі визначено, що крива втоми зразків 3Д друкованого 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 друкованого металу на 32% та 11% перевищує відповідні показники для литого та деформованого металу.

Результати експериментальних досліджень даного розділу наведено в таких публікаціях:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 22. 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.

6. 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

7. 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

8. 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*.

Розділ 5. Розробка цифрових моделей, проєктування, виготовлення виробів за адитивною технологією та їх дослідження

5.1 Розробка та виготовлення лопаток ГТД

5.1.1. Матеріали для авіадвигунобудування

Підвищення вимог до економічності та надійності газотурбінних двигунів, зниження їх шумових характеристик та збільшення ресурсу помітно загострили проблему вибору конструкційних матеріалів, які використовують для виготовлення відповідальних деталей двигуна, в першу чергу для лопаток і дисків компресора високого тиску.

Відомо, що у сучасному авіаційному двигуні частка титанових сплавів становить більше 30%, тому зрозуміло, наскільки важливі ці матеріали для авіації і наскільки необхідний інтенсивний розвиток матеріалознавства титанових сплавів та їх виробництва [104].

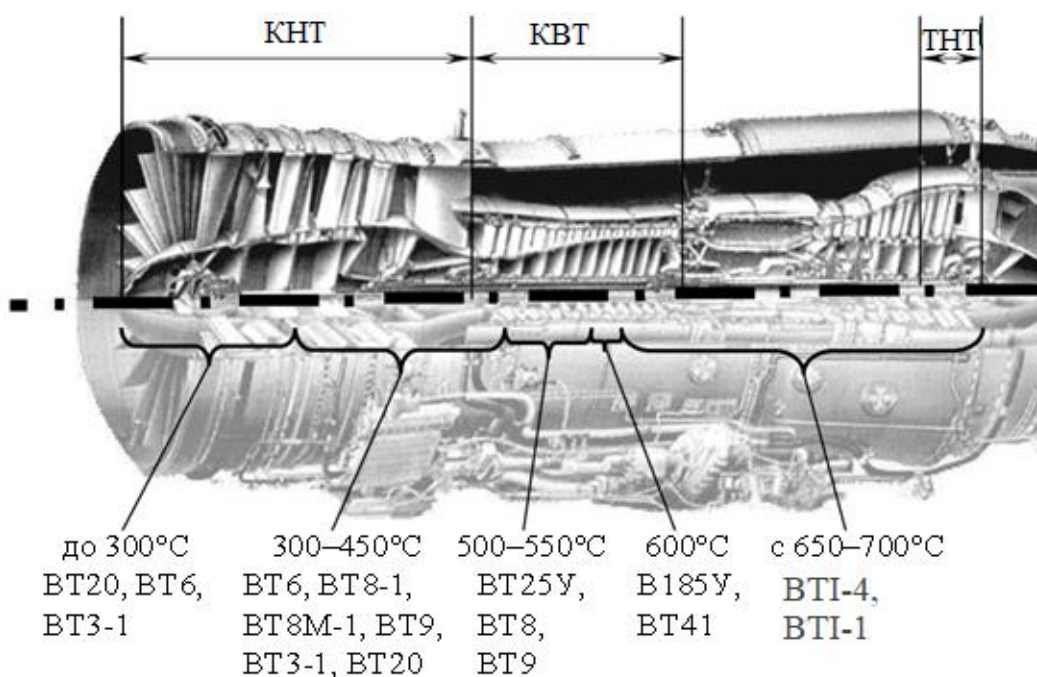


Рисунок 5.1. Сфери застосування титанових сплавів в конструкції ГТД

Авіаційні двигуни складаються переважно із металевих компонентів. Там, де найважливіше міцність і легкість (деталі конструкції, частини компресора, каркаси двигунів) використовують різні титанові сплави (рис. 5.1).

Лопатки ротора турбіни працюють у досить жорстких умовах, що поєднують високі навантаження та температури, не характерні для інших компонентів турбіни. Лінійна швидкість вершини лопатки досягає 390 метрів за секунду, а швидкість потоку газу 600 метрів за секунду. Температура газу може перевищувати 1200 °С. Крім того, матеріал лопатки повинен мати високий опір корозії та ерозії, високим втомним напругам і ударним навантаженням. При цьому важлива і густина металу, що впливає на відцентрову силу та вагу диска.

Компресорні лопатки працюють у більш щадних умовах. Від матеріалу лопаток компресора потрібна висока міцність до температур близько 600°C, низька густина, висока ударна міцність та опір втомі.

Робочі та статорні лопатки повинні працювати в умовах значних температурних і силових впливів та є ключовим елементом турбіни.

Одним із головних лімітуючих факторів при розробці титанових сплавів стала вимога щодо підвищення робочої температури деталей компресора високого тиску ГТД до 550–650°C. Тому створення жароміцних титанових сплавів з високим опором малоциклової втоми і повзучості є одним з найбільш актуальних завдань сучасного двигунобудування [105].

Перспективним для потреб авіаційної галузі є жаростійкі сплави TA15 (BT20) системи Ti-6,5Al-2Zr-1Mo-1V з підвищеним вмістом алюмінію.

В дисертації в розділах 3.2 та 4.5 проведені дослідження застосування сплаву TA15 та його аналога BT20 в адитивному виробництві. Отримані дослідні зразки з хорошим формуванням литої структури наплавленого металу та однорідним хімічним складом. Сплав має значний потенціал для застосування в адитивному виробництві вузлів авіаційних двигунів.

Розробка способів проєктування та адитивного виробництва лопаток газотурбінного авіаційного двигуна є перспективною задачею подальшого розвитку сучасного авіадвигунобудування.

5.1.2. Розробка моделей лопатки ГТД

При створенні виробів з металу адитивним методом в процесі пошарового нагріву і охолодження відбуваються локальні усадкові явища, які приводять до загальних залишкових деформацій - викривлення лінійних розмірів надрукованої деталі [76,124, 125, 126]. Для компенсації залишкових деформацій виникає потреба корекції моделі виробу з урахуванням очікуваних деформацій.

В процесі друку на форму виробів впливає низка факторів:

- матеріал, з якого виробляється деталь;
- технологічні параметри друку;
- просторове положення виробу відносно платформи;
- розташування деталі в збірці виробів;
- форма технологічних опор;
- загальна температура збірки виробів та оточуючого середовища.

Вважаючи на те, що вироби зазвичай мають складну геометричну форму, виникає проблема отримання кінцевого виробу з необхідними розмірами в межах допусків. Для вирішення цієї проблеми передбачається застосувати методи комп'ютерного моделювання процесу друку з наступним корегуванням моделі, за якою буде надрукований виріб [125].

Метою роботи є аналіз та оптимізація формоутворення лопатки ГТД в процесі виготовлення за адитивною електронно-променевою технологією.

В роботі задіяний програмний продукт Simufact Additive, розроблений компанією MSC.Software. Це спеціалізований програмний комплекс, призначений для моделювання 3D друку деталей із металів за технологією розплавлення матеріалу в наперед сформованому шарі (Powder Bed Fusion), включаючи процеси селективного лазерного плавлення (Selective Laser Melting (SLM), прямого лазерного спікання металів (Direct Metal Laser Sintering (DMLS), селективного лазерного плавлення металевих порошкових матеріалів (Laser CUSING), електронно-променевого наплавлення (Electron Beam Melting (EBM) та ряд інших процесів [75].

Simufact Additive надає можливість:

- обчислити деформації деталі та зменшити або взагалі уникнути спотворення її форми;
- порівняти результати моделювання з еталонною формою;
- вибрати оптимальний напрямок друку;
- оптимізувати підтримуючі структури (опори);
- отримати стан деталі після термічної обробки, видалення опорної плити та підтримуючої структури;
- мінімізувати залишкові напруження.

Вирішувач MARC [111] є основою програми Simufact Additive. MARC, має розвинуті можливості для проведення зв'язаного температурного і термомеханічного аналізу напружено-деформованого стану виробу під час пошарового друку, враховуючи термічні деформації і властивості матеріалу.

Для проведення розрахунків використовують спеціальний генератор воксельної сітки. Вокселі це елементарні осередки, з яких складається досліджувана модель виробу. Створюється регулярна сітка, яка використовується для моделювання пошарового друку деталі. У вирішувачі MARC додана можливість послідовної активізації воксельних шарів. Також додані нові методи моделювання процесу різання, які необхідні для моделювання процесу видалення опорної пластини та підтримуючої структури.

В Simufact Additive використовується два підходи для оперативного розрахункового визначення деформацій виробу під час друку [112]. За наближеним методом усадки (Mechanical inherent strain approach) в рамках механічної задачі теорії пружності або в результаті проведення більш загального зв'язаного аналізу термопластичного деформування матеріалу виробу в процесі друку при допущенні однакового спрощеного термічного циклу друку кожного вокселя.

Перший підхід оснований на визначенні функції усадки (залишкових пластичних деформацій) від друку окремого елементарного об'єму (вокселя)

в залежності від технологічних параметрів пошарового формування виробу шляхом експериментального калібрування вказаних деформацій на стандартному надрукованому зразку типу балки обмеженого розміру. Кінетика нагріву виробу під час друку не розраховується, залишкові деформації і напруження визначаються в результаті розв'язку задачі механічного навантаження скінчено-елементної моделі виробу додатковими деформаціями усадки для кожного надрукованого вокселя, що дозволяє суттєво скоротити час розрахунку при збереженні достатньої з інженерної точки зору точності.

Другий розрахунковий підхід є більш загальним, він оснований на проведенні зв'язаного температурного і термомеханічного аналізу під час пошарового друку виробу. Але для скорочення часу на розрахунок використовується припущення про однаковий (спрощений) термічний цикл для кожного вокселя надрукованого матеріалу, що дозволяє не проводити аналіз задачі нестационарної теплопровідності для всієї моделі в процесі друку. В результаті розрахунку за цим підходом визначається приблизна кінетика нагріву, а також напружень і деформацій виробу.

З метою компенсації залишкових деформацій виробу можливий експорт моделі деформованої геометрії з будь-яким масштабним множником. Таким чином, можна підібрати таку вихідну форму деталі, яка після друку дає мінімальне відхилення від необхідної форми, компенсуючи деформації, які виникають при створенні цієї деталі [76].

Із застосуванням програмного продукту Simufact Additive можливо визначити вплив технологічних параметрів друку на параметри кінцевого виробу та прогнозувати деформації форми деталі.

В роботі була задіяна модель лопатки газотурбінного двигуна (ГТД) (рис. 5.2), яку розробили із застосуванням програмних засобів CAD. Модель створена в форматі STL, що придатний для адитивного виробництва.

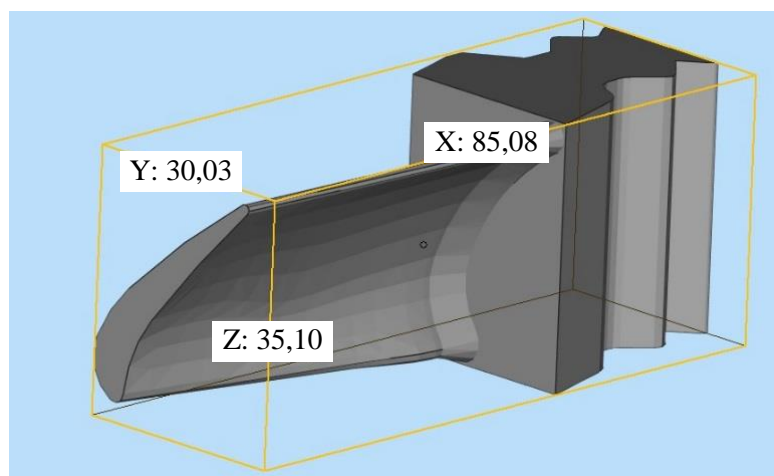


Рисунок 5.2. Модель статорної лопатки ГТД

З використанням програмного продукту Materialise Magics згенеровано технологічні опори для подальшого друку. Були задіяні декілька просторових положень деталей, які надані на рис. 5.3.

