

- Schliephake, H., Scharnweber, D., Dard M. et al. (2005). Functionalization of dental implant surfaces using adhesion molecules. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater.*, 73, 88–96.
- Yang, Y., Kim, K.H., & Ong, J.L. (2005). A review on calcium phosphate coatings produced using a sputtering process-an alternative to plasma spraying. *Biomaterials.*, 26, 327–337.
- Lee, K.W., Wang, S., Yaszemski, M.J., Lu L. (2008). Physical properties and cellular responses to crosslinkable poly (propylenefumarate)/hydroxyapatite nanocomposites. *Biomaterials.*, 29, 2839–2848.
- Raghunath J.A., Zhang H., Edirisinghe M.J., et al. (2009). New biodegradable nanocomposite based on polyhedral oligomeric silsesquioxane nanocages: cytocompatibility and investigation into electrohydrodynamic jet fabrication techniques for tissue engineered scaffolds. *Biotechnol Appl Biochem.*, 52, 1–8.
- Williams, D.F., & Meachim, G. (1974). A combined metallurgical and histological study of tissue-prosthesis interactions in orthopedic patients. *Biomed. Mater. Res.*, 8, 1–9.
- Anderson, J.M., Rodriguez, A., & Chang, D.T. (2008). Foreign body reaction to biomaterials. *Semin. Immunol.*, 20, 86–100.
- Nijhuis, A.W.G., Leeuwenburgh, S.C.G., & Jansen, J.A. (2010). Wet-Chemical deposition of functional coatings for bone implantology. *Macromol. Biosci.*, 10, 1316–1329.
- Urban, R.M., Jacobs, J.J., Gilbert, J.L. et al. (1994). Migration of corrosion products from modular hip prostheses. Particle microanalysis and histopathological findings. *Bone and Joint Surg.*, 76, 1345–1359.
- Bartolozzi, A., & Black, J. (1985). Chromium concentrations in serum, blood clot and urine from patients following total hip arthroplasty. *Biomaterials.*, 6, 2–8.
- Paul, G.P. (1999). Strength requirement for internal and external prostheses. *J. Biomechanics.*, 32, 381–393.
- Non-active surgical implants - Joint replacement implants - Particular requirements.* (ISO 21534-2013). (2013).
- ASTM F2792 Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies.*

УДК 621.791.72

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-331-346

М.О. Цисар, І.М. Клочков, С.І. Мотруніч, О.А. Каток, В.А. Матвійчук, кандидати технічних наук¹, **А.М. Бабак**, канд. техн. наук².

¹Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, вул. Казимира Малевича 11, 03680, м. Київ, e-mail: ts_maxim@ukr.net

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», пр. Перемоги 37, 03056, м. Київ, e-mail: sopromat_dpm@ukr.net

ЗАСАДИ АДИТИВНОЇ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАПЧАСТИН З ПОРОШКІВ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ VT20

На даний момент в нашій країні виникла потреба в створенні великої кількості різноманітних і з різною вантажопідйомністю безпілотних літальних апаратів, для чого широко застосовуються методи 3D друку. Зростаючі вимоги до якості елементів конструкції таких приладів, заміна пластиків на більш міцні, але не менш легкі матеріали змушують переглянути традиційні методи виробництва і розробляти нові альтернативні технології. Розглянуто деякі питання, пов'язані із

підвищенням ефективності використання титанової сировини. Наукові дослідження у цій сфері показали, що ефективність такого типу виробництва за витратами матеріалу в 6...8 разів вища від традиційних за рахунок його специфіки. Однак дана технологія занадто молода і потребує суттєвих доопрацювань. Наведені результати експериментальних досліджень свідчать про достатній технічний потенціал українського наукового суспільства для вирішення поставлених задач. Вперше отримано залежність між геометрією та параметрами формування тривимірного виробу електронним променем з порошку VT20. Експериментально підтверджено можливість використання даного методу для виробництва суцільних монолітних конструкцій складної форми з титану та його сплавів. Виконаний аналіз дозволив суттєво звузити діапазон параметрів друку та ввести корегування за макро- та мікро-геометричними характеристиками дослідних зразків.

Ключові слова: адитивні технології, 3D друк, електронний промінь, порошок титану, шорсткість, геометричні розміри, усадка.

Вступ

Обробка металів та виробництво з них прикрас, знарядь праці та зброї відомі людству тисячоліттями. Ковка та фігурне лиття використовуються на всіх нам відомих континентах з 3200 року до н.е. [1, 2]. Металеві вироби після надання первинної форми доводили до необхідного вигляду механічною обробкою з використанням абразивних матеріалів. Цього було достатньо для того рівня технологічного розвитку суспільства. Механізація будь-якої сфери життя була мінімальна. З металів виготовляли лише найбільш відповідальні частини механізмів, які майже повністю виготовлялись з деревини [2].

Якісний прорив почався із появою парового двигуна та двигуна зовнішнього згоряння на початку XVII сторіччя [3], де всі елементи конструкції, внаслідок специфіки умов експлуатації, неможливо було виготовити з інших матеріалів. Саме це стало поштовхом до масового серійного виробництва металевих конструкцій. Відповідно, питання якості металів в них постало дуже гостро через те, що такого типу виробництва вже орієнтуються на мінімізацію людської праці. Недивно, що паралельно з розвитком виробництва металокопункції розвивається наука металознавство, перші згадки про котру – це теж XVII сторіччя [2]. Металознавство дає перші якісні та кількісні критерії оцінки металевих виробів, що не залежать від експериментатора. Вводяться кореляційні залежності між параметрами технологічного процесу: температура плавлення, швидкість остигання тощо, та якістю готової продукції [2, 3]. Триста років розвитку, нові технологічні уклади невідворотно призвели до виникнення нових категорій у виробництві, а саме: «субтрактивне виробництво» та «адитивне виробництво» [4]. Відповідно, для всього нового потрібні власні критерії оцінки якості, непридатні для класичного підходу.

Лиття, поковка, прокат з наступними операціями механічної обробки: різка, точіння, фрезерування та ін. на даний момент залишаються найрозповсюдженішими методами виробництва металевих виробів. Принцип так званого «субтрактивного виробництва» полягає в формуванні зовнішнього вигляду готового виробу за рахунок зрізання зайвого матеріалу [5]. Головними перевагами такого типу виробництва є: надійність, широка дослідна база, великий спектр оброблюваних матеріалів. Але є і ряд недоліків: коефіцієнт корисного використання металу іноді дорівнює лише 10...15% [6], потреба в кваліфікованому труді, необхідність широкого спектру інструментів та додаткового обладнання, що відповідно призводить до високої собівартості. Найбільш актуальною дана проблема є в авіації та космонавтиці. Зменшення виробничих витрат зводиться до нових методів автоматизації за рахунок використання станків з чисельно-програмним керуванням [6].

Паралельно з цим останні сто років активно розвиваються також методи порошкової металургії [1]. Виникнення цих методів пов'язано саме із зменшенням собівартості готових виробів за рахунок часткового або повного усунення етапів механічної обробки. До них можна віднести: холодне та гаряче пресування, шлікерне лиття та інжекційне формування [1]. Ці методи вже мають у власному арсеналі ряд розрахункових методик з моделювання при проектуванні виробів, достатньо широку дослідну базу, досвід при роботі з широким спектром тугоплавких матеріалів та їх сполук; фактично весь сучасний спектр виробів з так званої технічної кераміки чи керамічно-металевих композитів технічного призначення виготовляється саме цими методами [7]. Проте є і ряд недоліків, наприклад: потреба в складних дорогих формах, проблеми при виробництві з хімічно активних металів (Ti, Ni, Al, Mo). Якщо шляхи вирішення першої проблеми шукають в масовості виробництва – чим більша серія, тим менше вартість форми впливає на вартість готового виробу [7], – то вирішення останньої сховано в хімії взаємодії елементів в твердому розчині в процесі спікання [8].

