

ТЕХНОЛОГІЯ *xBeam* 3D METAL PRINTING НА ШЛЯХУ ДО ПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА

Д.В. Ковальчук, В.Г. Мельник, І.В. Мельник, **Б.А. Тугай**

ПрАТ «НВО «Червона Хвиля».

04114, м. Київ, вул. Дубровицька, 28. E-mail: info@xbeam3d.com

Вивчено питання можливості впровадження нової електронно-променевої технології адитивного виробництва *xBeam* 3D Metal Printing в промисловість. Продемонстровано можливість виготовлення заготовки, близької за формою до кінцевого виробу, з використанням адитивного виробництва *xBeam* 3D Metal Printing та обґрунтовано показано економічні переваги використання запропонованої технології перед традиційними методами виготовлення металевих виробів. Бібліогр. 16, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: електронно-променева технологія; адитивне виробництво; 3D друк; метал; титан; властивості; осадження

Адитивне виробництво (Additive Manufacturing), також відоме як 3D друк, давно і впевнено увійшло в повсякденне використання в різних галузях промисловості в якості швидкого і зручного способу виготовлення прототипів реальних виробів і зразків для випробувань як з полімерних матеріалів, так і з металів [1–4]. Деякі технології 3D друку металів, перш за все засновані на методах вибіркового розплавлення (спікання) підготовленого шару порошку за допомогою лазера або електронного променя (технології типу «powder bed fusion»), вже широко використовуються у виробництві реальних виробів, наприклад різних медичних протезів [3, 4]. Також вже є приклади виготовлення методами адитивного виробництва окремих виробів для авіації, космосу і турбобудування, хоча, як правило, це деталі, які не несуть критичних навантажень [5, 6].

Однак широкого виробничого впровадження адитивне виробництво металевих виробів досі не досягло [7, 8]. Це пов'язано з цілим рядом чинників. Це і дороге обладнання, яке до того ж, як правило, складне в експлуатації, і дорогі і не завжди доступні витратні матеріали, і низька продуктивність більшості технологій адитивного виробництва, що все разом призводить до високої собівартості виробів, виготовлених з використанням 3D друку [9, 10]. Окремо варто відзначити проблему відсутності нормативних документів, що регламентують використання матеріалів, отриманих методами 3D друку. Це стосується як загальних державних і міждержавних стандартів, так і галузевих директив і сертифікацій. В даний час в усьому світі ведеться активна робота над створенням спеціалізованих стандартів на продукцію адитивного виробництва і деякі документи вже затверджені [11–13]. Але до того, як регламентні вимоги

в кожній окремій галузі не будуть офіційно введені у використання, виробники будь-якої металевої продукції зобов'язані дотримуватися вимог діючих на даний момент стандартів.

У зв'язку з цими наявними обставинами більш швидко розширення використання адитивних технологій можливе за рахунок виготовлення виробів з більш гнучкими підходами до оцінки якості та застосування тих марок металів і сплавів, вимоги до яких можуть бути задоволені вже зараз.

Прикладом може бути продукція ливарного виробництва, де вимоги до структури та механічних властивостей, особливо до показників пластичності, як правило нижчі, ніж до таких самих матеріалів, виготовлених способами деформації (кування, прокатка тощо). Відомим комерційним недоліком ливарного виробництва є необхідність виготовлення окремої ливарної форми для кожного виду виробів, що вимагає великих додаткових витрат і вельми тривалого часу. Особливо це болісно для виготовлення штучних і дрібносерійних виробів, коли вартість допоміжних операцій часто істотно перевершує вартість безпосередньо лиття і матеріалів.

Якраз ці проблеми найкраще вирішуються адитивними технологіями. Завдяки цим факторам саме литі деталі з металів і сплавів можна розглядати як одні з перших на заміщення продукцією адитивного виробництва.

Серед відомих методів адитивного виробництва особливо привабливими для широкого промислового використання виглядають технології типу «direct energy deposition» із застосуванням дроту в якості витратного матеріалу для пошарового осадження. Ці технології є найбільш продуктивними, розміри вироблених деталей, як правило, не мають суттєвих обмежень, а витратний матеріал (стандартний дріт) доступний і недорогий [3, 4].