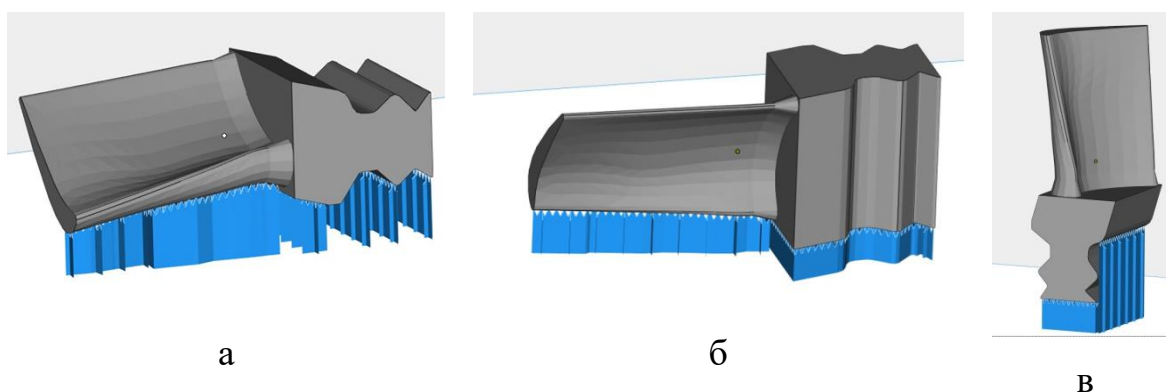


Рисунок 5.3. Моделі виробу з технологічними опорами

Моделі рис. 5.3а та рис. 5.3б забезпечують найменший час побудови в процесі друку. Модель рис. 5.3в надає можливість розташувати на платформі принтера та надрукувати найбільшу кількість деталей за один виробничий цикл.

Файли моделей виробу та технологічних опор в форматі STL експортовані до програми Simufact Additive.

Подальші дії спрямовані на оптимізацію геометричної форми деталі та отримання інформації щодо впливу технологічних параметрів на формування виробів та їх властивості.

В інтерфейсі Simufact Additive створений проект, задані налаштування, де зазначені параметри устаткування і технологічного процесу, матеріали деталі і платформи, імпортовані моделі виробу разом з технологічними опорами (рис. 5.4).

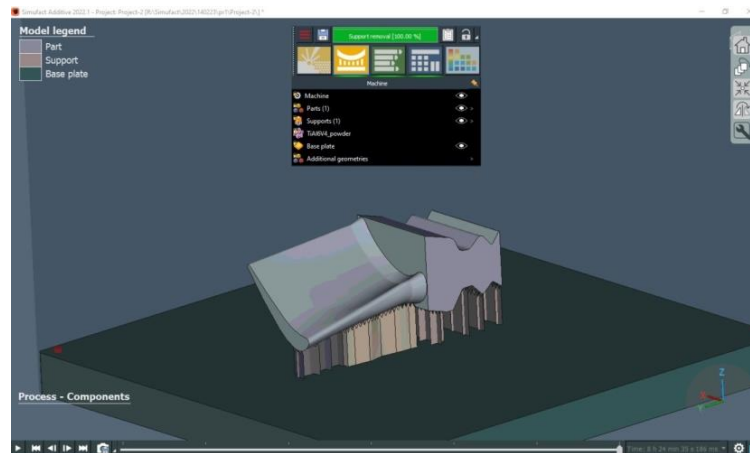


Рисунок 5.4. Інтерфейс програми Simufact Additive з інтегрованою моделлю лопатки ГТД

Технологічні параметри: потужність, швидкість та діаметр електронного променя, товщина шару порошку, метод сканування, термічні характеристики друку задані в налаштуваннях інтерфейсу у вкладниці Build-Propertes.

Надалі програмно згенеровано вокселі – елементарні осередки з яких складається модель виробу, що досліджується (рис. 5.5).

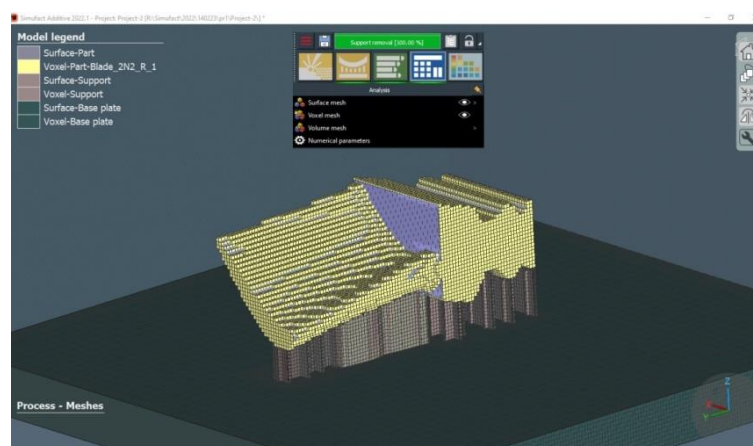


Рисунок 5.5. Створення елементарних осередків – вокселей.

Наступним кроком проведено моделювання пошарового друку виробу. Графічний інтерфейс Simufact Additive, де відображено процес друку, наданий на рис. 5.6.

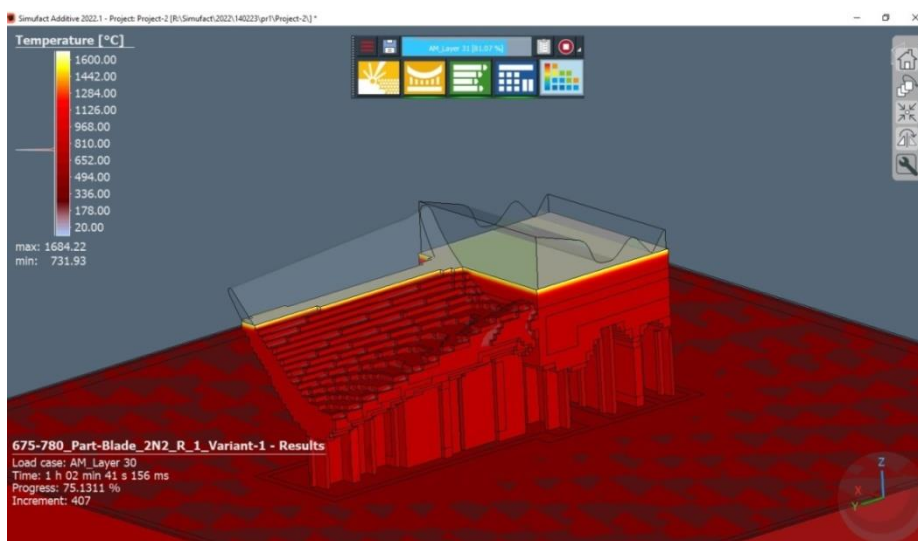


Рисунок 5.6. Графічне відображення друку лопатки ГТД у програмі Simufact Additive

Деформації усадки визначались за другим більш загальним підходом аналізу термопластичного деформування матеріалу. Тобто, процедура калібрування деформацій усадки для вокселей матеріалу не проводилась, а виконувався аналіз кінетики температурної задачі нагріву виробу при пошаровому формуванні і зв'язаний термопластичний аналіз визначення напружено-деформованого стану.

Колір відповідає значенню температур виробу, технологічних опор та платформи на кожному з етапів симуляції друку. Кольорова палітра з показниками температури надані на рис. 5.6 у таблиці Temperature.

За результатами моделювання отриманий файл (рис. 5.7), де обчислені відхилення розмірів лопатки ГТД від еталонної моделі. Відхилення розмірів виникають внаслідок деформації форми виробу в процесі друку. Значення можливих деформацій відповідають кольору та надані на палітрі в таблиці Total displacement.

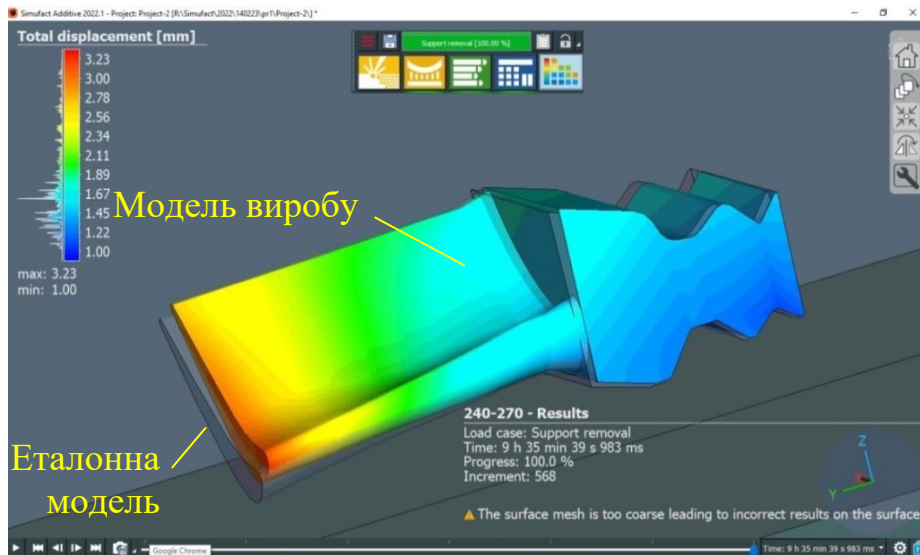


Рисунок 5.7. Відхилення розмірів моделі надрукованого виробу від еталонної моделі

Наступний етап досліджень – коригування моделі, обчислення просторових деформацій скоригованої моделі та її порівняння з еталонною моделлю.

Корегування моделі лопатки ГТД для компенсації просторових деформацій здійснюється в меню *Shape comparison* програми Simufact Additive. Модель, яка отримана за результатом симуляції адитивного процесу, порівнюється з еталонною моделлю. В інтерфейсі програми за кольоровою палітрою відображається відхилення розмірів скоригованої моделі від еталонної (рис. 5.8).

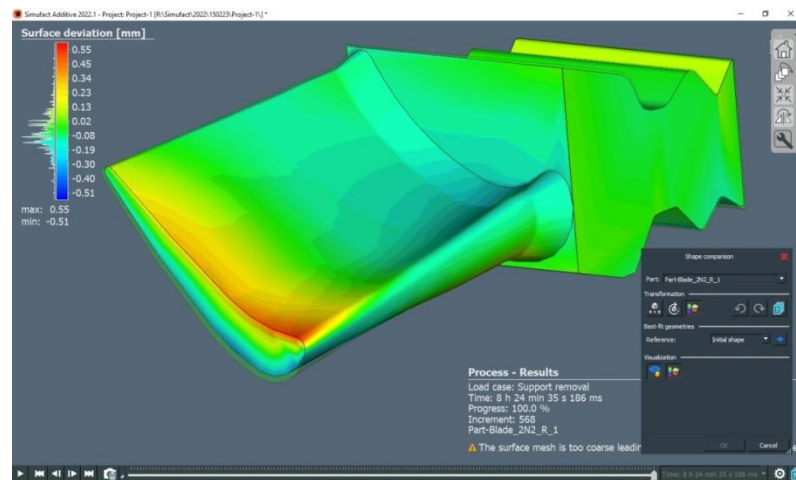


Рисунок 5.8. Меню *Shape comparison* програми Simufact Additive

Надалі модель, що отримана, програмно обробляється. Створюється новий файл з урахуванням оптимізації форми. Процес симуляції друку послідовно повторюється. Створюється наступна модель лопатки ГТД, яка порівнюється з еталонною.

У разі невідповідності отриманої моделі до еталонної в межах допусків, процес повторюється. Відхилення розмірів надрукованих виробів від еталонної моделі не має перевищувати $\pm 0,3$ мм.

Файл скорегованої моделі експортується в форматі stl та приймається для друку.

Порівнюючи еталону (базову) та оптимізовану моделі лопатки ГТД можна зазначити, що лінійні розміри остаточної моделі виробу збільшені від значень (35,1;85,08;30,03) мм за координатами X,Y,Z до значень (35,69;85,378;30,411) мм. Тобто модель збільшена з урахуванням компенсації усадкових явищ та інших чинників, які призводять до деформації форми виробу в процесі друку.

5.1.3. Дослідження впливу технологічних параметрів на формоутворення

В дослідженнях застосовані технологічні параметри друку виробів із порошків титанового сплаву Ti-6Al-4V ELI, які визначені в [63] та наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1. Технологічні параметри друку виробів

№ виробу	Потужність променя, Вт	Швидкість переміщення, 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

Для симуляції друку виробів, наданих на рис. 5.3а, в програмі Simufact Additive створено три проєкти з різними технологічними параметрами. В кожному проєкті визначені просторові деформації та відхилення розмірів

лопатки ГТД в процесі друку, які відрізняються залежно від технологічних параметрів друку (табл. 5.2).

Таблиця 5.2. Значення просторових деформацій

№ виробу	Потужність променя, Вт	Швидкість переміщення, мм/с	Відхилення розмірів, мм	
			від	до
1	240	270	1,00	3,23
2	495	540	0,97	2,85
3	675	780	0,98	2,70

Просторові деформації для кожного із технологічних режимів є індивідуальними, тому потрібно провести дослідження друку кожного з виробів, наданих на рис. 5.3, для всіх режимів, зазначених в табл. 5.1. Потім провести коригування форми виробів і отримати остаточні моделі лопатки ГТД. Створені моделі будуть придатні для подальшого друку [126].