В окрему сферу порошкової металургії в останні 30 років відокремилось «адитивне виробництво» – 3D друк. Згідно стандарту *ASTM F2792-12A*, «адитивне виробництво» являє собою пошарове створення виробу згідно цифрової тривимірної моделі [9]. Ця технологія дуже молода. Цей напрямок почали впроваджувати з пластику, однак вже у 2010-х з'явилися перші принтери для друку металевих виробів [10]. І тут слід зауважити, що 3D друк є двох типів: перший, що друкує заготовки, котрі потребують потім остаточного спікання [11], та другий, де порошки металів або їх твердих розчинів спікаються в інертному або вакуумному середовищі лазерним або електронним променем [12]. Перший тип має всі переваги інжекційного формування без недоліку складної ливарної форми, що з технологічної точки зору суттєво спрощує всі наступні етапи: відгонка зв'язуючого, витримка, спікання, оскільки вони вже відпрацьовані в порошковій металургії. Другий тип є принципово окремою ланкою, перевагою якої є суттєве скорочення часу виробництва. Весь виробничий цикл складається лише з декількох етапів друку, піскоструминна обробка та механічна обробка проводяться за потреби. Підготовка порошків є задачею, яку вирішують на окремому виробництві. Але він дуже молодий: офіційно перший промисловий 3D принтер на променевої основі було створено на основі розробок Чарльза Хала *3D Systems* в січні 2015 року [11], з вересня 2016 до них приєднались *General Electric* із своїм *Concept Laser M2* [10]. В базовій комплектації вони розраховані на повнофункціональний друк порошками на основі титану медичного та авіаційного призначення: VT6, VT9, VT20 [12-13]. Однак питання оптимізації технологічних параметрів друку ще тривалий час буде залишатись актуальним навіть для цих сплавів.

Матеріали та методи

Для здійснення 3D друку методом адитивної електронно-променевої технології необхідний відповідний матеріал – порошок. Виробництво такого порошку є багатостадійним і складається з: виготовлення вихідного сплаву, виготовлення порошку, сепарації та сертифікації [6]. До порошків для адитивного друку згідно *ASTM F2792* [9] висувають особливі вимоги, однією з котрих є сферична форма часток, що сприяє максимально компактному укладанню шару та полегшує процес спікання електронним чи лазерним променем. Крім хімічного та фракційного складу, додатково визначають густину, насипну щільність, сипучість, наявність сателітів та вільну поверхню [13].

Виготовлення металевих нанопорошків сферичної форми за допомогою диспергування розплаву називається атомізацією [14]. Цей процес здійснюється в спеціальних ректорах – атомайзерах. Порошки із групи титановмісних через високу хімічну активність титану виробляються методом вакуумної атомізації [14]. Особливість цього методу полягає в

мінімальній кількості газових включень в кінцевому продукті. Сепарація відбувається одразу в камері атомізації, що спроектована по принципу пиловловлювача циклонного типу [15]. В даній публікації ми розглядаємо друк на основі порошку VT20, зображення часток порошку наведено на рис. 1, а.

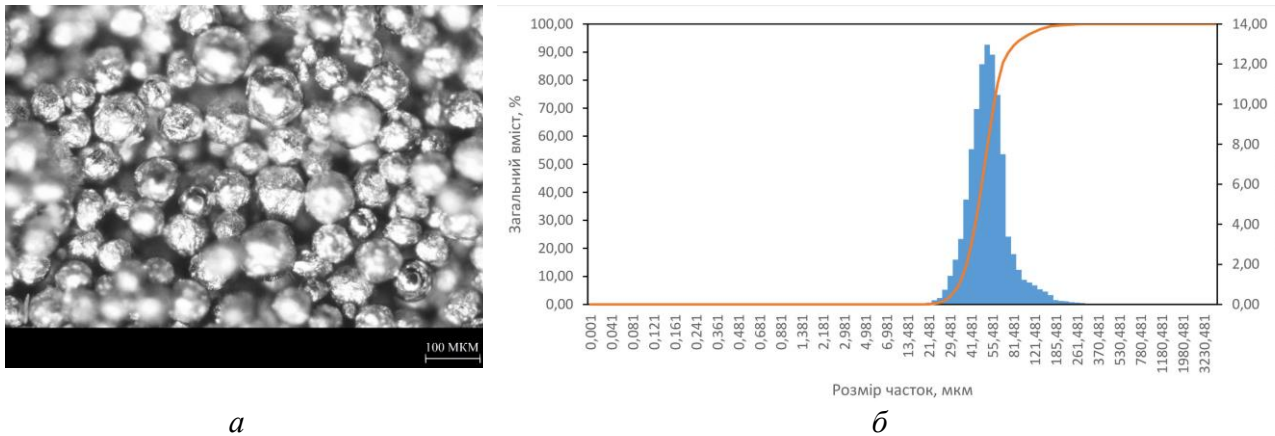


Рис. 1. Порошок ТВ20 для адитивного електронно-променевого друку: а) зображення розсіву по поверхні, б) розподіл часток за фракціями

Як можна побачити, вони мають ідеальну сферичну форму з гладкою поверхнею. Розмір часток визначався оптичним методом за допомогою: цифрової камери Sony E3CMOS20000KPB 20 MP та оптичного тринокулярного металургічного мікроскопу ME300TZB із максимальною роздільною здатністю до 1200 крат; він варіюється від 12 до 80 мкм, розподіл часток за розміром для порошку VT20 наведено на рис. 1, б.

Хімічний склад порошку визначається одразу після процесу атомізації безпосередньо фірмою-виробником. В паспорті зазначається середній розмір гранули для відібраної проби та хімічний склад, що наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Хімічний склад вихідного порошку VT20

Fe	C	Si	Mo	V	N	Ti	Al	Zr	O	H	Дом.
0,25	0,1	0,15	2	2,5	0,05	85,15	7	2,5	0,15	0,015	0,3

Проектування технологічної документації для готового виробу, що отримується методами 3D друку, має як схожі виробничі процеси, так і особливості, характерні виключно для нього. Цей спосіб відрізняється від традиційних виробничих процесів, таких як лиття під тиском та обробка з ЧПУ, оскільки в них використовують ріжучий інструмент для отримання виробів заданої форми з суцільного блоку [16]. Сам 3D друк, однак, не вимагає жодних різальних інструментів; об'єкти виготовляються безпосередньо на вбудованій в пристрій платформі. Враховуючи вже існуючий досвід, бажаним буде результат з найвищим показником ефективності друку, в якому враховуються витрати матеріалу, швидкість виробничого циклу, мінімізація додаткових виробничих витрат при відповідній максимально можливій якості готового виробу. Всі сучасні методи 3D друку є похідними від друку пластиком з усіма відповідними недоліками та перевагами [17].

Побудова робочої 3D моделі, проекту або об'єкту є першою сходинкою [16]. Такий тривимірний об'єкт можна створити в досить великій кількості програм як інженерного

призначення – це як *AutoCAD*, *SolidWorks* тощо, так і специфічні тривимірні редактори на зразок *Autodesk 3Ds Max*, безкоштовні програми типу *Blender*, програми тривимірної візуалізації, що йдуть в комплекті з принтерами. Головна вимога до таких об'єктів – відповідність геометрії з поправками на механічну обробку.

