

Д. О. ДМИТРІЄВ

професор кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-8200-351X

А. М. КИРИЧЕНКО

професор кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки
Центральноукраїнський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-4335-9588

М. Ф. КУЗМІЧОВ

аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0003-1501-6865

ТЕХНІЧНІ І ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ В КОМПОНЕТИЦІ ОБЛАДНАННЯ 3D-ДРУКУ МЕТАЛЕВИМИ СПЛАВАМИ

У статті проведено теоретичні дослідження сучасних способів об'ємного формоутворення металевих виробів в контрольованій захисній атмосфері як процесів 3D-друку порошковими матеріалами та присадковим матеріалом у вигляді металевого дроту. Наведено аналіз експериментальних технологій Українських науково-дослідних підприємств, що проходять інтенсивні випробування у сучасному адитивному виробництві для металів і сплавів, проаналізовано останні дослідження у цій сфері. Детально розглянуто вплив технологічних факторів та їх зв'язок з компонувальними властивостями формоутворюючого обладнання на якість фізико-структурних властивостей матеріалу отриманих металевих виробів осадженням додаткового матеріалу в поширових стратегіях їх накладання. Зокрема виконано оцінку ризиків щодо неоднорідності мікро та макроструктури металевих виробів, їх зв'язок з імовірною анізотропією механічних властивостей надрукованих деталей складної геометрії. Запропоновано технічні і технологічні рішення в компонентіці обладнання 3D-друку металевими сплавами, що надають розширення технологічних можливостей адитивних технологій та знижують рівень структурної неоднорідності і анізотропії механічних властивостей в товстостінних деталях. Рішення побудовано за рахунок введення додаткових програмно-керованих кінематичних зв'язків системи орієнтації напрямного пристрою витратного матеріалу та позиціонуючої платформи із підкладкою для поширового укладання розплавленого витратного матеріалу.

Зроблено технічні пропозиції як схемні рішення для керованого застосування електронної гармати в обладнанні 3D-друку, що використовує промінь у формі порожнистого перевернутого конуса з вершиною в зоні формування ванни розплаву на підкладці. Обґрунтовано алгоритми зворотньої кінематики для багатопровідних просторових мехатронних систем запропонованих компоновок обладнання 3D-друку як механізмів відносного маніпулювання орієнтації електронної гармати і позиціювання напрямного пристрою витратного матеріалу та переміщення підкладки із сформованими попередньо шарами металу, утримання форми ванни розплаву в зоні осадження на криволінійних поверхнях друкованих металевих виробів.

Ключові слова: адитивне виробництво, 3D-друк, фізико-структурні властивості, компонувальні фактори, обладнання

D. O. DMYTRIIEV

Professor at the Department of Automation, Robotics and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-8200-351X

A. M. KYRYCHENKO

Professor at the Department of Mechanical Engineering, Mechatronics
and Robotics
Central Ukrainian National Technical University
ORCID: 0000-0002-4335-9588

M. F. KUZMICHOV

Postgraduate Student at the Department of Automation, Robotics
and Mechatronics

Kherson National Technical University

ORCID: 0009-0003-1501-6865

TECHNICAL AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS IN THE COMPONENT DESIGN OF METAL ALLOY 3D-PRINTING EQUIPMENT

The article presents theoretical studies of modern methods of volumetric shaping of metallic components in a controlled protective atmosphere, considered as processes of 3D printing using powder materials and filler material in the form of metal wire. An analysis is provided of experimental technologies developed by Ukrainian research and development enterprises, which are currently undergoing intensive testing in contemporary additive manufacturing of metals and alloys, along with a review of recent research in this field. The influence of technological factors and their relationship with the configuration-related properties of shaping equipment on the quality of the physical and structural characteristics of materials in metal parts produced by deposition of supplementary material in layer-by-layer strategies is examined in detail. In particular, risks associated with micro- and macrostructural heterogeneity of metallic components and their correlation with potential anisotropy of the mechanical properties of printed parts with complex geometries are assessed.