5.1.4. Оптимізація цифрових моделей лопатки ГТД

Із застосуванням програмного продукту Simufact Additive отримані оптимізовані комп'ютерні моделі лопатки ГТД відповідно до застосованих технологічних режимів друку та просторового положення деталей. Результати моделювання надані в табл. 5.3.

Таблиця 5.3. Результати оптимізації моделей лопатки ГТД

№ виробу	Просторове положення за рис. 5.3	Потужність променя, Вт	Швидкість переміщення, мм/с	Відхилення розмірів, мм	
				від	до
1	а	240	270	-0,03	0,13
2	а	495	540	-0,02	0,08
3	а	675	780	-0,03	0,09
4	б	240	270	-0,05	0,11
5	в	240	270	-0,26	0,14
6	в	495	540	-0,25	0,14
7	в	675	780	-0,25	0,13

Оптимізовані моделі збірки виробів у складі з технологічними опорами експортуються в форматі stl і придатні для подальшого друку.

5.1.5. Виготовлення адитивним методом лопаток ГТД

За моделями, які отримані в розділі 5.1.4, в програмі Magics RP створена збірка виробів (рис. 5.9), яка складається з 2 лопаток ГТД та 4 дослідних зразків.

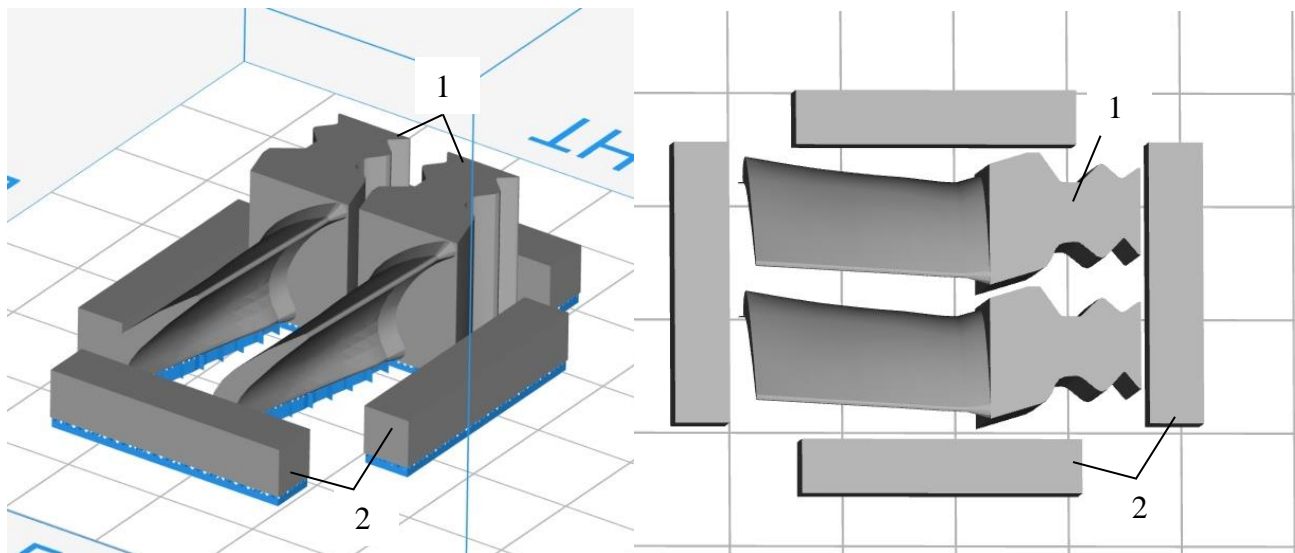


Рисунок 5.9. Модель збірки виробів: 1 - роторна лопатка ГТД, 2 - дослідний зразок

Для досліджень задіяли порошок титанового сплаву TA15, який виготовлений методом плазмової плавки та відцентрового розпилення (технологія PREP). Гранули порошку мають правильну сферичну форму розмірами від 45 до 113 мкм. Хімічний склад порошку наведений у таблиці 4.7.

Зразки були виготовлені методом пошарового електронно-променевого 3D друку на дослідному устаткуванні, створеному в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона (Україна) [60].

Процес наплавлення відбувався у вакуумній камері електронно-променевого устаткування (рис. 4.6) Прискорююча напруга електронно-променевої гармати становила 60 кВ. Попередній нагрів шару порошку до температури 730 °С здійснювали растровим променем потужністю 1800 Вт із швидкістю сканування 14,6 м/с (задіяна схема растрування з 8 проходів). Робочий тиск у вакуумній камері при наплавленні складав 10^{-2} Па.

Технологічні режими друку виробів (див. табл. 5.4) задіяні відповідно до результатів досліджень, які надані в розділі 4.5.

Таблиця 5.4. Технологічні режими друку лопаток ГТД та дослідних зразків

№ з/п	Найменування параметра	Одиниця виміру	Значення
1	Висота шару порошку	мм	0,1
2	Густина енергії променя	Дж/мм ³	40
3	Потужність променя	Вт	400
4	Швидкість переміщення променя	мм/с	500
5	Крок зміщення траєкторії променя	мм	0,2

Відповідно до заданих технологічних параметрів методом адитивного електронно-променевого наплавлення виготовлені вироби (рис. 5.10, 5.11) [128].

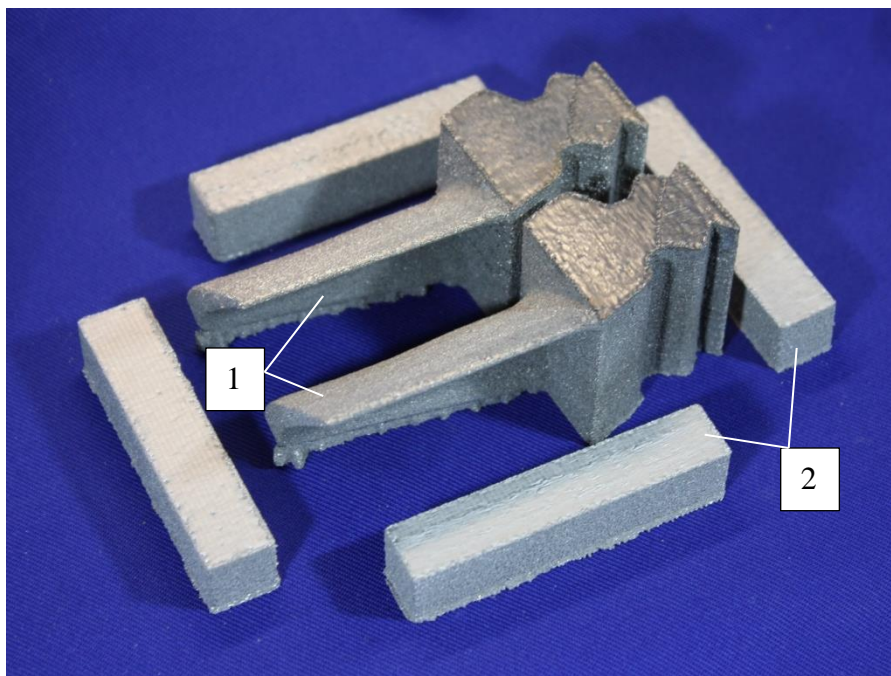
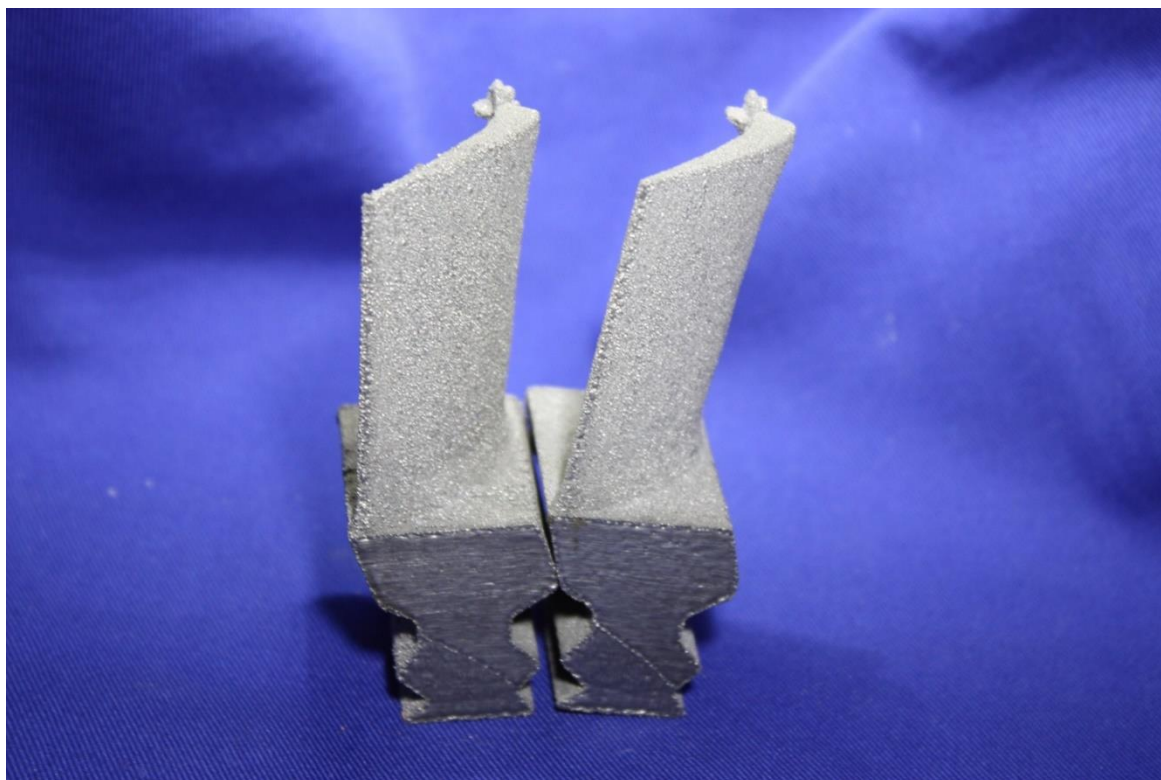
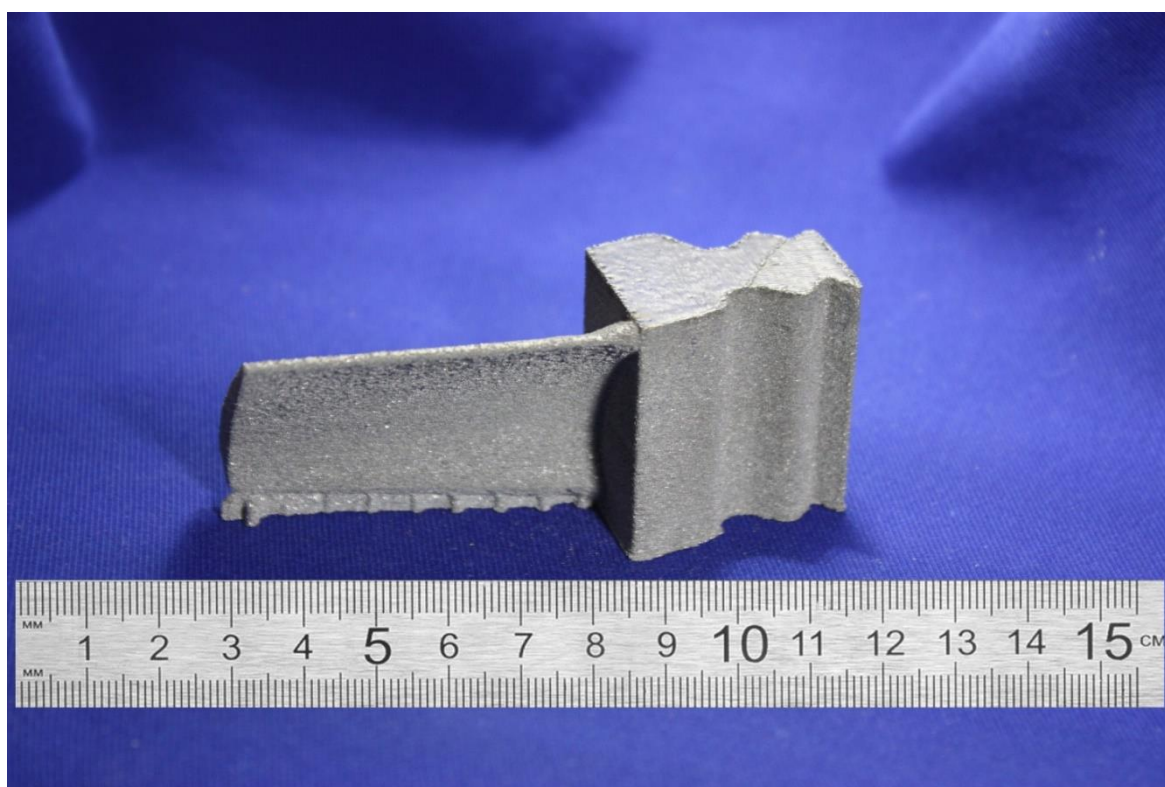


Рисунок 5.10. Надруковані вироби: 1 - роторна лопатка ГТД, 2 - дослідний зразок



а



б

Рисунок 5.11. Роторна лопатка ГТД

Проведено аналіз формоутворення виробу. Геометричні розміри еталонної комп'ютерної моделі та надрукованого виробу «Лопатка ГТД» надані в табл. 5.5.