Одразу відправити на друк таку модель принципово неможливо. Машина не сприймає візуальні образи. Для роботи 3D-принтеру потрібен G-код, що представляє собою згенерований набір команд для керування ЧПУ [18]. Перетворення 3D моделі в G-код здійснюється за допомогою так званих програм Слайсерів. Слайсери – це програмне забезпечення, що є проміжним інструментом, який перетворює 3D модель на серію 2D шарів, адаптованих під конкретне обладнання та метод друку. Саме при роботі в цьому програмному середовищі пропонуються до використання додаткові службові елементи [], що будуть в подальшому суттєво впливати на якість друківаних виробів особливо складної форми.

Що собою представляють найрозповсюдженіші додаткові службові елементи, а саме: кайма, підтримки, кожух? Кайма – тонкий шар матеріалу, що створюється навколо виробу; призначення цього елемента в забезпеченні більш надійної фіксації на робочій платформі та зменшенні викривлення форми внаслідок усадки матеріалу. Підтримки є каркасними елементами, що будуються під нависаючими частинами виробу і слугують для їх підтримки, виготовляються з того самого матеріалу, їх відсутність може призвести не лише до зміни геометрії готового виробу, а і до часткового його руйнування. Можуть бути стовпчастими та сітчастими з різними типами комірки. Кожух – це захисний бар'єр, що використовується для запобігання різких змін температур, за рахунок чого відбувається розтріскування зовнішніх стінок. Кожен службовий елемент друкується в своєму окремому діапазоні параметрів друку, котрі можуть зовсім не співпадати із параметрами для самого готового виробу. Після закінчення такі службові елементи повинні легко видалятися механічно, що необхідно враховувати при генеруванні G-коду.

Друк здійснювали на малогабаритному пристрої для електронно-променевого зварювання типу СВ-212М з імпульсним джерелом живлення 60кВт, електронно-променевою гарматою ЕПА-60 та пакетом програмного забезпечення ЕПС. Обладнання та програмне забезпечення розроблено в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона. Принципову схему для адитивного електронно-променевого друку наведено на рис. 2.

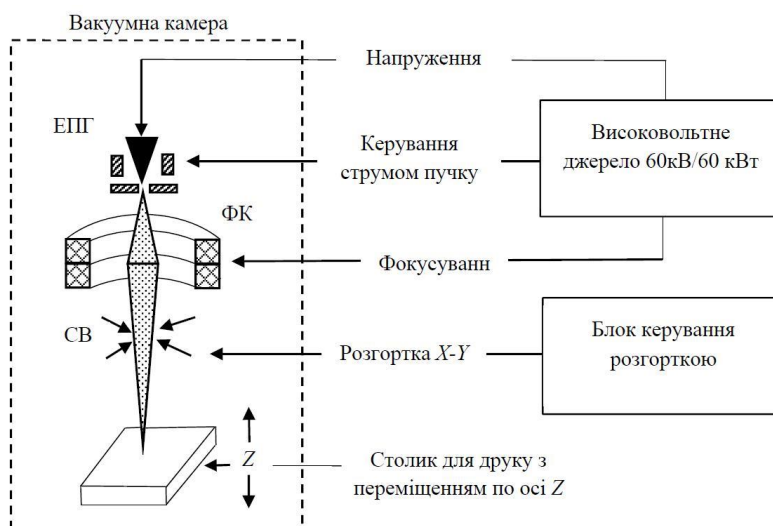


Рис. 2. Блок-схема обладнання для адитивної електронно-променевої плавки: ЕПГ – електронно-променева гармата; ФК – фокуруюча котушка, СВ – система для відхилення ЕП

Пучок електронів, необхідний для нагрівання поверхні з нанесеним металевим порошком, формується в електронно-променевої гарматі (ЕПГ), яка живиться від високовольтного джерела. Керує джерелом промисловий комп'ютер. До складу джерела входять системи керування фокусуванням та струмом пучка; для формування зони плавлення використаний генератор, що створює сигнали керування розгорткою. У блоці управління розгорткою ці сигнали посилюються і надходять на котушки ЕПГ, що відхиляють. Пучок електронів відхиляється осями X і Y і створює зону плавлення заданої форми. Процес виконується за програмою відповідно до технологічних режимів. Об'єктами управління є струм пучка, струм фокусування, відхилення пучка по осях X та Y .

Дослідні зразки представляють собою призми $25 \times 25 \times 8$ мм і являють собою багат шарову складну конструкцію. Оскільки в подальшому дану технологію планують використовувати для друку лопаток турбін, дослідні зразки одразу друкували із службовими елементами, а саме: каймою, підтримками і кожухом. Принципіальна тривимірна модель та зображення дослідного зразка наведені на рис. 3.

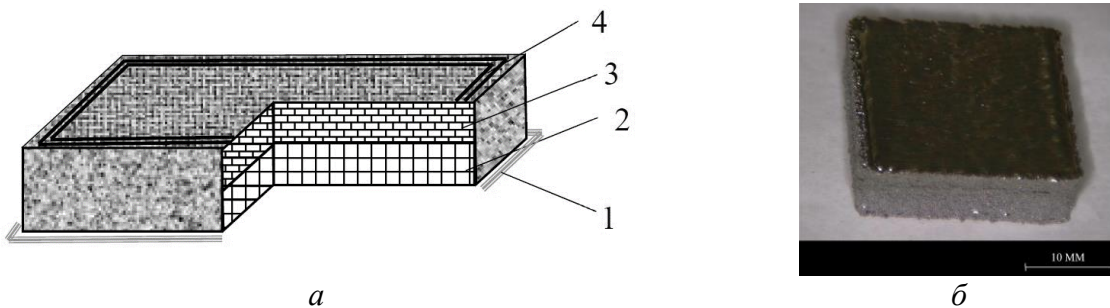


Рис. 3. Дослідний зразок, надрукований методом адитивної електронно-променевої плавки: а) тривимірна модель (1 – кайма, 2 – підтримка, 3 – основний метал, 4 – кожух); б) фото дослідного зразка

Режими друку для кожного окремого зразка наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Режими друку дослідних зразків

№	Висота шару, мм	Зміщення, мм	Енергія, Дж/мм ³	Потужність, Вт	Швидкість, мм/с
1	2	3	4	5	6
1	0,1	0,25	40	500	500
2	0,1	0,2	60	600	500
3	0,1	0,2	20	200	500
4	0,1	0,15	60	400	500
5	0,1	0,1	40	200	500
6	0,1	0,25	30	375	500
7	0,1	0,2	70	700	500
8	0,1	0,2	30	300	500
9	0,1	0,15	50	375	500
10	0,1	0,1	50	250	500
11	0,1	0,25	20	250	500
12	0,1	0,25	70	875	500

Закінчення табл. 2

1	2	3	4	5	6
13	0,1	0,2	40	400	500
14	0,1	0,15	40	300	500
15	0,1	0,1	60	300	500
16	0,1	0,25	50	625	500
17	0,1	0,2	50	500	500
18	0,1	0,15	20	150	500
19	0,1	0,15	70	525	500
20	0,1	0,1	30	150	500
21	0,1	0,25	60	750	500
22	0,1	0,2	45	450	500
23	0,1	0,15	30	225	500
24	0,1	0,1	70	350	500
25	0,1	0,1	20	100	500

На жаль, на даний момент нормативна база для даних методів виробництва лише формується. Міжнародні стандарти, що регламентують норми роботи на приладах для 3D-друку *ISO/ASTM-52900-2015* [19], норми оцінки якості такого друку *ISO/ASTM-52587-2017* [20] з'явилися лише у кінці 2017 року і носять скоріше рекомендаційний характер. Оцінка якості друкованих виробів здійснюється неруйнівними та руйнівними методами контролю [20]. До неруйнівних відносять: візуальний, вимірювання відповідності геометричній формі, ультразвуковий та інші згідно розробленої конструкторської документації. Руйнівні, відповідно – це методи визначення механічних властивостей, корозійної стійкості тощо у відповідності до умов експлуатації, зазначених у технічній документації. Особливістю механічних випробувань в цьому випадку буде необхідність дослідження анізотропії в залежності від напрямку друку. Дослідні зразки на розтяг та триточковий згин згідно *ISO/ASTM-52941-2020*, *ISO/ASTM-52950-2022* необхідно вирізати в напрямку друку та поперек йому [21, 22], що зазначено на схемі (рис. 4).