Technical and technological solutions are proposed for the component design of metal alloy 3D-printing equipment aimed at expanding the technological capabilities of additive manufacturing and reducing structural heterogeneity and mechanical anisotropy in thick-walled parts. These solutions are based on the introduction of additional software-controlled kinematic linkages within the orientation system of the feedstock guiding device and the positioning platform with a substrate for layer-by-layer deposition of molten material.

Design proposals are also presented as schematic solutions for controlled application of an electron gun in 3D-printing systems that employ a beam shaped as a hollow inverted cone with its apex located in the melt pool formation zone on the substrate. Algorithms of inverse kinematics are substantiated for multi-actuated spatial mechatronic systems of the proposed 3D-printing equipment configurations, functioning as mechanisms for relative manipulation of the electron gun orientation, positioning of the feedstock guiding device, and movement of the substrate with previously formed metal layers, while maintaining melt pool geometry during deposition on curved surfaces of printed metallic components.

Key words: additive manufacturing, 3D printing, physico-structural properties, layout factors, equipment.

Постановка проблеми

На сьогодні технології адитивного виробництва металевих виробів є надскладними і в той же час стратегічно важливими для України технологічними процесами. Накопичений світовий досвід в промисловості щодо пошарового утворення металевих виробів у авіабудуванні, машинобудуванні та інших галузях промисловості має експериментальний характер і до серійного виготовлення ще повинно бути виконано низку надскладних процедур для встановлення продукції на виробництво [1, 2]. Саме питання контрольованих теплових взаємодій в захисному середовищі утворення шарів металевих сплавів, стратегії накладання шарів для рівноважної мікроструктури, а відповідно усунення анізотропії механічних властивостей в деталях складної форми є важливою задачею, що враховує не тільки режимні параметри процесів 3D друку металів, а технологічну спадковість.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналізуючи сучасні дослідження виготовлення деталей пошаровим утворенням металевих сплавів [3, 4, 5, 6, 7], можна відмітити декілька запатентованих способів та експериментальних технологій 3D друку від плавлення порошків до дроту. Головним фактором в керуванні процесами 3D друку металів є процеси, що відбуваються в рухомій ванні розплаву в захисній контрольованій атмосфері. Рахується вже класичним метод селективного лазерного спікання, що включає формування мікроточки рідкого розплаву опаленням потужним лазерним променем поверхні підкладки, вдування струменем інертного транспортуючого газу в розплав металевого порошку (рис. 1, а). Однак на сьогодні розвиваються методи застосування металевого дроту в якості розхідного матеріалу при 3D друку складних виробів. Так в Україні існує спосіб адитивного виробництва металевого 3D-виробу [6], що включає пошарове наплавлення в захисній контрольованій атмосфері шарів матеріалу на утримуючій підкладці знизу до гори, по контуру виробу присадковим дротом, а як джерела нагріву в кожній групі можуть бути електро-дуговий, плазмодуговий чи інші концентровані джерела нагріву, причому по контуру отриманого 3D-виробу одночасно рухається група джерел нагріву, щонайменше три джерела, які розташовані на регульованій відстані один від одного, при цьому до зони дії першого джерела нагріву присадковий дріт не подають, воно лише підігріває підкладку до необхідної температури, а в зоні дії наступних джерел нагріву відбувається формування ванни розплаву та плавлення присадкового дроту (рис. 1, а).

За ствердженням авторів [6] такий спосіб для виробництва металевих 3D виробів може бути використаний для ефективного виготовлення якісних високоточних деталей, в умовах де критичними параметрами є габаритні розміри, вага та складність геометричної форми 3D виробу. Однак за рахунок бокової подачі витратного матеріалу