Таблиця 5.5. Розміри цифрової моделі та виробу «Лопатка ГТД»

Параметр	Цифрова модель, мм	Надрукований виріб, мм	Розбіжність, мм	Допуск, мм	Позначка про відповідність
Висота	35,1	35,21	0,11	±0,3	Відповідає
Ширина	30,03	30,16	0,13	±0,3	Відповідає
Довжина	85,08	85,06	-0,02	±0,3	Відповідає

Визначено, що за розмірами надрукована лопатка ГТД відповідає цифровій моделі. За результатами розрахунку при використанні оптимізованих моделей відхилення геометричних розмірів надрукованих лопаток не перевищує допусків на розмір виробу $\pm 0,3$ мм.

5.1.6. Випробування дослідного зразка із сплаву ТА15

Для визначення властивостей був досліджений зразок (поз. 2 рис. 5.10) шириною 12 мм, довжиною 62 мм та висотою 14,5 мм, з яких 2,5 мм становлять технологічні опори.

Дослідження мікроструктури зразків виконували традиційними методами. На електроерозійному верстаті здійснили поперечні різи, які шліфували наждачним папером та полірували з алмазною суспензією. Поверхні травили водяним розчином 15% HNO₃ та 5% HF.

Мікроструктури вивчали з допомогою скануючого електронного мікроскопа Tescan Vega 3 SBH EasyProb.

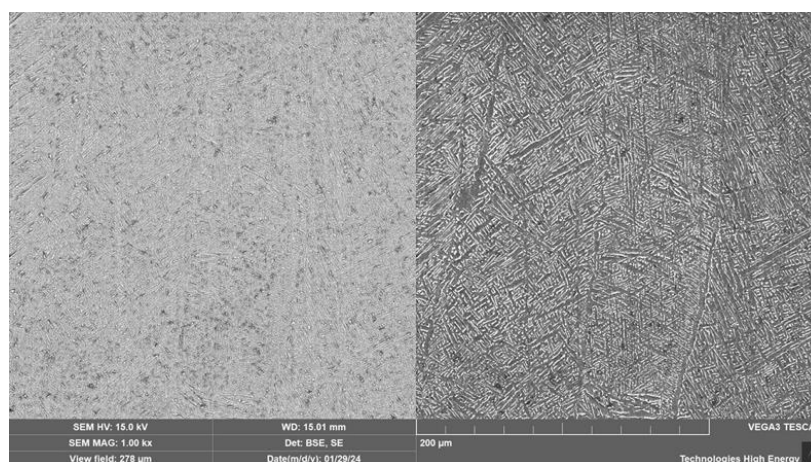


Рисунок 5.12. Мікроструктура зразку з титанового сплаву ТА15

Визначено, що структура сплаву є тонкопластинчастою та двофазною (рис. 5.12) [128].

За результатами рентгено-фазових досліджень встановлено наявність двох фаз α та β титану (рис. 5.13).

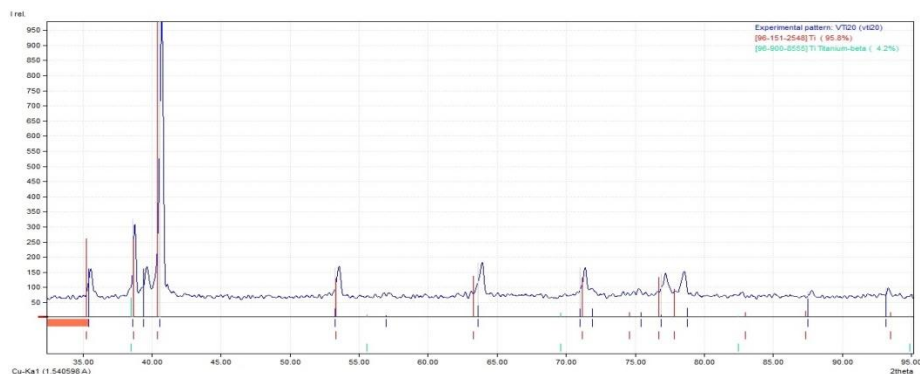


Рисунок 5.13. Результати рентгено-фазових досліджень зразка з титанового сплаву TA15

Мікроструктура зразка є характерною для титанового сплаву TA15.

Дослідженнями встановлено, що в структурі наявні нерегулярні видовжені пори (раковини) розміром від 50/10 до 230/60 мкм, які розташовані ланцюжком (рис. 5.14).

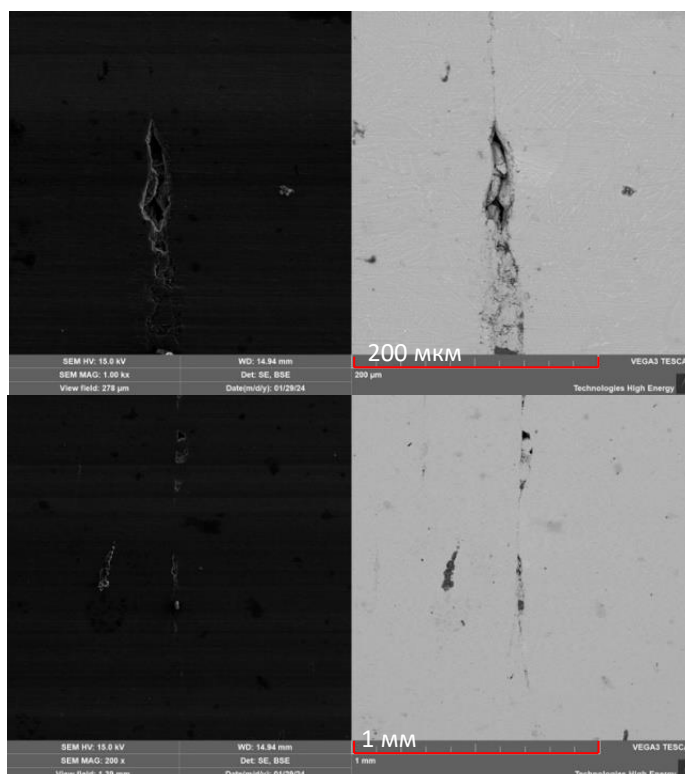


Рисунок 5.14. Мікроструктура поперечного перетину зразка з титанового сплаву TA15

Пористість дослідного зразка визначали за (5.1) [110].

$$P = (1 - \rho_v/\rho_t) \cdot 100\%, \quad (5.1)$$

де,

P – пористість;

ρ_v – визначена густина зразка, г/см³;

ρ_t – дійсна густина матеріалу, г/см³.

Густину дослідного зразка визначали методом гідростатичного зважування. Густина становить 4,43 г/см³.

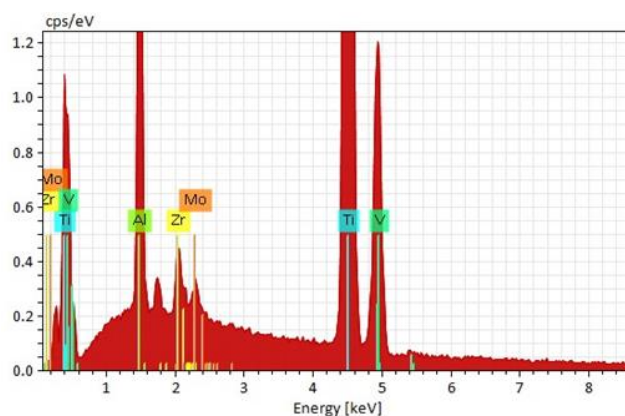
Густина титанового сплаву TA15 відповідно до вимог виробника становить 4,45 г/см³.

Пористість дослідного разка становить

$$P = (1 - 4,43/4,45) \cdot 100\% = 0,45\% \quad (5.2)$$

Хімічний склад визначали за допомогою скануючого електронного мікроскопа Tescan Vega 3 SBH EasyProbe з енергодисперсійним рентгенівським мікроаналізатором Bruker Quantax 610.

Результати досліджень хімічного складу зразка на рис. 5.15.



Acquisition							
Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Al	13	22263	7.06	6.66	11.49	0.36	5.11
Ti	22	150754	92.37	87.16	84.70	2.70	2.92
V	23	2678	1.84	1.73	1.58	0.16	8.82
Zr	40	6542	3.04	2.87	1.46	0.16	5.11
Mo	42	3629	1.67	1.57	0.76	0.11	6.36
		Sum	105.98	100.00	100.00		

Рисунок 5.15. Дослідження хімічного складу зразка з титанового сплаву TA15

Таблиця 5.6. Розміри кристалітів α - фази сплаву ТА15

	№ січної лінії:				
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
Результат вимірювань α -фази, мкм	2,5	1,0	3,0	1,0	1,5
	3,0	1,5	2,0	1,5	1,0
	3,5	1,0	2,5	1,5	1,0
	1,5	1,0	3,0	2,0	3,0
	1,0	1,0	1,0	2,5	1,0
	Середнє значення	2,3	1,1	2,3	1,7

Середнє значення розмірів кристалітів α - фази сплаву ТА15 за всіма січними становить: $(2,3+1,1+2,3+1,7+1,5)/5=1,78 \cong 1,8$ мкм.

5.2. Проектування та виготовлення адитивним методом індивідуальних медичних імплантатів

У зв'язку з воєнними діями в Україні зростає кількість поранених воїнів і цивільних громадян. Під час бойових дій у сучасних умовах поранення кінцівок складають 65–70% від усіх поранень [106,107]. Ураження кісткової тканини займають значну частку в загальній кількості поранень. При значних порушеннях кісткової тканини операція завершується втратою повноцінного функціонування кістки або ампутацією. Подальше екзопротезування не може повернути повноцінне функціонування ураженої ділянки. При втратах великих ділянок кістки використання трансплантатів є дорогим, також можлива низка ускладнень. Крім того, змінився і характер травм опорно-рухового апарату, в зв'язку з чим не вистачає не лише якісних імплантатів, а й передових технологій їх використання. Проте розвиток вітчизняних підприємств-розробників виробів медичного призначення різко уповільнився останніми роками. Вітчизняне виробництво займає менше 10% ринку, тоді як імпорتنі імплантати, протези, деталі для остеосинтезу, що постачаються зараз в Україні, коштують дуже дорого та мають недоліки через недосконалість матеріалів, з яких вони виготовлені [106].

Таким чином, надзвичайно актуальним і гострим є забезпечення медичної галузі надійними, конкурентоспроможними вітчизняними імплантатами та протезами для проведення повноцінної реконструктивно-відновлювальної хірургії. Ключовим моментом при створенні нових виробів медичного призначення є прогресивні матеріали з високою наукоємністю, покращеними біологічними та механічними характеристиками, що забезпечать повноцінне відновлення функцій уражених органів.

У розвинених країнах основним джерелом економічного зростання є передова наука і впровадження новітніх технологій, що і зумовлює нагальну необхідність докорінного підвищення науково-технічного рівня економіки та вжиття заходів з організації співпраці науково-дослідних інститутів з медичними закладами України.

Зазначені проблеми зумовлюють необхідність започаткування наукових досліджень із створення та впровадження адитивних електронно-променевих технологій для потреб медичної галузі в Україні.

5.2.1. Матеріали медичного призначення

Сучасні біоматеріали повинні володіти комплексом властивостей, який включає їх механічну й біологічну сумісність з кістковою тканиною, високі механічні характеристики, зносо- і корозійну стійкість у біологічному середовищі, відсутність токсичних легуючих елементів. Серед механічних властивостей найбільше значення мають: висока міцність і низький модуль пружності, близький до модуля пружності кістки (від 4 до 30 ГПа, залежить від типу кістки і напрямку виміру) [33].

У наш час в якості біоматеріалів широко застосовують нержавіючі сталі 316 L і 316 LSS, кобальтові і титанові сплави. Серед цих матеріалів перспективними є титанові сплави. Вони відрізняються хорошим сполученням властивостей - високою міцністю і низькою щільністю, високою корозійною стійкістю, інертністю в органічному середовищі тіла людини, біологічною сумісністю, порівняно низьким модулем пружності (55–110 ГПа). В якості легуючих елементів у цих сплавах застосовуються Al,

V, Nb, Zr, Sn, Ta, Mo. Для підвищення їх біосумісності в останні роки розробляють сплави без використання V і Al. Дуже важко для таких сплавів забезпечити комбінацію високої міцності і низького модуля пружності, оскільки модуль пружності сам по собі є характеристикою міцності, тому потрібно розробляти нові нестандартні схеми легування [33].