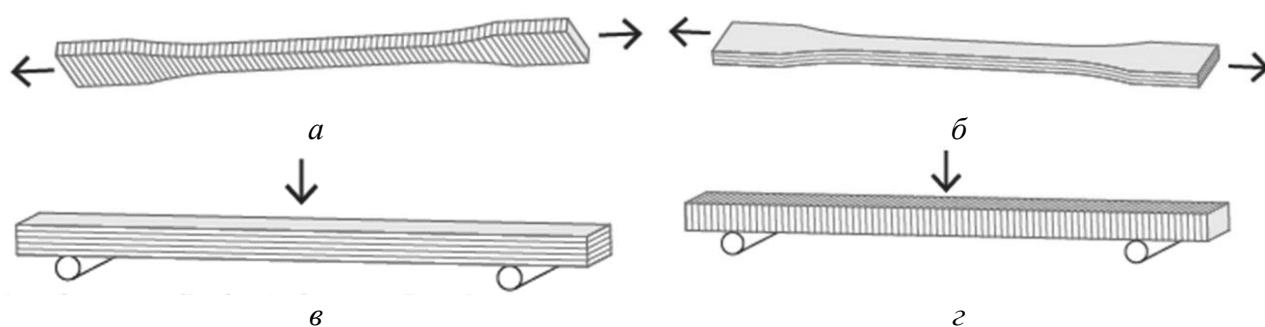


Рис. 4. Схематично зображені зразки для випробувань: а, б розтяг; в, г триточковий згин

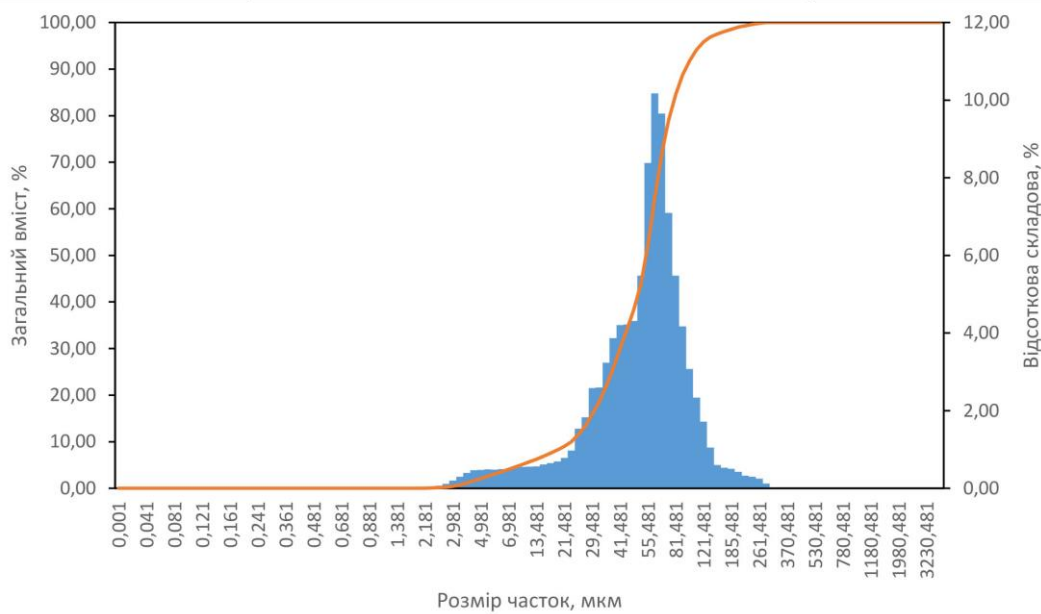
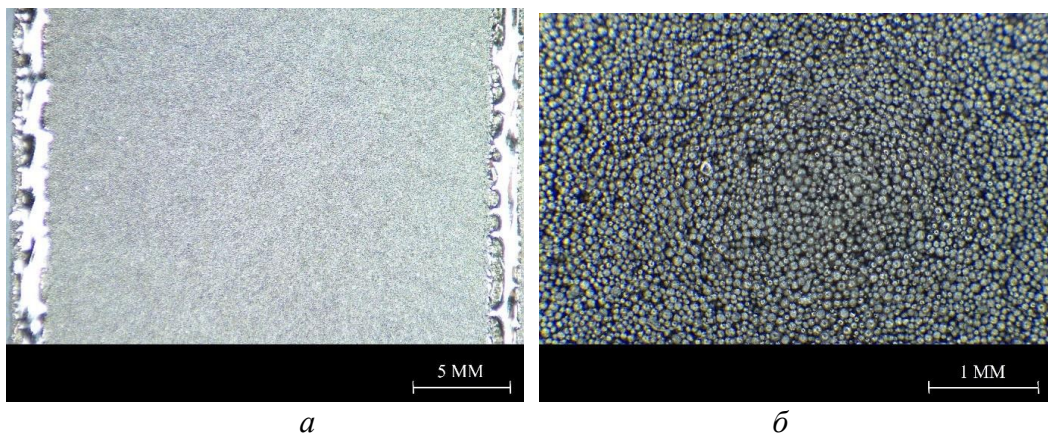
В даній статті ми обмежимося неруйнівними методами контролю з деякими уточненнями та додатковими вимірюваннями, не зазначеними в стандарті. Так, окрім аналізу візуального, додатково було використано статистичні методи обробки зображень поверхні надрукованих зразків. Зображення були отримані за допомогою оптичного мікроскопу МБС-

10, оснащеного цифровою камерою *SONY* модель *E3CMOS200000KPB* роздільною здатністю 20 Мп. Для контролю якості поверхні було використано цифровий профілометр *JD520* від фірми *JITAIKEYI*. Відповідність геометричній формі досліджувалась за допомогою цифрового індикатору годинникового типу модель *ETOPD-12* мікрометр класу *RS232* з точністю вимірювання 0,001 мм та похибкою 0,001 мм. За заданими параметрами друкованої моделі визначалась відносна усадка для надрукованих дослідних зразків.

Результати досліджень

Як вже зазначалось вище, дослідження якості 3D друку за адитивною електронно-променевою технологією проводились на 25 зразках, отриманих при різних параметрах. Первинний огляд поверхонь дозволив розділити зразки на чотири групи: непроплавлені, з мозаїчною будовою, з лініями в напрямку друку та ділянками неплавленого порошку, з лініями в напрямку друку без візуально помітних дефектів.

До непроплавлених віднесено зразок 25, поверхня котрого із різними збільшеннями представлена на рис. 5 а, б.