у вигляді дроту в зону сплавлення утворюється затінена зона на підкладці під дротом, що може призвести до утворення пор і порожнин, викликаного осадженням розплавленого витратного матеріалу на нерозплавлену підкладку, що ускладнює управління структурою осадженого матеріалу за рахунок контрольованого затвердіння. Нагрів дроту з однієї сторони – зверху – призводить до його викривлення, що ускладнює точну подачу дроту в зону ванни розплаву. Іншою перспективною технологією адитивного виробництва металевих виробів є спосіб де для формування ванни розплаву на підкладці і розплавлення витратного матеріалу використовують електронний промінь, який безпосередньо генерують у формі порожнистого перевернутого конуса з вершиною в зоні формування ванни розплаву за допомогою електронної гармати з кільцевим катодом під дією регульованої прискорюючої напруги в ній, а витратний матеріал подають в зону формування ванни розплаву через напрямний пристрій, який проходить через внутрішній отвір вказаного кільцевого катода вздовж вертикальної осі вказаного конусного електронного променя [7, 8] (рис. 2, а).

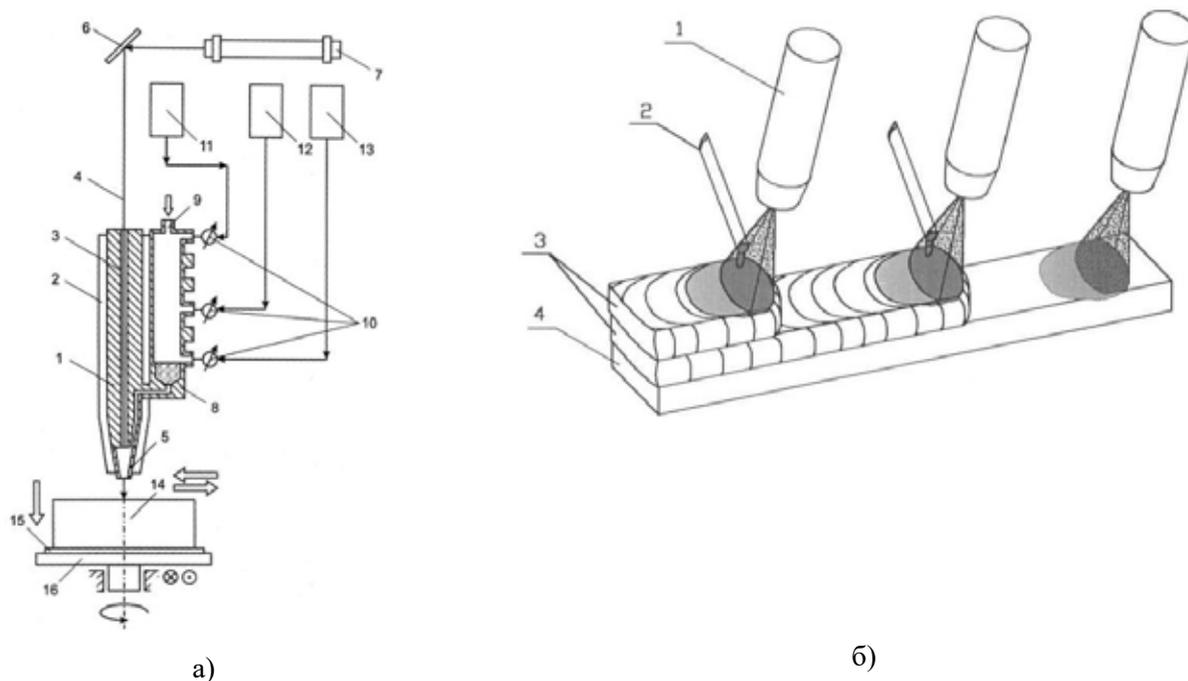
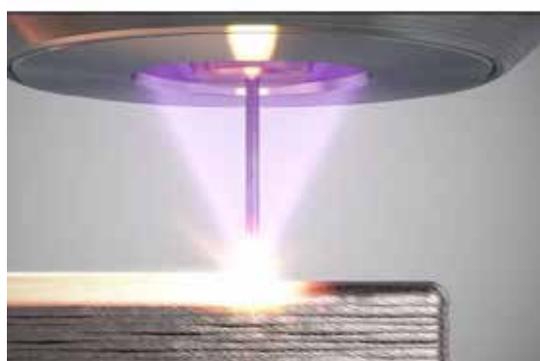