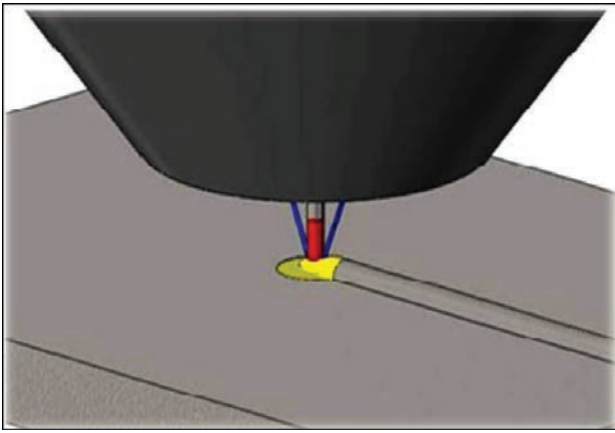


Рис. 1. Схематичне зображення процесу осадження

Нова електронно-променева технологія адитивного виробництва xBeam 3D Metal Printing (далі xBeam 3D), розроблена ПрАТ «НВО «Червона Хвиля», відноситься до таких методів. Особливістю цієї технології є використання в якості джерела нагріву газорозрядної електронно-променевої гармати з кільцевим катодом, здатної безпосередньо генерувати електронний промінь в формі порожнистого перевернутого конуса [14] (рис. 1). Така конфігурація електронного променя дозволяє подавати витратний дріт в зону осадження співвісно з цим порожнистим конічним електронним променем, тим самим забезпечуючи потрапляння нового матеріалу у вигляді розплавленого металу з кінця дроту прямо в центр ванни розплаву на підкладці, і його розтікання навколо центру в межах цієї ванни розплаву (рис. 2), що дозволяє надійно виключити утворення макродефектів типу пор або несплавлення.

Крім того відносно невисока прискорювальна напруга (< 20 кВ) спеціально розробленої газорозрядної електронної гармати, помірна концентрація потужності і малоінерційна система регулювання потужності забезпечують хороші можливості контрольованого нагрівання поверхні підкладки навіть при високій продуктивності розплавлення і подачі дроту, тим самим підвищуючи контрольованість формування структури осадженого матеріалу, знижує залишкові напруження як в підкладці, так і в пошарово сформованому матеріалі, і дозволяє забезпечувати досить точні геометричні параметри сформованого виробу, тим самим зни-



Рис. 2. Розтікання рідкого металу з кінця дроту на підкладці



Рис. 3. Диск двостулкового клапана діаметром 127 мм насоса для морської води

жуючи до мінімуму необхідність в остаточній механічній обробці [15, 16].

Розглянемо можливість і доцільність заміни традиційних способів лиття технологією адитивного виробництва на прикладі виготовлення реального промислового виробу методом xBeam 3D. В якості тестового виробу для дослідження було обрано диск двостулкового клапана насоса для морської води діаметром 127 мм (рис. 3) на замовлення компанії «AeroTitanium AS» (Норвегія). Матеріал виробу згідно зі специфікацією — комерційно чистий титан марки Grade C-2, ASTM B367 (Ti — основа; O $< 0,4$; Fe $< 0,2$). Традиційний спосіб виготовлення — вакуумно-дугове лиття в форму. Вага готового виробу — 0,68 кг.

Експериментальне виготовлення цього виробу за технологією xBeam 3D виконували на пілотній