б

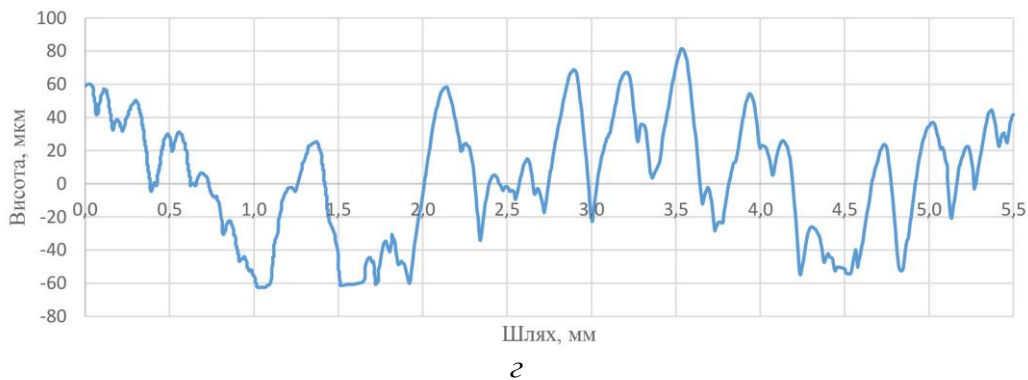


Рис. 5. Зразок 25: а, б – зображення поверхні; в – гранулометричний розподіл часток на поверхні, г – профілограма поверхні

Аналіз поверхневого шару показав, що він складається лише з гранул вихідного порошку без наявних агломератів та частково сплавлених часток, розподіл за гранулометричним складом наведено на рис. 5 в. Також було знято профілограму (рис. 5 г) з поверхні та проаналізовано шорсткість; значення параметрів шорсткості наведено в табл. 3. Цей зразок може слугувати як базовий з мінімальною усадкою друкованого матеріалу.

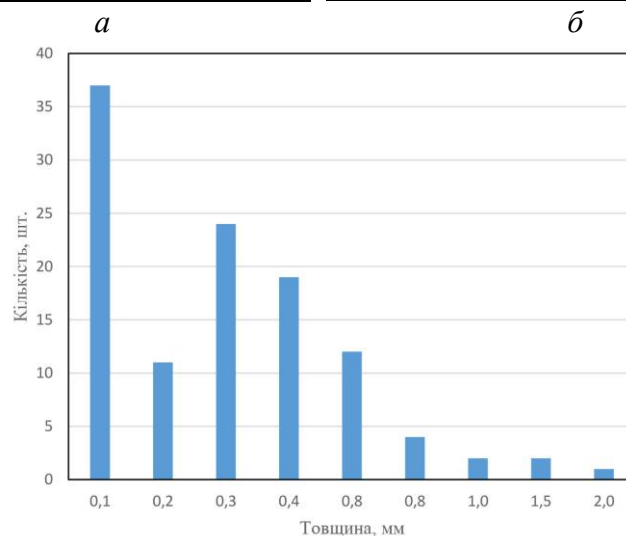
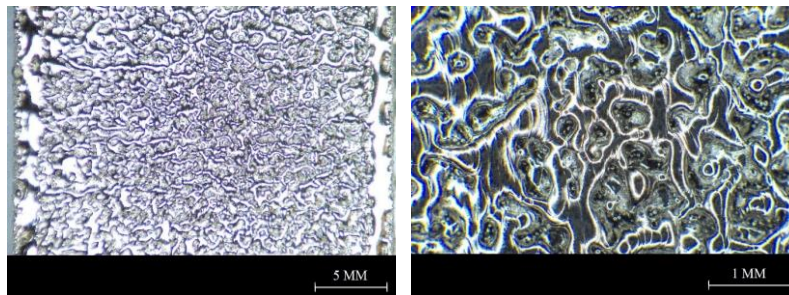
Таблиця 3. Зміна геометричних розмірів зразка на мікро- та макрорівні

№	R_a , мкм	R_z , мкм	R_t , мкм	$h_{зад}$, мм	$h_{вим}$, мм	Усадка, %
1	2	3	4	5	6	7
1	7,407	31,198	41,870	8,000	7,491	6,36
2	9,512	42,577	65,210	8,000	7,601	4,99
3	30,978	164,808	194,403	8,000	7,604	4,95
4	10,558	50,357	70,113	8,000	7,497	6,29
5	29,243	137,414	187,284	8,000	7,555	5,56
6	10,776	46,554	66,200	8,000	7,618	4,78
7	17,058	87,449	112,738	8,000	7,982	0,22
8	24,928	86,883	118,632	8,000	7,671	4,11
9	10,327	44,259	61,155	8,000	7,542	5,73
10	34,307	181,044	238,384	8,000	7,656	4,30
11	32,599	176,627	237,075	8,000	7,778	2,78
12	16,034	74,310	93,500	8,000	8,643	8,04
13	7,539	37,218	46,114	8,000	7,723	3,46
14	13,365	56,738	77,045	8,000	7,607	4,91
15	14,345	49,791	70,585	8,000	7,595	5,06
16	8,979	39,072	52,196	8,000	7,673	4,09
17	10,001	49,713	59,269	8,000	7,799	2,51

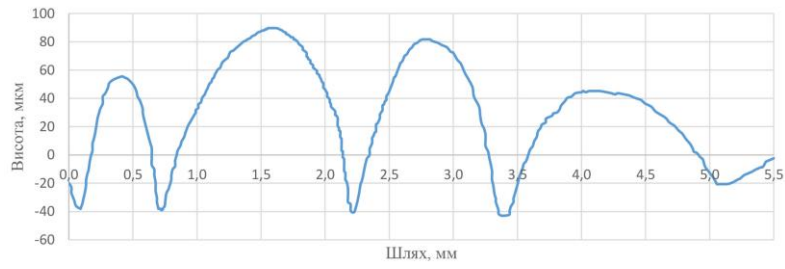
Закінчення табл. 3

1	2	3	4	5	6	7
18	22,900	131,881	163,048	8,000	7,809	2,39
19	11,414	53,978	76,715	8,000	7,701	3,74
20	30,029	139,142	172,101	8,000	7,715	3,56
21	16,531	78,978	102,648	8,000	7,728	3,40
22	15,228	59,976	95,151	8,000	7,647	4,41
23	38,313	191,511	229,154	8,000	7,678	4,03
24	12,216	53,878	65,587	8,000	7,455	6,81
25	20,337	119,496	136,361	8,000	7,599	5,01

Зразки з мозаїчною будовою – це 3, 5, 11, 18, 20, 23. Поверхня зразку номер 5 із різним збільшенням представлена на рис. 6 а, б. Аналіз мозаїчної будови проводився за товщиною ліній сплавленого матеріалу; гістограму такого розподілу для зразка 5 наведено на рис. 6 в. Для кожного зразка отримано профілограми, профілограма зразка 5 наведена на рис. 6 г. Значення параметрів шорсткості наведено в табл. 3. З точки зору якості друку такі зразки вже можна вважати такими, що не пройшли контроль, оскільки сплавлення шарів відбувається нерівномірно; відповідно, окрім поверхневих, можуть бути внутрішні дефекти у вигляді порожнин.