Рис. 1. Приклади адитивних технологій пошарового утворення металевих виробів:
 а) – селективне лазерне плавлення металевих порошків; б) – із застосуванням дроту з нахилом подачі присадкового матеріалу (1 – концентроване джерело нагріву 2 – присадковий дріт; 3 – наплавлений шар; 4 – підкладка) [6]



а)



б)

Рис. 2. Плавлення дроту електронним променем у формі порожнистого перевернутого конуса (а), переміщення зону формування ванни розплаву при пошаровому утворенні виробу (б) [8, 9]

За допомогою електронного променя розплавляють витратний матеріал у вигляді дроту і осаджують отриманий додатковий розплав у ванну розплаву на підкладці, переміщують зону формування ванни розплаву і подачі витратного матеріалу відносно підкладки по заданій оператором або програмою траєкторії (рис. 2, б).

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є теоретичне визначення технічних і технологічних рішень, що можуть бути використані для забезпечення комплексу фізико-структурних показників матеріалів деталей отриманих 3D-друком металевими сплавами та якості їх механічних властивостей за рахунок нових рішень в компонетиці програмного обладнання для адитивних технологій.

Викладення основного матеріалу дослідження

На сьогодні задача забезпечення рівномірної макро і мікроструктури матеріалу в процесі осадження, а відповідно і механічних властивостей металевих 3D-деталей є першочерговою. Для вирішення, пропонується компоновальна схема пристрою (рис. 3) для виготовлення тривимірних об'єктів, який складається з вакуумної технологічної камери 1, електронної гармати 2 з сферичним катодом, витратного матеріалу вигляді металевого дроту 3 наприклад з титану, титанових сплавів, інтерметалічних сполук титану, ніобію, сплавів ніобію, інтерметалічних сполук ніобію, танталу, сплавів танталу, алюмінію, алюмінієвих сплавів, інтерметалічних сполук алюмінію, нікелевих сплавів, кобальтових сплавів, інструментальних сталей, напрямного пристрою 4, металеві підкладки 5 закріплені на рухомій платформі 6, що зв'язано за допомогою сферичних шарнірів 7 з штангами постійної довжини 8 – 13 та окремими повзунами 14 – 19 по напрямним з серводвигунами Д1 – Д6, що управляються системою ЧПК.

Запропонований пристрій для виготовлення металевих тривимірних об'єктів на відміну від існуючих стратегій формування великої товщини 3D-друкованої деталі накладанням кількох паралельних шарів з перекриттям зони наплавлення дозволяє за допомогою переорієнтації попередньо сформованого шару металу отримувати керовані умови нагрівання та кристалізації витратного матеріалу при осадженні. На металевій підкладці 5 відбувається формування ванни розплаву і осадження витратного матеріалу у вигляді смуг металу, що утворюють вертикальні стінки 3D деталі 21. В технологічній вакуумній камері 1 створюється тиск 10-2 Па, витратний матеріал 3 подається через напрямний пристрій 4 крізь електронну гармату 2 з сферичним катодом на закріплену металеву підкладку 5. Електронні промені розплавляючи розхідний матеріал у вигляді дроту 3 на підкладці 5 формують ванну розплаву і осаджують смуги металу пошарово накладаючи їх одна на одну у вигляді стінки 21 за рахунок переміщення рухомої платформи 6 вниз по координаті Z. Рухомі платформи 6 керується системою ЧПК програмним переміщенням повзунів 14-19 по алгоритмам зворотньої кінематики для багатоприводних просторових мехатронних систем. Конструктивно система приводів рухомої платформи 6 складається з шести замкнених до рухомої платформи 6 кінематичних ланцюгів у просторі кожен від окремого серводвигуна і має шість ступенів вільності.