Матеріали для імплантатів мають бути біологічно інертними, тобто мати нетоксичний хімічний склад, до того ж, вони повинні володіти високими механічними характеристиками. Міцність та відносно низький модуль пружності дають можливість використовувати сплави на основі титану в ортопедії та стоматології [34, 48]. До теперішнього часу переважне застосування у медицині має титановий сплав ВТ6 системи Ti-6Al-4V [28].

5.2.2. Розробка індивідуального ортопедичного імплантату

При виконанні роботи поставлена мета здійснити проектування індивідуальних імплантатів та виготовити зразки виробів медичного призначення із застосуванням сучасних високоміцних титанових сплавів.

Роботи проведені спільно з Ірпінським воєнним госпіталем та компанію LLC "Materialise Ukraine". За результатами комп'ютерної томографії хворого з пошкодженням функції ходи була створена та досліджена комп'ютерна модель ураженого органу. Для досліджень застосований програмний засіб Radiant компанії Medixan [108].

На рисунку 5.17 колом зазначений уражений орган. Суглоб пошкоджений, просторове положення кісток змінено. Лікування передбачає відновлення функції ходи шляхом протезування із застосуванням індивідуального імплантату.

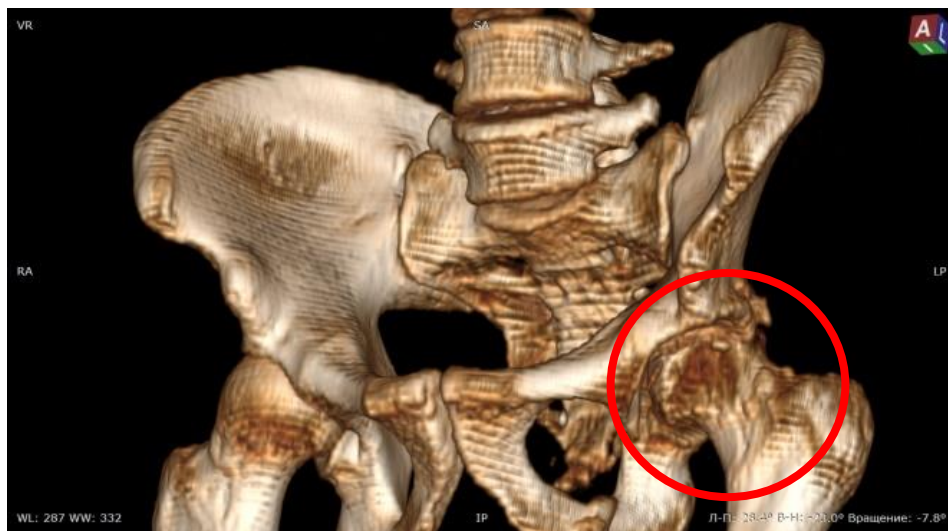


Рисунок 5.17. Комп'ютерна модель кульшового суглобу

Спільно з компанією LLC "Materialise Ukraine" з використанням програмного засобу Materialise Mimics Innovation Suite [109] здійснено моделювання імплантату (рис. 5.18).

Комп'ютерна модель імплантату (рисунок 5.19) створена в форматі stl, виріб придатний для виготовлення адитивним методом [43].

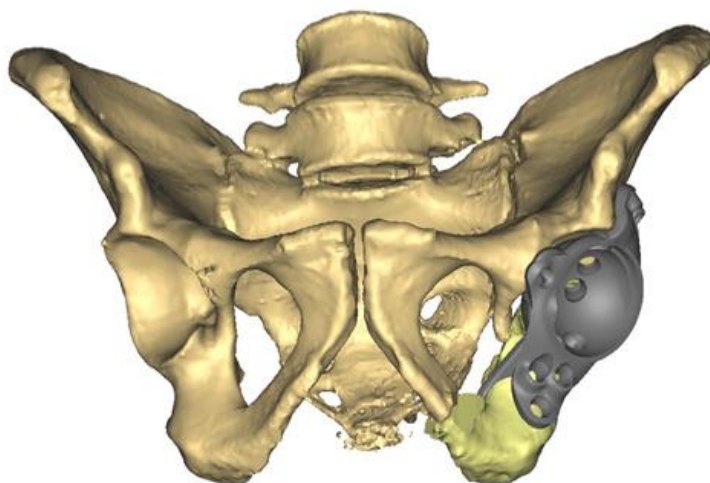


Рисунок 5.18. Модель кульшового органу з імплантатом

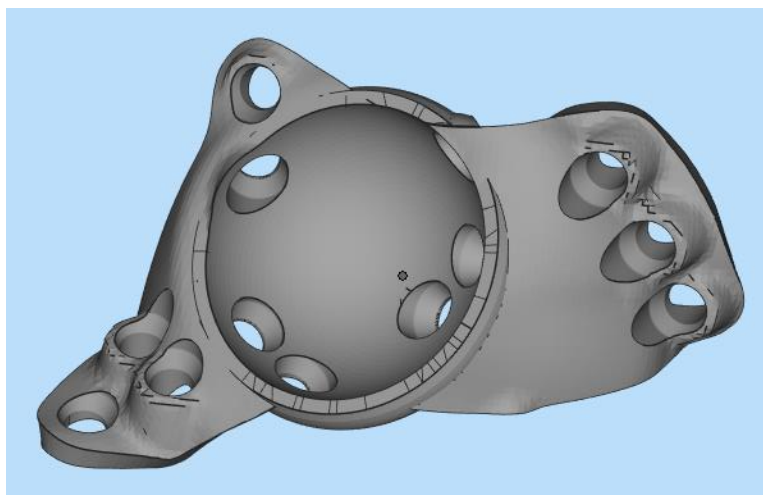


Рисунок 5.19. Комп'ютерна модель імплантату

Лікарською радою Ірпінського воєнного госпіталю вирішено, що імплантація із застосуванням отриманої моделі потребує репозиції кісток пацієнта, що унеможлиблює проведення операції. Прийнято рішення про необхідність фізичного моделювання органу, який потребує лікування та розробки фізичної моделі імплантата.

Для проведення досліджень надрукована модель ураженого кульшового органу (рис. 5.20) та створена фізична модель імплантату (рис. 5.21), яка не потребує репозиції кісток при проведенні операції.

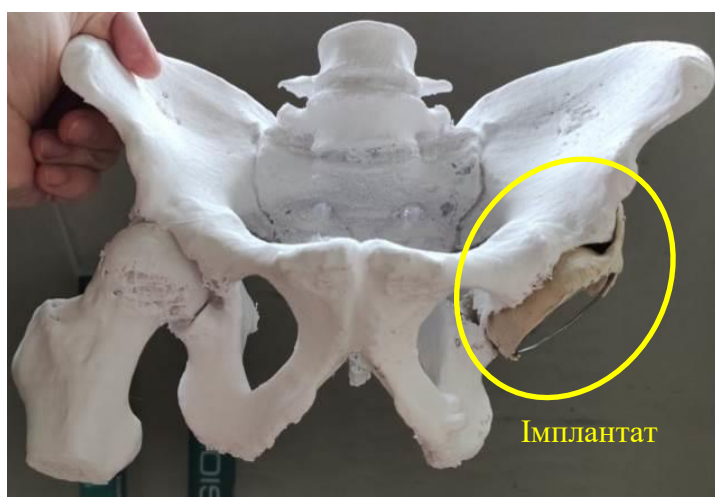


Рисунок 5.20. Модель кульшового суглобу з імплантатом



Рисунок 5.21. Фізична модель імплантата

З фізичної моделі імплантату методом зворотної інженерії створена цифрова модель в форматі stl (рис. 5.22), яка доопрацьована в програмному продукті Materialise Mimics та інтегрована до комп'ютерної моделі кульшового органу (рис. 5.23). З використанням програми Materialise Magics в форматі stl сформована збірка - виріб з технологічними опорами (рис. 5.24).

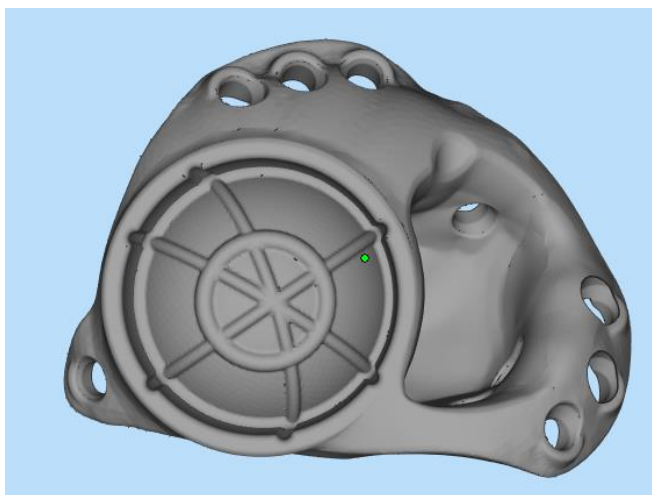


Рисунок 5.22. Цифрова модель імплантата

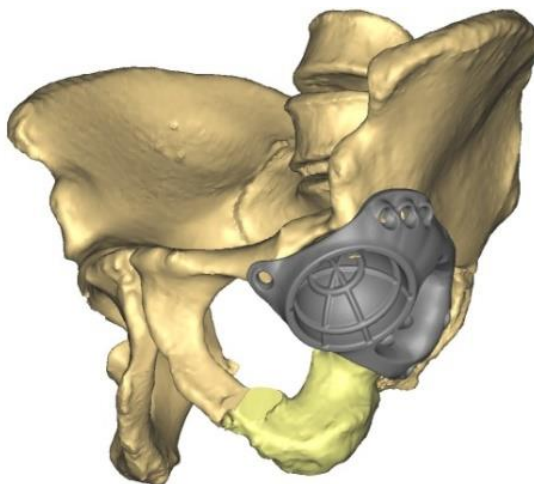


Рисунок 5.23. Модель кульшового органу з імплантатом

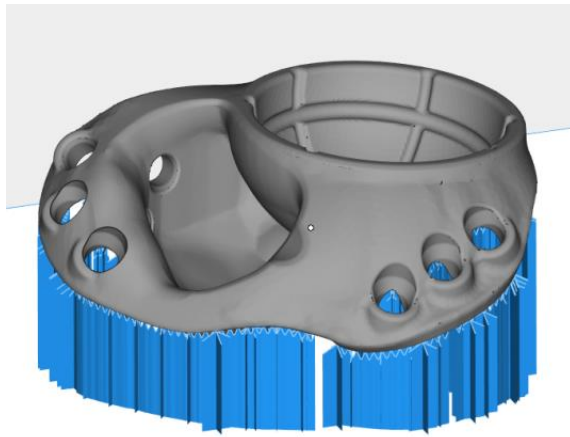


Рисунок 5.24. Модель збірки - імплантат з технологічними опорами
 Досліджено просторове положення деталей збірки, здійснено її пошаровий аналіз. Для досліджень застосовані технологічні параметри друку виробів із порошків титанового сплаву Ti-6Al-4V (табл. 5.7), які визначені в розділі 4.3.4.1.

Таблиця 5.7. Технологічні параметри друку виробів із сплаву Ti-6Al-4V

№	Потужність променя, Вт	Швидкість переміщення, 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

Із застосуванням програми Simufact Additive [75] компанії Hexagon здійснено моделювання процесів друку (рис. 5.25).