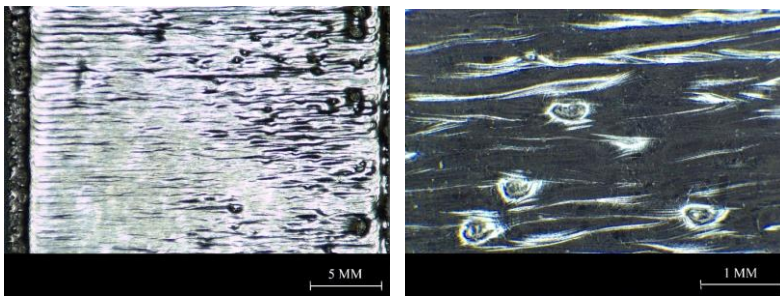
в



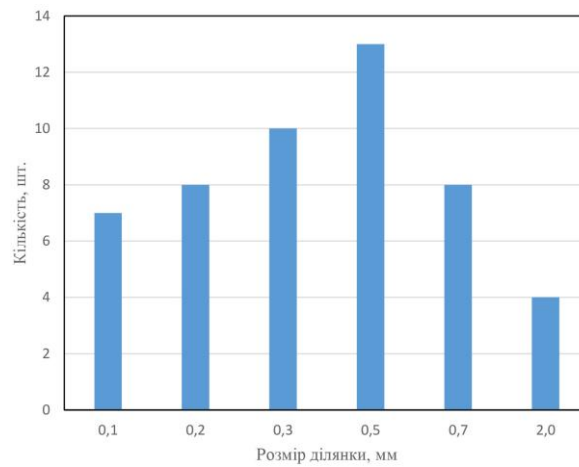
г

Рис. 6. Зразок 5: а, б – зображення поверхні, в – гістограма розподілу товщини ліній сплавленого металу, г – профілограма поверхні

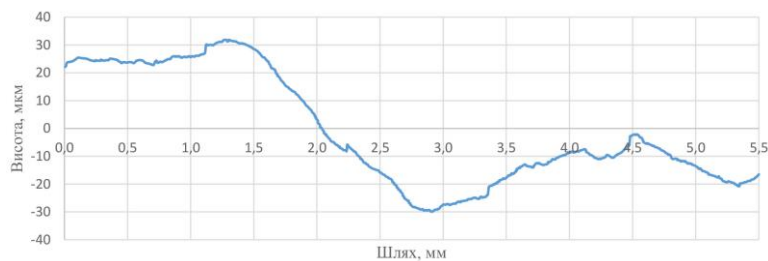
Зразки, що мають на поверхні непроплавлені ділянки – це 1, 6, 8, 10. Поверхню зразка 1, що має відповідні артефакти, представлено на рис. 7, а.



а



б



г

Рис. 7. Зразок 1: а, б – зображення поверхні, в – розподіл за розміром непроплавлених ділянок, г – профілограма поверхні

Слід зазначити, що в цих ділянках спостерігаються нерозплавлені частки порошку, що характерно видно на рис. 7 б. Розподіл за розміром непроплавлених ділянок представлено на гістограмі рис. 7 в. Профілограми, що отримано на поверхнях зразків, свідчать про збільшення шорсткості. Профілограма для зразку 1 наведена на рис. 7 г. Значення параметрів шорсткості наведені в табл. 3. Наявність таких артефактів свідчить про недостатню потужність електронного променя. Відповідний аналіз змін їх розмірів, зон розташування дозволить в подальшому скоригувати відповідні параметри для визначення пограничних значень з мінімальними витратами електроенергії і максимальною ефективністю.

Зразки, що не мають артефактів на поверхні – 2, 4, 5, 7, 9, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 21, 22. В якості прикладу наведемо поверхню зразка номер 7, що із різними збільшеннями представлено на рис. 8 а, б. Як і у випадку зразків, що мають мозаїчну будову поверхні, проводився аналіз товщин ліній сплавлення та побудовано відповідні гістограми, гістограма для зразку 7 наведена на рис. 8 в. За отриманими профілограмами було визначено відповідні параметри шорсткості, вони наведені в таблиці 3. Відповідна профілограма для зразку 7 наведена на рис. 8 г.

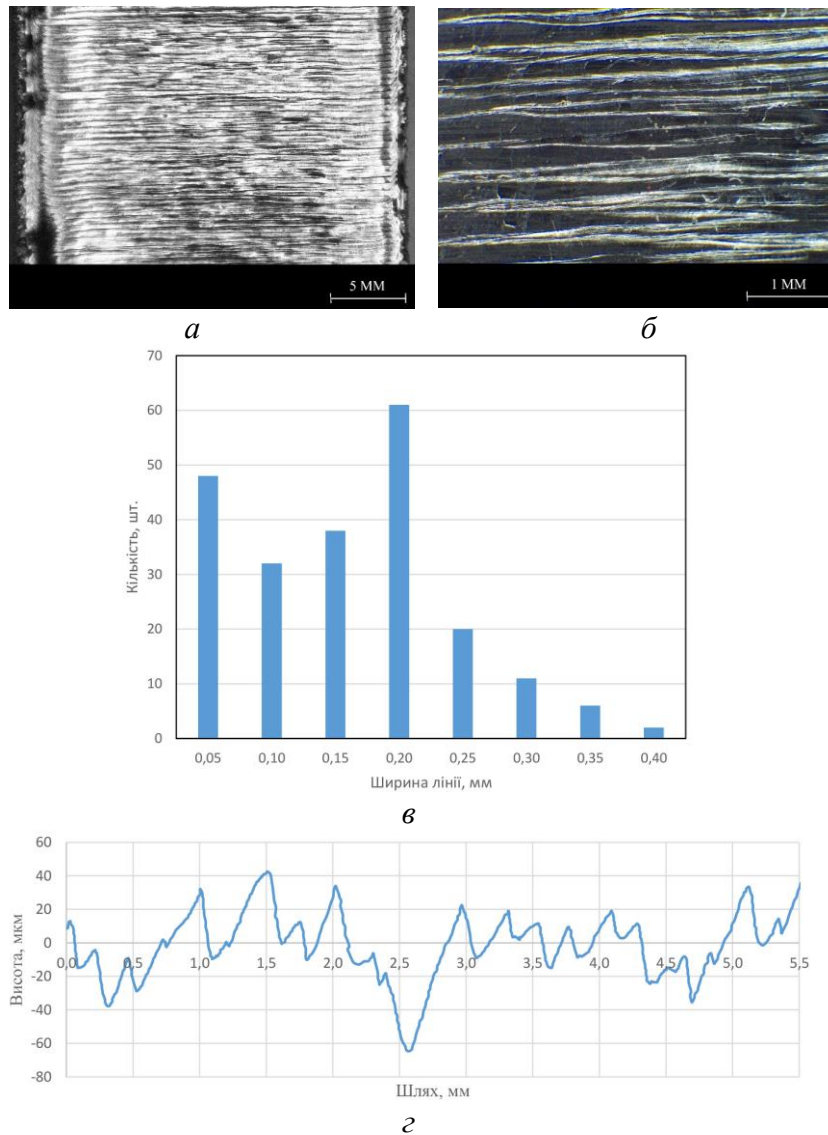


Рис. 8. Зразок 7: а, б – зображення поверхні, в – гістограма розподілу товщини ліній сплавленого металу, г – профілограма поверхні

Відповідність загальної висоти виробу визначалась згідно заданої схеми вимірювання, наведеної на рис. 9 а, для кожного надрукованого зразку.