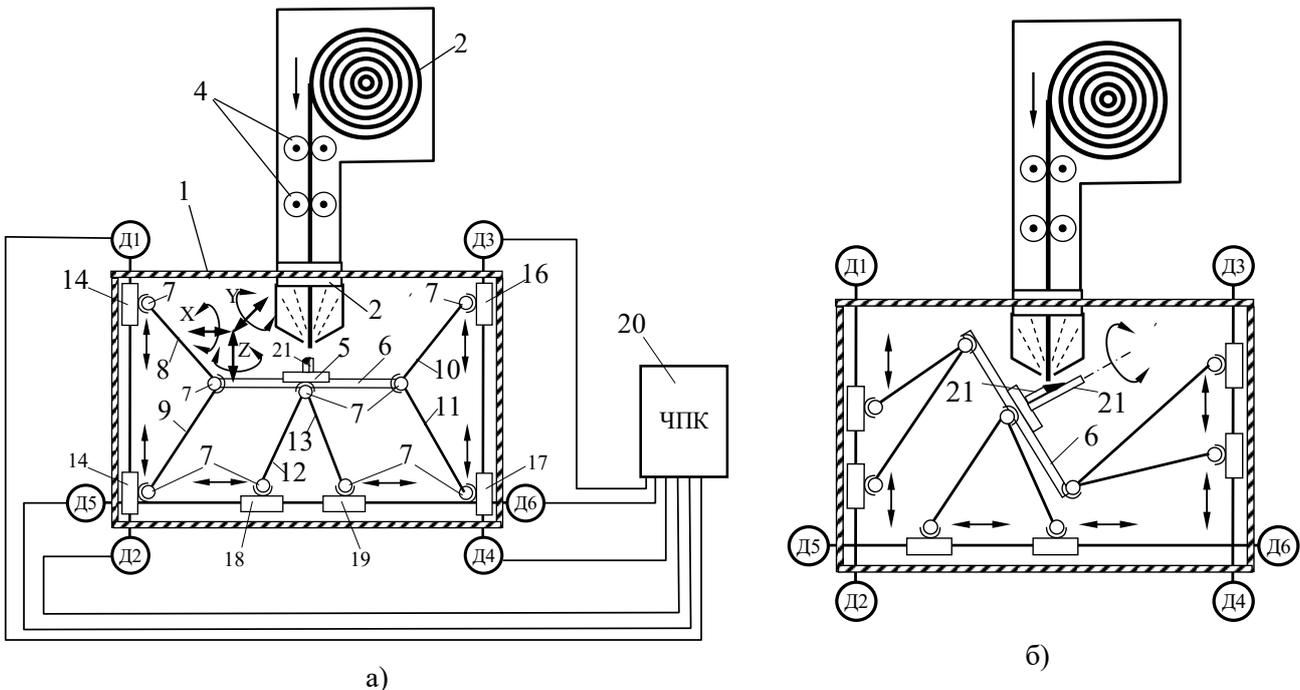


Рис. 3. Компонувальна схема обладнання для пошарового утворення металевих виробів з позиціонуючою платформою підкладки у початковому стані (а) та під час орієнтації рухомої ванни розплаву (б)

На рис. 3, б показано позиціонуєчи можливості рухомої платформи 6 із сформованою попередньо вертикально тонкою стінкою 21. Наступні переміщення ванни розплаву відбуваються за іншою стратегією осадження, що передбачає нахил вертикальної стінки 21 під кутом до 85° навколо координатних осей X, Y, Z. Таким чином осадження додаткового матеріалу відбувається на розігріту бічну поверхню попереднього шару або шарів як підкладки металу, формуючи новий шар 22. За допомогою одночасних обертальних рухів рухомої платформи та лінійних переміщень уздовж координатних осей X, Y, Z в робочому просторі пристрою для виготовлення тривимірних металевих об'єктів можливе формування суцільних елементів заданої ширини 3D деталей складної форми, використовуючи типові стратегії для наплавлення у вигляді типових стратегій зиг-заг, штрихування, петля, еквідистанта, спіраль та їх комбінацій. Дане компоновальне рішення дозволить при відповідних технологічних параметрах забезпечити однорідність макро і мікроструктури матеріалу друкованої 3D деталі і відповідно рівномірність механічних властивостей у всіх координатах.