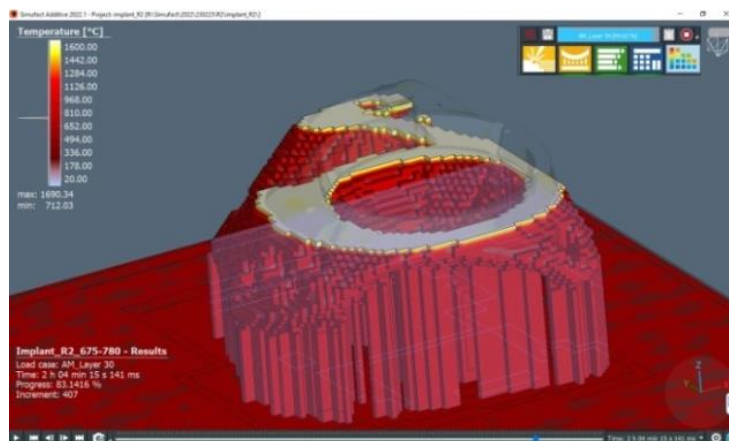
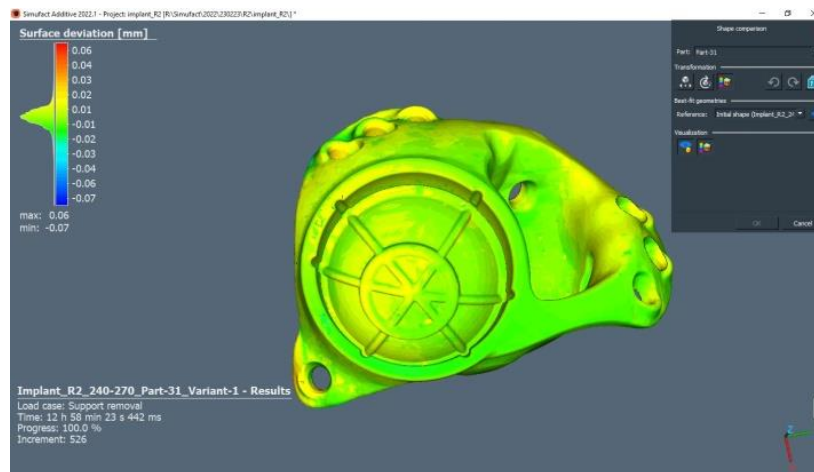
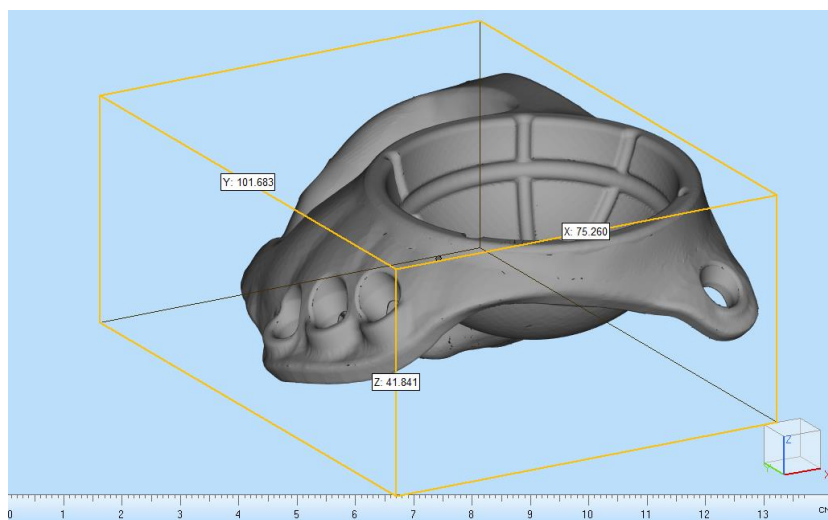


Рисунок 5.25. Симуляція друку імплантату в програмі Simufact Additive



а



б

Рисунок 5.26. Модель виробу з урахуванням компенсації просторової деформації (а) та скоригована модель (б)

Методами комп'ютерного моделювання відповідно до технологічних режимів друку (табл. 5.6) отримані оптимізовані моделі імплантату. Результат моделювання наданий на рисунку 5.26. Для кожного із режимів (табл. 5.7) визначені просторові деформації та відхилення розмірів виробу в процесі друку (рис. 5.26 а). В інтерфейсі програми в графі Surface deviation за кольоровою гамою зазначені розрахункові відхилення розмірів виробу від еталонної (базової) моделі імплантату. Відхилення розмірів не перевищують $\pm 0,03$ мм, що відповідає технічним вимогам до виробу. Файл скорегованої моделі (рис. 5.26 б) експортується в форматі stl та приймається до друку.

5.2.3. Виготовлення індивідуальних імплантів адитивним методом

За моделями, які отримані в розділі 5.2.2, в програмі Magics RP створена збірка виробів (рис. 5.27), яка складається з імпланту кульшового суглобу, щелепно-лицьового імпланту, імплантів біомедичного призначення та контрольного зразка [128].

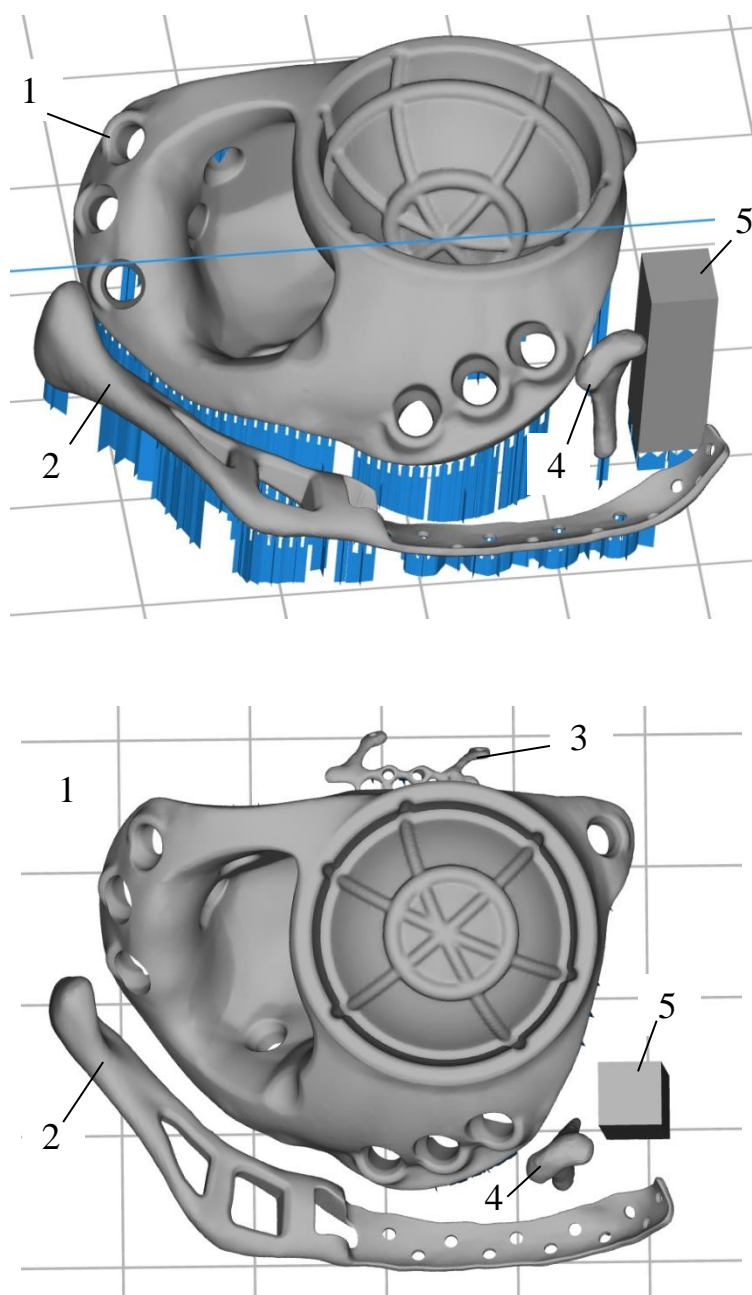


Рисунок 5.27. Модель збірки виробів: 1 - імплантат кульшового суглобу, 2 - щелепно-лицьовий імплантат, 3, 4 - імплантати біомедичного призначення, 5 - контрольний зразок

Для друку виробів задіяли порошок титанового сплаву TA15, який виготовлений методом плазмової плавки та відцентрового розпилення (технологія PREP). Гранули порошку мають правильну сферичну форму розмірами від 45 до 113 мкм. Хімічний склад порошку наведений у таблиці 4.8.

Зразки виробів виготовлені методом пошарового електронно-променевого 3D друку на дослідному устаткуванні, створеному в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона (Україна) [60].

Процес наплавлення відбувався у вакуумній камері електронно-променевого устаткування (рис. 4.6) Прискорююча напруга електронно-променевої гармати становила 60 кВ. Попередній нагрів шару порошку до температури 730 °С здійснювали растровим променем потужністю 1800 Вт із швидкістю сканування 14,6 м/с (задіяна схема растрування з 8 проходів). Робочий тиск у вакуумній камері при наплавленні складав 10^{-2} Па.

Технологічні режими друку виробів (див. табл.5.8) задіяні відповідно до результатів досліджень в розділі 4.5.

Таблиця 5.8. Технологічні режими друку виробів з титанового сплаву TA15

№ з/п	Найменування параметра	Одиниця виміру	Значення
1	Висота шару порошку	мм	0,1
2	Густина енергії променя	Дж/мм ³	40
3	Потужність променя	Вт	400
4	Швидкість переміщення променя	мм/с	500
5	Крок зміщення траєкторії променя	мм	0,2

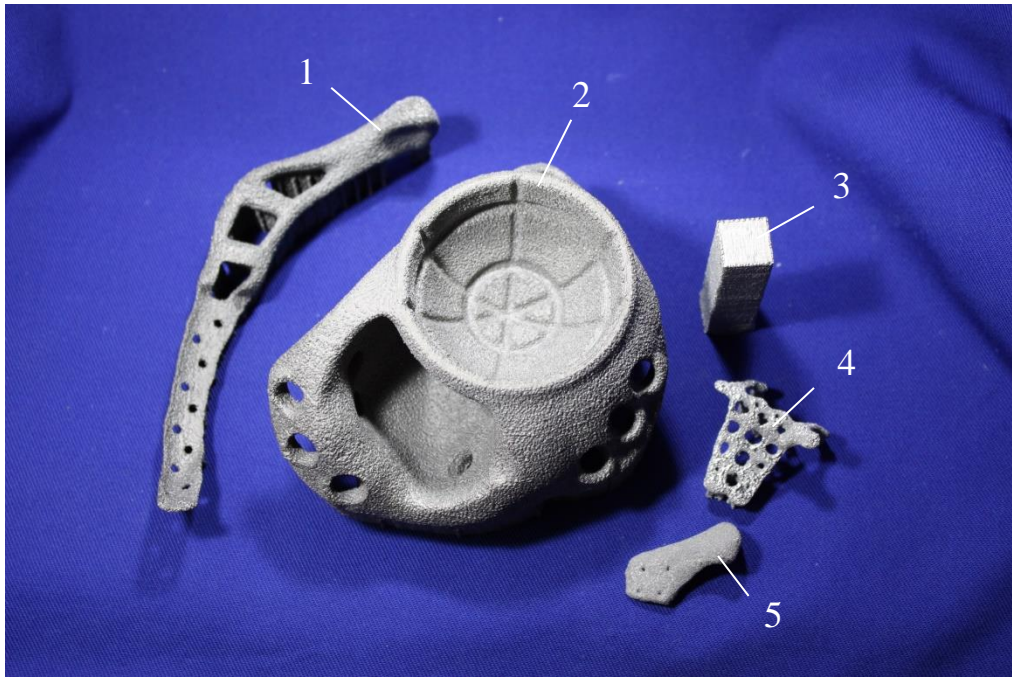


Рисунок 5.28. Вироби медичного призначення: 1 - щелепно-лицьовий імплантат, 2 - імплантат кульшового суглобу, 3 - контрольний зразок, 4, 5 - біомедичні імплантати



Рисунок 5.29. Імплантат кульшового суглобу

Відповідно до заданих технологічних параметрів методом адитивного електронно-променевого наплавлення з титанового сплаву TA15 виготовлені вироби медичного призначення – індивідуальні імплантати (рис. 5.28, рис. 5.29) [128].

Висновки до розділу 5.

1. Розроблені та оптимізовані цифрові моделі лопаток ГТД.
2. Визначені технологічні режими друку лопаток ГТД, створена збірка виробів, з титанового сплаву TA15 надруковано дві лопатки ГТД та чотири дослідні зразки.
3. Проведено випробування дослідного зразку. Визначено, що структура сплаву є тонкопластинчастою та двофазною, складається з α та β фаз титану з розміром голчастих кристалів α' - фази до 1,8 мкм. За структурою та хімічним складом зразок відповідає сплаву TA15. Твердість наплавленого металу від 35,8 до 39,5 HRC. Пористість зразка становить 0,45%. В структурі металу визначено наявність нерегулярних видовжених пор розміром від 50/10 до 230/60 мкм, які розташовані ланцюжком.
4. Здійснено проектування індивідуальних імплантатів за результатами комп'ютерною томографії. Методом комп'ютерного моделювання виконано оптимізацію формоутворення імплантатів.
5. Визначені технологічні режими друку індивідуальних медичних імплантатів, створена збірка виробів, з титанового сплаву TA15 надруковано чотири імплантата та контрольний зразок.

Результати експериментальних досліджень даного розділу наведено в таких публікаціях:

1. 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.
2. 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.
3. 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.

4. Матвійчук В.А. (2024) Компенсація просторової деформації у виробках при адитивному електронно-променевому наплавленні, Автоматичне зварювання, 6, 30-34.

5. 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 pages., p. 7-13, ISBN 978-1-032-85176-1 (Розділ у книзі).

6. 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

7. 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

8. 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.