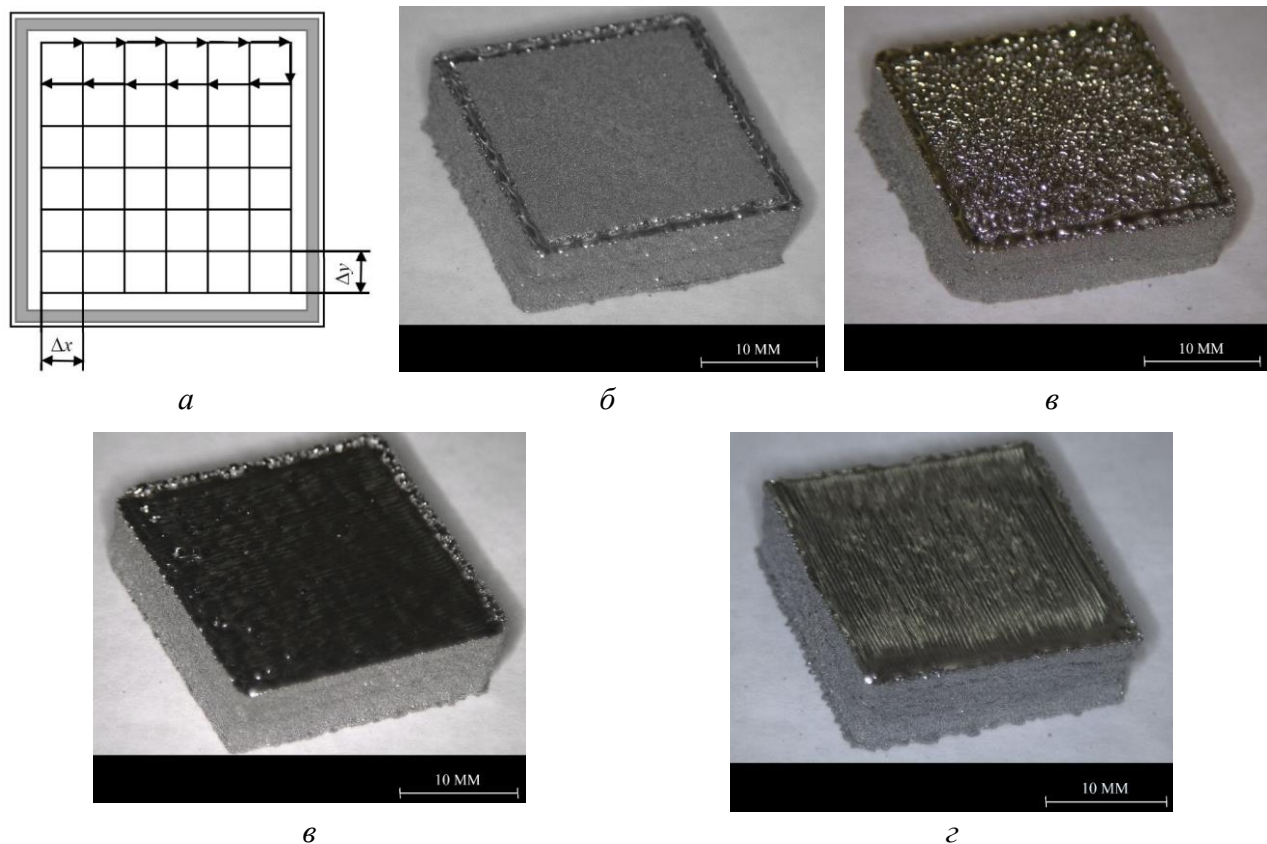


Рис. 9. Тривимірні поверхні зміни висоти профілю досліджуваних зразків: а – схема вимірювання; б – зразок 25; в – зразок 5; г – зразок 1; д – зразок 7

Для врахування складної геометрії поверхні окремих зразків в групі, а також підвищення точності обчислень було прийнято провести вимірювання у 36 точках із кроком між точками 3 мм. Відповідні зображення зразків 25, 5, 1 та 7 наведено на рис. 9 б–д. Середнє значення за сукупністю всіх точок по поверхні для всіх зразків наведено в таблиці 3.

Як можна побачити з даних таблиці 3, є ряд режимів друку, проведених для різних кроків зміщення пучка в діапазоні 0,1–0,25, для котрих параметр шорсткості R_a починає змінюватись незначно. Наприклад, при кроці 0,15 зміна цього параметру для зразків 4, 9, 19 змінюється в межах 5%. Таким чином, визначення шорсткості можна використовувати в якості експрес-метода оцінки якості друку. Для того, щоб впевнитись в доцільності, необхідно додатково провести аналіз однорідності структури, а також відповідності за хімічним складом; ці дослідження заплановано в якості подальших кроків робіт в цьому напрямку.

Висновки

Наведені в статті міжнародні стандарти *ISO/ASTM-52900-2015*, *ISO/ASTM-52900-2017*, *ISO/ASTM-52941-2020*, *ISO/ASTM-52950-2022* регламентують ряд оціночних параметрів якості друку, вимог до обладнання та програмного забезпечення. Недоліком даних стандартів є те, що більшість з них взято для оцінки якості друку на принтерах або оцінки геометрії

тривимірних об'єктів як тиснених. Також первинним є не кількісний, а якісний аналіз, тобто такий, що базується на спостереженнях. Рекомендовано обирати зразки, спираючись на суб'єктивне поняття гарного вигляду, що достатньо для оцінки якості роботи звичайного принтеру, але не технологічного приладу для створення робочих елементів літальних апаратів. На даному етапі ще досить велика кількість невизначеного, що тільки буде враховуватись при корегуванні технологічних параметрів виробництва за допомогою адитивної електронно-променевої технології 3D друку.

Серія досліджень показала, що параметри шорсткості в подальшому можна використовувати для кількісного експрес-аналізу якості надрукованих виробів.

M. Tsysar, I. Klochkov, S. Motrunich, O. Katok, V. Matviichuk¹, A. Babak²

¹*E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine*

²*National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute. Igor Sikorsky», Ukraine*

PRINCIPLES OF ADDITIVE ELECTRON BEAM TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING SPARE PARTS FROM VT20 TITANIUM ALLOY POWDER

Currently, there is a need in our country to create a large number of various unmanned aerial vehicles with different payloads, for which 3D printing methods are widely used. The growing requirements for the quality of the design elements of such devices, the replacement of plastics with stronger, but no less light materials force us to review traditional production methods and develop new alternative technologies. Some issues related to increasing the efficiency of the use of titanium raw materials are considered. Scientific studies in this area have shown that the efficiency of this type of production in terms of material consumption is 6...8 times higher than traditional production due to its specifics. However, this technology is too young and needs significant improvements. The given results of experimental studies testify to the sufficient technical potential of the Ukrainian scientific society to solve the set problems. For the first time, the dependence between the geometry and the parameters of the formation of a three-dimensional product by an electron beam from VT20 powder was obtained. The possibility of using this method for the production of solid monolithic structures of complex shape from titanium and its alloys has been experimentally confirmed. The performed analysis made it possible to significantly narrow the range of printing parameters and introduce corrections for the macro- and micro-geometric characteristics of the test samples.

Key words: *additive technologies, 3D printing, electron beam, titanium powder, roughness, geometric dimensions, shrinkage.*

Література

1. Dobrzański L.A., Dobrzański L.B., Dobrzańska-Danikiewicz A.D. Overview of conventional technologies using the powders of metals, their alloys and ceramics in Industry 4.0 stage. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2020. Vol. 98, N 2. P. 56–85.
2. Tylecote R.F. A History of Metallurgy. 2th ed. Maney Publishing For The Institute of Materials, 1992. 205 p.
3. Dickinson H.W. A Short History of the Steam Engine. London: Routledge, 1938, 282 p.
4. Wong K.V., Hernandez A. A review of additive manufacturing. *International Scholarly Research Network Mechanical Engineering*. 2012. Vol. 2012. ID 208760. 10 p.
5. Rizwan A.P.M., Hara T.C.R., Syed M.S.S., Yuvaraj C. Review on diverse materials applied for additive manufacturing. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*. 2015. Vol. 3, N VII. P. 16–20.