Іншим удосконаленням процесу «мікроліття» в зоні осадження пропонується за рахунок утримання форми ванни розплаву на криволінійних у просторі поверхнях друкованих металевих виробів. В компоновальній схемі (рис. 4, а) пристрою для тривимірного друку металевих виробів в вакуумній камері електронну гармату розташовано на двокоординатному приводі обертання з послідовно з'єднаними серводвигунами, що позиціонується від системи числового керування навколо координатних осей X, Y, а напрямний пристрій витратного матеріалу у вигляді металевого дроту містить систему незалежних приводів, які через сферичні шарніри і штанги постійної довжини зв'язані з окремими повзунами на напрямних приводах і через систему ЧПК задають орієнтацію витратного матеріалу співвісно отвору кільцевого катоду електронної гармати. Керувані обертаннями електронної гармати відбувається утримання форми ванну розплаву в місцях подвійної кривизни поверхонь, що необхідно надрукувати, осадження витратного матеріалу під кутом до сусідніх шарів матеріалу тим самим забезпечуючи необхідні стратегії наплавлення. Система орієнтації напрямного пристрою 4 (рис. 4, б) витратного матеріалу складається з системи штанг постійної довжини 8, зв'язаних шарнірами 9 з декількома незалежними приводами лінійного руху Д1 і Д2 (може бути три і більше). Електронні промені розплавляючи розхідний матеріал у вигляді дроту 3 на підкладці 5 формують ванну розплаву і осаджують смуги металу пошарово накладаючи їх одна на одну у вигляді окремого шару 10 за рахунок переміщення підкладки 5 вниз по координаті Z і горизонтально уздовж координати X мехатронною системою лінійного переміщення. Конструктивно система приводів позиціонування напрямного пристрою 4 складається з двох і більше замкнених до напрямного пристрою 4 кінематичних ланцюга кожен від окремого серводвигуна Д1, Д2.