Загальні висновки.

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

Основні наукові та практичні результати роботи сформулювали наступним чином:

1. Розроблено адитивне електронно-променеве 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 розгорток 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 HDH порошків титанових сплавів BT20, 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 занижений 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. Відносне 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 використаних джерел

1. Radhika C, Ragavanantham Shanmugam, Monsuru Ramoni and Gnanavel BK. A review on additive manufacturing for aerospace application. *Mater. Res. Express* 11 022001 (2024) <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad21ad>
2. Guo, N., Leu, M.C. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Front. Mech. Eng.* 8, 215–243 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8>
3. Mary Kathryn Thompson, Giovanni Moroni, Tom Vaneker, Georges Fadel, R. Ian Campbell, Ian Gibson, Alain Bernard, Joachim Schulz, Patricia Graf, Bhrihu Ahuja, Filomeno Martina. Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints, *CIRP Annals*, Volume 65, Issue 2, 737-760 (2016) <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>
4. ASTM F2792-12a. Standard Terminology For Additive Manufacturing Technologies, <https://webstore.ansi.org/standards/astm/astmf279212a>
5. Boeing 777X's first flight with more than 300 3D printed parts [Електронний ресурс]/ Carlota V. 2020. URL: <https://www.3dnatives.com/en/boeing-777x-300-3d-printed-parts-290120205/> (дата звернення: 08.05.2025). Назва з екрану.
6. Lawrence E. Murr, Sara M. Gaytan, Diana A. Ramirez, Edwin Martinez, Jennifer Hernandez, Krista N. Amato, Patrick W. Shindo, Francisco R. Medina, Ryan B. Wicker, Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies, *Journal of Materials Science & Technology*, Volume 28, Issue 1, 1-14 (2012) [https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(12\)60016-4](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(12)60016-4)
7. Prashanth Konda Gokuldoss, Sri Kolla, Jürgen Eckert. Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting—Selection Guidelines. *Materials* 2017, 10(6), 672; <https://doi.org/10.3390/ma10060672>
8. 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.
<https://doi.org/10.37434/as2022.02.03>

9. Toyserkani, E., Sarker, D., Ibadode, O.O., Liravi, F., Russo, P. and Taherkhani, K. (2021). Directed Energy Deposition (DED). In Metal Additive Manufacturing (eds E. Toyserkani, D. Sarker, O.O. Ibadode, F. Liravi, P. Russo and K. Taherkhani). <https://doi.org/10.1002/9781119210801.ch4>
10. Bhaskar Dutta, Directed Energy Deposition (DED) Technology, Editor(s): Francisca G. Caballero, Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys, Elsevier, 2022, Pages 66-84, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819726-4.00035-1>.
11. Srujana Rao Rao Yarasi, Andrew R. Kitahara, Elizabeth A. Holm, Anthony D. Rollett. Powder Bed Fusion. In book: Springer Handbook of Additive Manufacturing, 2023, pp 389–405, https://doi.org/10.1007/978-3-031-20752-5_24
12. Bandekhoda, M.R., Mosallanejad, M.H., Atapour, M. et al. Investigation on the Potential of Laser and Electron Beam Additively Manufactured Ti–6Al–4V Components for Orthopedic Applications. Met. Mater. Int. 30, 114–126 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12540-023-01496-6>
13. Necati Uçak, Adem Çiçek, Kubilay Aslantas/ Machinability of 3D printed metallic materials fabricated by selective laser melting and electron beam melting: A review, Journal of Manufacturing Processes, Volume 80, 2022, Pages 414-457, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.06.023>
14. Paria Karimi, “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, 2018, p.89 URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1264207/FULLTEXT01.pdf>
15. S. S. Al-Bermani. An investigation into microstructure and microstructural control of additive layer manufactured Ti-6Al-4V by electron beam melting.

Doctoral thesis, University of Sheffield, 2011. URL: <https://theses.whiterose.ac.uk/14694/>

16. N. Hrabe and T. Quinn, Effects of processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy (Ti–6Al–4V) fabricated using electron beam melting (EBM), Part 2: Energy input, orientation, and location, *Mater. Sci. Eng. A*, vol. Complete, no. 573, pp. 271–277, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.02.065>
17. H. E. Helmer, C. Körner, and R. F. Singer, ‘Additive manufacturing of nickel-based superalloy Inconel 718 by selective electron beam melting: Processing window and microstructure’, *J. Mater. Res.*, vol. 29, no. 17, pp. 1987–1996, Sep. 2014. <https://doi.org/10.1557/jmr.2014.192>
18. W. J. Sames, F. Medina, W. H. Peter, S. S. Babu, and R. R. Dehoff, Effect of Process Control and Powder Quality on Inconel 718 Produced Using Electron Beam Melting, in *8th International Symposium on Superalloy 718 and Derivatives*, Wiley-Blackwell, 2014, pp. 409–423. <https://doi.org/10.1002/9781119016854.ch32>
19. T. Scharowsky, V. Juechter, R. F. Singer, and C. Körner, Influence of the Scanning Strategy on the Microstructure and Mechanical Properties in Selective Electron Beam Melting of Ti– 6Al–4V, *Adv. Eng. Mater.*, vol. 17, no. 11, pp. 1573–1578, Nov. 2015. <https://doi.org/10.1002/adem.201400542>
20. Lawrence E. Murr, Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies, *Journal of Materials Sciences and Technology*, 2012, 28(1), 1–14. https://www.jmst.org/EN/abstract/article_20207.shtml
21. Zhang, Y., Wu, L., Guo, X. et al. Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review. *J. of Materi Eng and Perform* 27, 1–13 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11665-017-2747-y>
22. T. DebRoy, H.L. Wei, J.S. Zuback, T. Mukherjee, J.W. Elmer, J.O. Milewski, A.M. Beese, A. Wilson-Heid, A. De, W. Zhang, Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and

- properties, *Progress in Materials Science*, Volume 92, 2018, Pages 112-224, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
23. Shunyu Liu, Yung C. Shin, Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review, *Materials and Design*, Volume 164, 2019, 107552, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.107552>
 24. ASTM F2924-14(2021) Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion
 25. В. Г. Залесский, И. Л. Поболь, А. А. Бакиновский, А. Д. Губко, Получение металлических изделий с применением электронно-лучевых аддитивных технологий, *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 2, pp. 169–180, <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-169-180>
 26. Körner C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting — a review. *International Materials Reviews*. 2016;61(5):361-377. <https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1176289>
 27. Kirchner A, Klöden B, Luft J, Weißgärber T, Kieback B. Process window for electron beam melting of Ti-6Al-4V. *Powder Metallurgy*. 2015;58(4):246-249. <https://doi.org/10.1179/0032589915Z.000000000244>
 28. Swee Leong Sing, Jia An, Wai Yee Yeong, Florencia Edith Wiria, *Laser and electron-beam powder-bed additive manufacturing of metallic implants: A review on processes, materials and designs*, Orthopaedic Research Society. Published by Wiley Periodicals, Inc., 2015, pp. 369-385, <https://doi.org/10.1002/jor.23075>
 29. E. Tiferet, M. Ganor, D. Zolotaryov, A. Garkun, A. Hadjadj, M. Chonin, Y. Ganor, D. Noiman, I. Halevy, O. Tevet and O. Yeheske, Mapping the Tray of Electron Beam Melting of Ti-6Al-4V: Properties and Microstructure, *Materials* 2019, 12, 1470; <https://doi.org/10.3390/ma12091470>
 30. P. Stavropoulos, P. Foteinopoulos, Modelling of additive manufacturing processes: a review and classification Panagiotis Stavropoulos and Panagis

Foteinopoulos Manufacturing Rev., 5 (2018) 2,
<https://doi.org/10.1051/mfreview/2017014>

31. M. Ahlfors, F. Bahbou, U. Ackelid, Optimizing HIP and printing parameters for EBM Ti-6Al-4V, 2018 Quintus Technologies, pp.1-7,
<https://quintustechnologies.com/knowledge-center/optimizing-hip-and-printing-parameters-for-ebm-ti-6al-4v-2/>
32. Ran, J., Jiang, F., Chen, Z. et al. Microstructure and Mechanical Properties of TA15 Alloy Produced by Electron Beam Melting. *Met. Mater. Int.* 28, 770–786 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12540-021-01079-3>
33. Manmeet Kaur, K. Singh, Review on titanium and titanium based alloys as biomaterials for orthopaedic applications, *Materials Science and Engineering: C*, Volume 102, 2019, Pages 844-862,
<https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.04.064>
34. Trevisan F, Calignano F, Aversa A, et al. Additive manufacturing of titanium alloys in the biomedical field: processes, properties and applications. *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials.* 2018;16(2):57-67.
<https://doi.org/10.5301/jabfm.5000371>
35. Ильющенко А.Ф. Аддитивные технологии и порошковая металлургия, Национальная академия наук Беларуси; Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа. – Минск: Медисонт, 2019. – 260 с.: ил.
36. Fu, Z., & Körner, C. (2022). Actual state-of-the-art of electron beam powder bed fusion. *European Journal of Materials*, 2(1), 54–116.
<https://doi.org/10.1080/26889277.2022.2040342>
- 37.V. Juechter, T. Scharowsky, R.F. Singer, C. Körner, Processing window and evaporation phenomena for Ti–6Al–4V produced by selective electron beam melting, *Acta Materialia*, Volume 76, 2014, Pages 252-258,
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.05.037>
38. Wanjara P, Backman D, Sikan F, Gholipour J, Amos R, Patnaik P, Brochu M. Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Additively

- Manufactured by Electron Beam Melting with 3D Part Nesting and Powder Reuse Influences. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2022; 6(1):21. <https://doi.org/10.3390/jmmp6010021>
39. Aliprandi P, Giudice F, Guglielmino E, Sili A. Tensile and Creep Properties Improvement of Ti-6Al-4V Alloy Specimens Produced by Electron Beam Powder Bed Fusion Additive Manufacturing. *Metals*. 2019; 9(11):1207. <https://doi.org/10.3390/met9111207>
40. Scharowsky, T., Bauereiß, A. & Körner, C. Influence of the hatching strategy on consolidation during selective electron beam melting of Ti-6Al-4V. *Int J Adv Manuf Technol* 92, 2809–2818 (2017). <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0375-1>
41. Joshi, S. C., & Sheikh, A. A. (2015). 3D printing in aerospace and its long-term sustainability. *Virtual and Physical Prototyping*, 10(4), 175–185. <https://doi.org/10.1080/17452759.2015.1111519>
- Seifi, M., Gorelik, M., Waller, J. et al. Progress Towards Metal Additive Manufacturing Standardization to Support Qualification and Certification. *JOM* 69, 439–455 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2265-2>
43. Moiduddin K, Mian SH, Umer U, Alkhalefah H. Fabrication and Analysis of a Ti6Al4V Implant for Cranial Restoration. *Applied Sciences*. 2019; 9(12):2513. <https://doi.org/10.3390/app9122513>
44. C.J. Smith, F. Derguti, E. Hernandez Nava, M. Thomas, et al. Dimensional accuracy of Electron Beam Melting (EBM) additive manufacture with regard to weight optimized truss structures, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 229, 2016, Pages 128-138, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.08.028>
45. Hay Wong, Rebecca Garrard, Kate Black, Peter Fox, Chris Sutcliffe, Material characterisation using electronic imaging for Electron Beam Melting process monitoring, *Manufacturing Letters*, Volume 23, 2020, Pages 44-48, <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2019.12.005>

46. Frazier, W.E. Metal Additive Manufacturing: A Review. *J. of Materi Eng and Perform* 23, 1917–1928 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>
47. Herderick E. Additive Manufacturing of Metals: A Review. *Materials Science and Technology (MS&T)* 2011, October 16-20, 2011, Columbus, Ohio, pp. 1413-1425
48. Wysocki B, Maj P, Sitek R, Buhagiar J, Kurzydłowski KJ, Świążkowski W. Laser and Electron Beam Additive Manufacturing Methods of Fabricating Titanium Bone Implants. *Applied Sciences*. 2017; 7(7):657. <https://doi.org/10.3390/app7070657>
49. Gibson, I., Rosen, D. and Stucker, B. (2015) *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. Springer-Verlag, New York, XXI, 498. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
50. Milewski, John O, *Additive Manufacturing of Metals [electronic resource] : From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry*, SpringerLink (Online service) 2017, XXVI, 343 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-58205-4>
51. 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.
52. Назаренко О.К., Матвейчук В.А. (2011) Ограничение перенапряжений в высоковольтных цепях после разрядов в сварочной пушке. *Автоматическая сварка*, 11, 40-43.
53. Назаренко О.К., Матвейчук В.А. (2012) Влияние нарушений аксиальной симметрии сварочной пушки на положение фокусного пятна, *Автоматическая сварка*, 7, 47-51.
54. 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.
55. 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.
56. 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. <https://epluse.ceec.bg/wp-content/uploads/2018/09/20180304-04.pdf>
57. 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. с. 192-221, ISBN 978-966-360-371-1.
58. 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.
59. 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.
60. Матвійчук 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>
61. Нестеренков В.М., Русыник М.О., Берднікова О.М., Матвійчук В.А., Страшко В.Р. (2020) Микроструктура зразків титанового сплаву марки

- Ti6Al4V отриманих методом пошарового електронно-променевого наплавлення дротом, Автоматичне зварювання, 5, 31-36.
62. 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. <https://doi.org/10.37434/as2022.02.03>
 63. 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. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.297773>
 64. 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. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.297773>
 65. 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.
 66. 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.