6. Guessasma S., Zhang W., Zhu J., Belhabib S., Nouri H. Challenges of additive manufacturing technologies from an optimization perspective. *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*. 2016. Vol. 6. ID A9.
7. Lewis G. Aspects of the Powder in Metal Additive Manufacturing: A Review. *World Journal of Engineering and Technology*. 2022. Vol. 10. P. 363–409.
8. Moustafa S., Daoush W., Ibrahim A. and Neubaur E. Hot Forging and Hot Pressing of AlSi Powder Compared to Conventional Powder Metallurgy Route. *Materials Sciences and Applications*. 2011. Vol. 2, N 8. P. 1127–1133. DOI: 10.4236/msa.2011.28152.
9. ASTM F2792-12 A standard terminology for additive manufacturing processes, with description quoted from the Wohlers Report 2014.
10. Dutta B., Froes Francis H. Additive Manufacturing of Titanium Alloys State of the Art, Challenges, and Opportunities. Elsevier, 2016. 465 p.
11. Garden L. Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges. *Engineering Structures*. 2019. Vol. 180. P. 332–348.
12. Zhang L.C., Liu Y., Li S., Hao, Y. Additive Manufacturing of Titanium Alloys by Electron Beam Melting. *A Review. Adv. Eng. Mater.* 2018. Vol. 20. P. 1–16.
13. German R.M., Dunlap J.W. Processing of iron-titanium powder mixtures by transient liquid phase sintering. *Met. Mater. Trans.* 1986. Vol. 17. P. 205–213.
14. Sun, P., Fang, Z.Z., Zhang, Y. et al. Review of the Methods for Production of Spherical Ti and Ti Alloy Powder. *JOM: the journal of the Minerals*. 2017. Vol. 69. P. 1853–1860.
15. Moll J.H. Utilization of gas-atomized titanium and titanium-aluminide powder. *JOM: the journal of the Minerals*. 2000. Vol. 52. P. 32–34.
16. Galanis, C.C., Sfantsikopoulos M.M., Koidis P.T., Kafantaris N.M., Mpikos P.G. Computer methods for automating preoperative dental implant planning: Implant positioning and size assignment. *Comput. Methods Programs Biomed.* 2007. Vol. 86. P. 30–38.
17. Malara P., Dobrzański L.B. Computer-aided design and manufacturing of dental surgical guides based on cone beam computed tomography. *Arch. Mater. Sci. Eng.* 2015. Vol. 76. P. 140–149.
18. Dickens P. M., Pridham M.S., Cobb R.C., Gibson I., Dixon G. Rapid prototyping using 3-D welding. *International Solid Freeform Fabrication Symposium: Conference Proceedings and Journals*. Austin, Texas, United States, 1992. P. 280–290.
19. ISO/ASTM-52900:2015. Additive manufacturing – General principles – Terminology. Effective from 2015-12-01. Official edition. 2015. 19 p.
20. ISO/ASTM-52900:2017. Additive manufacturing – General principles – Terminology. Effective from 2017-11-01. Official edition. 2017. 12 p.
21. ISO/ASTM-52941:2020. Additive manufacturing – System performance and reliability – Acceptance tests for laser metal powder-bed fusion machines for metallic materials for aerospace application. Effective from 2020-11-01. Official edition. 2020. 12 p.
22. ISO/ASTM-52950:2022 Additive manufacturing – General principles – Overview of data processing. Effective from 2020-30-09. Official edition. 2022. 10 p.

Надійшла 20.09.23

References

1. Dobrzański, L.A., Dobrzański, L.B., & Dobrzańska-Danikiewicz A.D. (2020). Overview of conventional technologies using the powders of metals, their alloys and ceramics in Industry 4.0 stage. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 98(2), 56–85.

2. Tylecote, R.F. (1992). *A History of Metallurgy, Second Edition*. Maney Publishing For The Institute of Materials.
3. Dickinson, H.W. (1938). *A Short History of the Steam Engine*. Routledge.
4. Wong, K.V., & Hernandez A. (2012). A review of additive manufacturing. *International Scholarly Research Network Mechanical Engineering, 2012*, 208760.
5. Rizwan, A.P.M., Hara, T.C.R., Syed, M.S.S., & Yuvaraj, C. (2015). Review on diverse materials applied for additive manufacturing. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*. 3(VII), 16–20.
6. Guessasma, S., Zhang, W., Zhu, J., et al. (2016). Challenges of additive manufacturing technologies from an optimization perspective. *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*. 6, A9.
7. Lewis, G. (2022). Aspects of the Powder in Metal Additive Manufacturing: A Review. *World Journal of Engineering and Technology, 10*, 363–409.
8. Moustafa, S., Daoush, W., Ibrahim, A., & Neubaur, E. (2011). Hot Forging and Hot Pressing of AlSi Powder Compared to Conventional Powder Metallurgy Route. *Materials Sciences and Applications, 2*(8), 1127–1133.
9. (2014). ASTM F2792-12 A standard terminology for additive manufacturing processes, with description quoted from the Wohlers Report.
10. Dutta, B., Froes, & Francis, H. (2016). *Additive Manufacturing of Titanium Alloys State of the Art, Challenges, and Opportunities*. Elsevier.
11. Garden, L. (2019). Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges. *Engineering Structures, 180*, 332–348.
12. Zhang, L.C., Liu, Y., Li, S., & Hao, Y. (2018). Additive Manufacturing of Titanium Alloys by Electron Beam Melting. A Review. *Adv. Eng. Mater., 20*, 1–16.
13. German, R.M., & Dunlap, J.W. (1986). Processing of iron-titanium powder mixtures by transient liquid phase sintering. *Met. Mater. Trans., 17*, 205–213.
14. Sun, P., Fang, Z.Z., Zhang, Y. et al. (2017). Review of the Methods for Production of Spherical Ti and Ti Alloy Powder. *JOM: the journal of the Minerals, 69*, 1853–1860.
15. Moll, J.H. (2000). Utilization of gas-atomized titanium and titanium-aluminide powder. *JOM: the journal of the Minerals, 52*, 32–34.
16. Galanis, C.C., Sfantsikopoulos M.M., Koidis P.T., et al. (2007). Computer methods for automating preoperative dental implant planning: Implant positioning and size assignment. *Comput. Methods Programs Biomed., 86*, 30–38.
17. Malara, P., & Dobrzanski, L.B. (2015). Computer-aided design and manufacturing of dental surgical guides based on cone beam computed tomography. *Arch. Mater. Sci. Eng., 76*, 140–149.
18. Dickens P. M., Pridham M.S., Cobb R.C., et al. (1992). Rapid prototyping using 3-D welding. *International Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin, Texas, United States.
19. *Additive manufacturing – General principles – Terminology ISO/ASTM-52900:2015*. (2015).
20. *Additive manufacturing – General principles – Terminology ISO/ASTM-52900:2017*. (2017).
21. *Additive manufacturing – System performance and reliability – Acceptance tests for laser metal powder-bed fusion machines for metallic materials for aerospace application ISO/ASTM-52941:2020*. (2020).
22. *Additive manufacturing – General principles – Overview of data processing ISO/ASTM-52950:2022*. (2022).