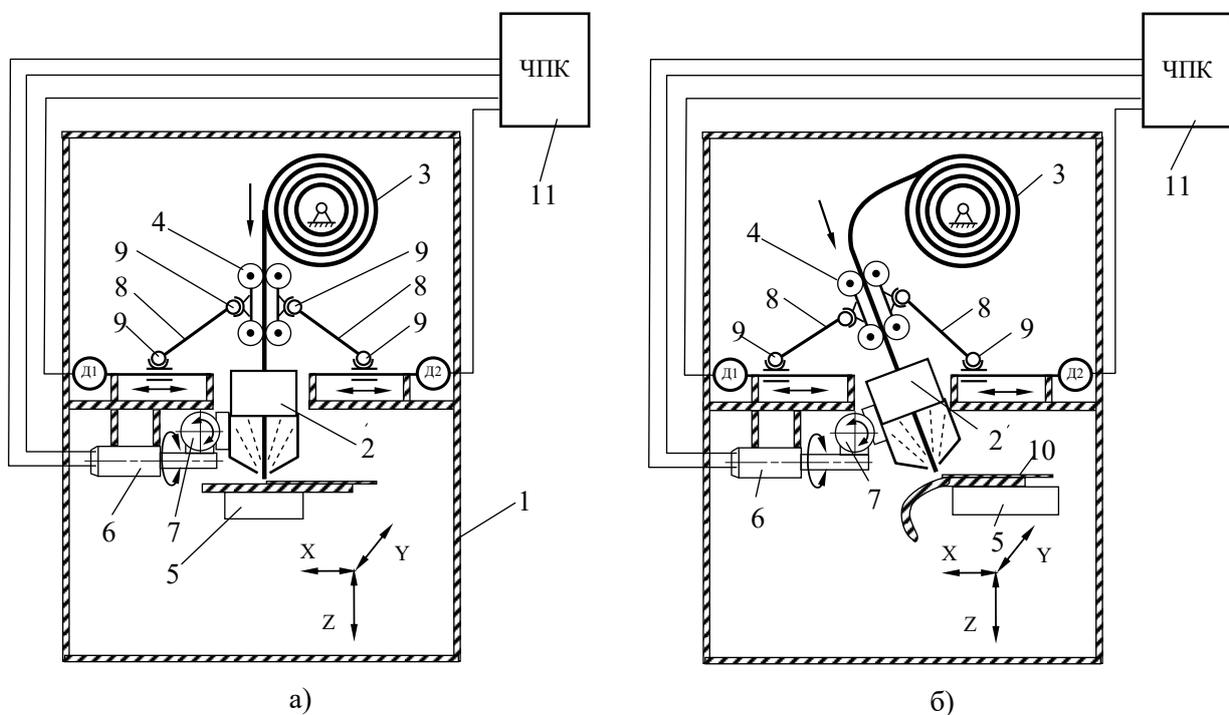


Рис. 4. Компоновальна схема обладнання для пошарового утворення металевих виробів з приводом обертання електронної гармати (а) та механізм орієнтації напрямного пристрою (б)

За допомогою одночасних обертальних рухів серводвигунів 6, 7, лінійних переміщень підкладки 5 уздовж координатних осей X, Y, Z, позиціюванні напрямного пристрою 4 співвісно отвору кільцевого катоду електронної гармати 2 в робочому просторі пристрою для тривимірного друку металевих виробів можливе підтримка і управління формою ванни розплаву, що переміщується по криволінійній поверхні 3D деталі, контроль температурних полів в місцях реверсу траєкторій в складних стратегіях осадження шарів металу.

Висновки

В результаті аналізу сучасної наукової і патентної інформації запропоновано компонувальні рішення програмно-керованого технологічного обладнання для виготовлення металевих тривимірних об'єктів, що дозволяють розширити технологічні можливості пристрою друку пошаровим осадженням металевого витратного матеріалу у вигляді дроту в бухтах та отримувати якісні тривимірні деталі з поверхнями подвійної кривизни. Основним резервом в цьому напрямку є технологічно керовані рухи орієнтації електронної гармати, позиціювання напрямного пристрою витратного матеріалу та лінійного переміщення підкладки із сформованими попередньо шарами металу, утримання форми ванни розплаву в зоні осадження на криволінійних поверхнях друкованих металевих виробів. Запропоновані пристрої для виготовлення металевих тривимірних об'єктів на відміну від існуючих стратегій формування великої товщини 3D-друкованої деталі накладанням кількох паралельних шарів з перекриттям зони наплавлення дозволяють за допомогою переорієнтації попередньо сформованого шару металу отримувати керовані умови нагрівання та кристалізації витратного матеріалу при осадженні.

Список використаної літератури

1. T. DebRoy et al., "Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties," *Prog. Mater. Sci.*, vol. 92, pp. 112–224, 2018, doi:10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.
2. J. Allen, "An Investigation into the Comparative Costs of Additive Manufacture vs. Machine from Solid for Aero Engine Parts," *Proc. Meet. RTO-MP-AVT-139*, pp. 17-1-17–10, 2006, doi: 10.14339/RTO-MP-AVT-139-17.
3. Dmytro Kovalchuk, Vitalii Melnyk, Ihor Melnyk, Borys Tugai Prospects of Application of Gas-Discharge Electron Beam Guns in Additive Manufacturing // *Elektrotechnica & Elektronika (E+E)*. No. 5-6/2016, pp.36-42
4. Dmytro Kovalchuk, Vitalii Melnyk, Ihor Melnyk, Borys Tugai Advanced Technical and Technological Solutions for Additive Manufacturing by xBeam 3D Metal Printing // *Elektrotechnica & Elektronika (E+E)*, Vol.53, No 3-4 (2018) pp. 60-68.
5. Kovalchuk, D., Ivasishin O. Profile electron beam 3D metal printing // Elsevier Inc., Additive Manufacturing for the Aerospace Industry (Book Chapter), 19 February 2019, Pages 213-233 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814062-8.00012-1>
6. Патент України № 143235, МПК В22D 19/00, В22D 19/10, В23К 26/34, С23С 26/02, Спосіб адитивного виробництва металевих 3D-виробів / Григоренко Г.М., Костін В.А., Григоренко С.Г., Шаповалов В.О., Ахонін С.В., Пікулін О.М., патентовласник Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України, заявл. 10.12.2019, Бюл.№ 23, опубл. 27.07.2020, Бюл.№ 14
7. Патент України № 112682, МПК В22D19/00, В22D23/00, Спосіб виготовлення тривимірних об'єктів і пристрій для його реалізації / Ковальчук Д.В., Мельник В.Г., патентовласник Приватне акціонерне товариство "НВО "Червона хвиля", заявл. 10.03.2015, бюл. № 5/2015, опубл. 10.10.2016, бюл. № 19/2016
8. Kovalchuk D.; Melnyk V.; Melnyk I.; Savvakina D.; Dekhtyar O.; Stasiuk O.; Markovsky P Microstructure and Properties of Ti-6Al-4V Articles 3D-Printed with Co-axial Electron Beam and Wire Technology. // *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021, 30(7), pp. 5307–5322 DOI: 10.1007/s11665-021-05770-9
9. A.E. Davis; J.R. Kennedy; D. Strong; D. Kovalchuk; S. Porter; P.B. Tailoring equiaxed β -grain structures in Ti-6Al-4V coaxial electron beam wire additive manufacturing // *Prangnell Materialia*, 2021, 20, 101202 DOI: 10.1016/j.mtla.2021.101202