67. О. К. Назаренко, В. И. Шаповал, Г. А. Лоскутов и др. Наблюдение процесса электроннолучевой сварки и автоматическое слежение за стыком, Автоматическая сварка. 1993, № 5, 35–38.
68. Б. Е. Патон, О. К. Назаренко, В. М. Нестеренков и др. Компьютерное управление процессом электронно-лучевой сварки с многокоординатными перемещениями пушки и изделия, Автоматическая сварка. 2004, № 5, 3–7.
69. Петрик И. А., Овчинников А. В., Селиверстов А. Г. Разработка порошков титановых сплавов для аддитивных технологий применительно к деталям ГТД, Авиационно-космическая техника и технология. 2015. № 8. 11–16.
70. Ольшанецкий В. Е. и др. Уплотняемость порошковых материалов с различной формой частиц. Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. 2015. №1. 130–133.
71. Виробництво порошків з гідрованого губчастого титану [електронний ресурс] Сайт АТ «Інститут титану» URL: <http://timag.org/uk/proposeua/> (дата звернення: 08.05.2025). Назва з екрану.
72. О. М. Івасишин та ін. Поверхневі явища при нагріванні порошку гідриду титану, Фізика і хімія твердого тіла, 2011, Т. 12, № 4, с.900–907.
73. Янко Т.Б., Овчинников А.В. (2018) Титан в аддитивних технологіях. Строительство, материаловедение, машиностроение: Стародубовские чтения, 217–222.
74. 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. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-898-3-145>
75. Simufact Additive [Електронний ресурс]. <https://hexagon.com/products/simufact-additive> (дата звернення: 08.05.2025). Назва з екрану.

76. Derrer J.P. et al. Simufact Engineering provides the GreenTeam & Renishaw with a complete AM Process Simulation Solution. SIMUFACT Case study, URL:https://enteknorate.com/wp-content/uploads/2022/06/hexagon_mi_simufact_casestudy_renishaw_a4_en_sreen.pdf (дата звернення: 10.05.2024).
77. Marc Advanced Nonlinear Simulation Solution [Електронний ресурс]. URL: <https://hexagon.com/products/marc> (дата звернення: 10.05.2024).
78. Wang P, Sin WJ, Nai MLS, Wei J. Effects of Processing Parameters on Surface Roughness of Additive Manufactured Ti-6Al-4V via Electron Beam Melting. *Materials*. 2017; 10(10):1121. <https://doi.org/10.3390/ma10101121>
79. Abdeen, D. H., Palmer, B. R. (2016). Effect of processing parameters of electron beam melting machine on properties of Ti-6Al-4V parts. *Rapid Prototyping Journal*, 22 (3), 609–620. doi: <https://doi.org/10.1108/rpj-09-2014-0105>
80. Safdar, A., He, H. Z., Wei, L., Snis, A., Chavez de Paz, L. E. (2012). Effect of process parameters settings and thickness on surface roughness of EBM produced Ti-6Al-4V. *Rapid Prototyping Journal*, 18 (5), 401–408. doi: <https://doi.org/10.1108/13552541211250391>
81. Medina, F., Baughman, B., Godfrey, D., Menon, N. Optimizing EBM Alloy 718 Material for Aerospace Components. URL: <https://fdocuments.in/document/optimizing-ebm-alloy-718-material-for-aerospace-optimizing-ebm-alloy-718-material.html>
82. Tan, X., Kok, Y., Tan, Y. J., Descoins, M., Mangelinck, D., Tor, S. B. et. al. (2015). Graded microstructure and mechanical properties of additive manufactured Ti-6Al-4V via electron beam melting. *Acta Materialia*, 97, 1–16. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.06.036>
83. Sun, Y. Y., Gulizia, S., Oh, C. H., Fraser, D., Leary, M., Yang, Y. F., Qian, M. (2016). The Influence of As-Built Surface Conditions on Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Additively Manufactured by Selective Electron

- Beam Melting. JOM, 68 (3), 791–798. doi: <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1768-y>
84. Metal powder Ti6Al4V ELI [Электронный ресурс]. URL: <https://en.c-semt.com/ti/> (дата звернення: 10.05.2024).
 85. Wanjara, P., Backman, D., Sikan, F., Gholipour, J., Amos, R., Patnaik, P., Brochu, M. (2022). Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Additively Manufactured by Electron Beam Melting with 3D Part Nesting and Powder Reuse Influences. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 6 (1), 21. <https://doi.org/10.3390/jmmp6010021>
 86. Tan, X., Kok, Y., Tan, Y. J., Descoins, M., Mangelinck, D., Tor, S. B. et al. (2015). Graded microstructure and mechanical properties of additive manufactured Ti-6Al-4V via electron beam melting. Acta Materialia, 97, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.06.036>
 87. Kok, Y., Tan, X., Tor, S. B., Chua, C. K. (2015). Fabrication and microstructural characterisation of additive manufactured Ti-6Al-4V parts by electron beam melting. Virtual and Physical Prototyping, 10 (1), 13–21. <https://doi.org/10.1080/17452759.2015.1008643>
 88. Kok, Y. H., Tan, X. P., Loh, N. H., Tor, S. B., Chua, C. K. (2016). Geometry dependence of microstructure and microhardness for selective electron beam-melted Ti-6Al-4V parts. Virtual and Physical Prototyping, 11 (3), 183–191. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1210483>
 89. Ran, J., Jiang, F., Sun, X., Chen, Z., Tian, C., Zhao, H. (2020). Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Fabricated by Electron Beam Melting. Crystals, 10 (11), 972. <https://doi.org/10.3390/cryst10110972>
 90. Wang, X., Chou, K. (2018). EBSD study of beam speed effects on Ti-6Al-4V alloy by powder bed electron beam additive manufacturing. Journal of Alloys and Compounds, 748, 236–244. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.03.173>
 91. Замков, В. Н. (Ред.) (1986). Металлургия и технология сварки титана и его сплавов. Киев: Наукова думка, 240.

92. Lawrence E. Murr, Sara M. Gaytan, Diana A. Ramirez et al. (2012) Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies. *Journal of Materials Science & Technology*, Volume 28, Issue 1, January, Pages 1-14 [https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(12\)60016-4](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(12)60016-4)
93. Xuhui Lai 1, Guang Yang 1, Yongxin Wang, Zhengying Wei. (2023). Heat and mass transfer in electron beam additive manufacturing. *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 259, 1 December, 108613 <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108613>
94. Yilei Shi, Shuili Gong, Haiying Xu et al. (2023). Electron beam metal additive manufacturing: Defects formation and in-process control. *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 101, 8 September, Pages 386-431 <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.06.013>
95. Xiaoqing Wang, Xibing Gong, Kevin Chou. (2015). Scanning Speed Effect on Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Alloy Processed by Electron Beam Additive Manufacturing, *Procedia Manufacturing*, Volume 1, Pages 287-295 <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.026>
96. Wang, X., Chou, K. (2018). EBSD study of beam speed effects on Ti-6Al-4V alloy by powder bed electron beam additive manufacturing. *Journal of Alloys and Compounds*, 748, 236–244. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.03.173>
97. G.F. Batalha, L.C. Silva, R.S. Coelho. (2024). Mechanical properties characterization of Ti-6Al-4 V grade 5 (recycled) additively manufactured by selective electron beam melting (EB-PBF). *Engineering Failure Analysis* Volume 157, March 2024, 107892 <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107892>
98. Nikolas Hrabe, Timothy Quinn. (2013). Effects of processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy (Ti-6Al-4V) fabricated using electron beam melting (EBM), part 1: Distance from build

- plate and part size. *Materials Science and Engineering: A*, Volume 573, 20 June, Pages 264-270 <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.02.064>
99. Nikolas Hrabec, Timothy Quinn. (2013). Effects of processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy (Ti–6Al–4V) fabricated using electron beam melting (EBM), Part 2: Energy input, orientation, and location. *Materials Science and Engineering: A*, Volume 573, 20 June 2013, Pages 271-277 <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.02.065>
100. José A. Tamayo, Mateo Riascos, Carlos A. Vargas, Libia M. Baena. (2021). Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy via electron beam melting for the development of implants for the biomedical industry. *Heliyon*, Volume 7, Issue 5, May, e06892 <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06892>
101. Akhonin S., Pikulin O., Berezos V., Severyn A., Erokhin O., Kryzhanovskiy V. (2022) Determining the structure and properties of heat resistant titanium alloys VT3-1 and VT9 obtained by electron beam melting, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (12-119), pp. 6–12. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265014>
102. Akhonin S.V., Pikulin, O.M. (2019) Investigation of Effect of Electron Beam Surface Treatment of Titanium Alloy Ingots on Structure and Properties of Melted Metal, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 582(1), 012047. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/582/1/012047>
103. Matviichuk, V., Nesterenkov, V., Berdnikova, O. (2024). Definition of the influence of technological process parameters of electron beam melting on microstructure and microhardness of Ti-6Al-4V alloy. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (12 (127)), 6-12. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.297773>
104. А.А. Иноземцев, В.Л. Сандрацкий (2006) Газотурбинные двигатели. Пермь. ОАО «Авиадвигатель»
105. *Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials* / F.C. Campbell © ISBN-13: 978-1-85-617495-4 / ISBN-10: 1-85-617495-6 / Printed in Great Britain. 2006 Elsevier Ltd. – 600 p.

106. Чи зможе Україна забезпечити себе протезами? [Електронний ресурс]. <https://lifeinwar.com/publications/protezuвання> (дата звернення: 10.05.2025). Назва з екрану.
107. Гур'єв С.О., Кукуруз Я.С., Яловенко В.А., Волна І.М. Аналіз досвіду лікування вогнепальних поранень кінцівок, Екстрена медицина: від науки до практики, 2014, №2, 25-32
108. RadiAnt DICOM Viewer [Електронний ресурс]. <https://www.radiantviewer.com/> (дата звернення: 10.05.2025). Назва з екрану.
109. Materialise Mimics Innovation Suite [Електронний ресурс]. <https://www.materialise.com/en/healthcare/mimics-innovation-suite> (дата звернення: 10.05.2025). Назва з екрану.
110. Antonella Sola, Alireza Nouri (2019) Microstructural porosity in additive manufacturing: The formation and detection of pores in metal parts fabricated by powder bed fusion. Journal of Advanced Manufacturing and Processing, Volume 1, Issue 3, 1-21. <https://doi.org/10.1002/amp2.10021>
111. MSC.Marc Volume A: Theory and User Information [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://simcompanion.hexagon.com/customers/s/article/msc-marc-volume-a--theory-and-user-information-doc9245> (дата звернення: 11.06.2024)
112. Simufact Additive Tutorial [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://simcompanion.hexagon.com/customers/s/article/simufact-additive-documents-doc12479> (дата звернення: 11.06.2024)
113. 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. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.306613>

114. 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
115. 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
116. 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
117. 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
118. 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.
119. 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.
120. 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
121. 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
122. 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
123. 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.
124. Makhnenko O.V., Milenin A.S., Velikoivanenko E.A., Pivtorak N.I. and Kovalchuk D.V. (2017) Modelling of temperature fields and stress-strain state of small 3D sample in its layer-by-layer forming. The Paton Welding Journal, №3, 7-14 <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.03.02>

125. D. K. Sahini, J. Ghose, S. K. Jha, A. Behera, A. Mandal (2020) Optimization and Simulation of Additive Manufacturing Processes: Challenges and Opportunities – A Review. In book: Additive Manufacturing Applications for Metals and Composites (pp.187-209) <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-4054-1.ch010>
126. Матвійчук В.А. (2024) Компенсація просторової деформації у виробках при адитивному електронно-променевому наплавленні, Автоматичне зварювання, 6, 30-34 <https://doi.org/10.37434/as2024.06.05>
127. 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. <https://doi.org/10.1007/s40194-025-01945-3>
128. 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), CRCPress – 226 pages., p. 7-13, ISBN 978-1-032-85176-1 (Розділ у книзі). <http://dx.doi.org/10.1201/9781003518518-2>