References

1. DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., Beese, A. M., Wilson-Heid, A., De, A., & Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components: Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, 112–224. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
2. Allen, J. (2006). An investigation into the comparative costs of additive manufacture vs. machine from solid for aero engine parts. In *Proceedings of RTO-MP-AVT-139* (pp. 17-1–17-10). NATO Research and Technology Organization. <https://doi.org/10.14339/RTO-MP-AVT-139-17>
3. Kovalchuk, D., Melnyk, V., Melnyk, I., & Tugai, B. (2016). Prospects of application of gas-discharge electron beam guns in additive manufacturing. *Elektrotechnica & Elektronika (E+E)*, 5–6, 36–42.
4. Kovalchuk, D., Melnyk, V., Melnyk, I., & Tugai, B. (2018). Advanced technical and technological solutions for additive manufacturing by xBeam 3D metal printing. *Elektrotechnica & Elektronika (E+E)*, 53(3–4), 60–68.

5. Kovalchuk, D., & Ivasishin, O. (2019). Profile electron beam 3D metal printing. In Additive Manufacturing for the Aerospace Industry (pp. 213–233). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814062-8.00012-1>

6. Hryhorenko, H. M., Kostin, V. A., Hryhorenko, S. H., Shapovalov, V. O., Akhonin, S. V., & Pikulín, O. M. (2020). Sposib adytyvnoho vyrobnytstva metalevykh 3D-vyrobiv [Method of additive manufacturing of metallic 3D products] (Patent No. 143235). Institute of Electric Welding named after E. O. Paton, National Academy of Sciences of Ukraine.

7. Kovalchuk, D. V., & Melnyk, V. H. (2016). Sposib vyhotovlennia tryvymirnykh ob'ektiv i prystroi dlia yoho realizatsii [Method for manufacturing three-dimensional objects and device for its implementation] (Patent No. 112682). Private Joint Stock Company “NVO Chervona Khvyliia”.

8. Kovalchuk, D., Melnyk, V., Melnyk, I., Savvakín, D., Dekhtyar, O., Stasiuk, O., & Markovsky, P. (2021). Microstructure and properties of Ti-6Al-4V articles 3D-printed with co-axial electron beam and wire technology. Journal of Materials Engineering and Performance, 30(7), 5307–5322. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05770-9>

9. Davis, A. E., Kennedy, J. R., Strong, D., Kovalchuk, D., Porter, S., & Prangnell, P. B. (2021). Tailoring equiaxed β -grain structures in Ti-6Al-4V coaxial electron beam wire additive manufacturing. Materialia, 20, 101202. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101202>

Дата першого надходження рукопису до видання: 15.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 12.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025