Рис. 4. Установа xBeam-01

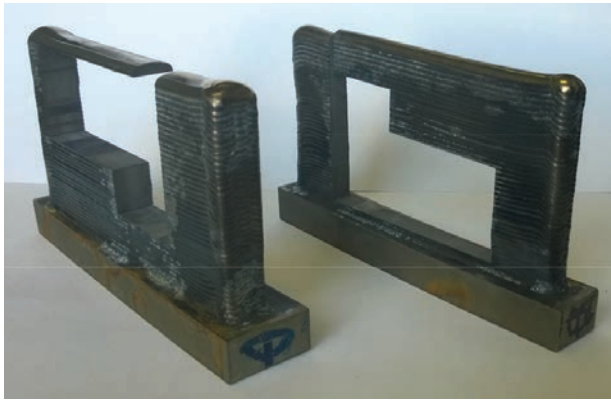


Рис. 5. Зразки для дослідження механічних властивостей титану марки Grade 4, виготовленого за технологією xBeam 3D установці xBeam-01 (рис. 4). Оскільки титан марки Grade C-2 у вигляді дроту не випускається, було прийнято рішення використовувати в якості матеріалу для осадження титановий сплав найбільш близький за хімічним складом до цієї марки і такий, що випускається у вигляді дроту. Таким матеріалом був обраний комерційно чистий титан марки Grade 4, ASTM B863 (Ti — основа, O — 0,24, Fe — 0,24). Застосовували дріт діаметром 3 мм, який істотно дешевше такого ж дроту менших діаметрів, і при цьому забезпечує можливість оптимального формування стінок деталі, що виготовляється. В якості базової підкладки для осадження, яка є частиною формованого виробу, застосовували стандартну плиту товщиною 10 мм з комерційно чистого титану марки Grade 2, ASTM B265.

З метою перевірки правильності вибору матеріалу для заміни титану марки Grade C-2 були проведені дослідження механічних властивостей матеріалу, отриманого 3D друком за технологією xBeam 3D. Виготовлено тестові зразки з використанням дроту діаметром 3 мм з комерційно чистого титану марки Grade 4 у вигляді стінок товщиною 8 та 12 мм. З цих тестових стінок було вирізано по три зразки уздовж кожної з координат для механічних випробувань згідно з вимогами стандарту ASTM E8-79a: по горизонталі *X* вздовж напрямку осадження шару і по вертикалі *Z* поперек осаджених шарів (рис. 5). Результати механічних випробувань наведені в таблиці.

Таким чином, проведені дослідження підтвердили, що механічні властивості виробів, отриманих з альтернативного матеріалу, не поступаються

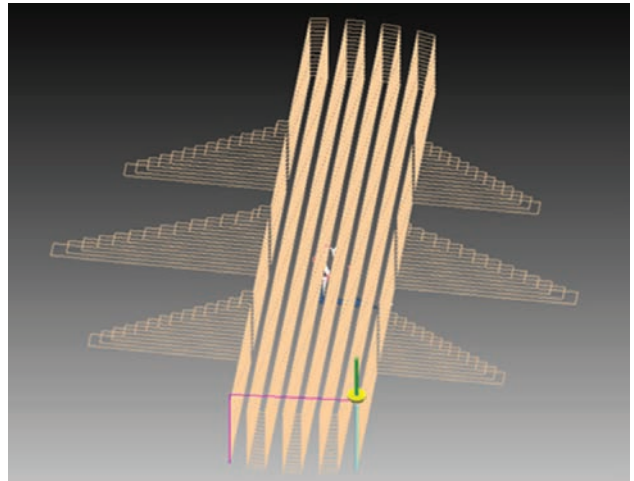


Рис. 6. Модель для 3D друку

характеристикам стандартного матеріалу для зазначеного кінцевого виробу. Це підтвердило можливість використання комерційно чистого титану марки Grade 4 в якості заміни титану марки Grade C-2 при виготовленні аналогічних деталей за технологією адитивного виробництва xBeam 3D.

За допомогою відповідного програмного забезпечення розроблена тривимірна модель для шарового формування виробу з товщиною шару 1,5 мм із урахуванням заданих припусків на механічну обробку (по 1 мм на кожну бічну сторону і на верхню поверхню). При цьому кожен шар формували однією безперервною лінією, яка окреслювала контур кожного шару і заповнювала широкі області (рис. 6). Це дозволило максимально скоротити час пасивних переміщень при переході від шару до шару та підвищити загальну продуктивність процесу.

Процес осадження проводили з наступними основними параметрами: потужність електронного променя — 6,5 кВт, швидкість подачі витратного дроту — 24 мм/с, лінійна швидкість переміщення підкладки для осадження — 24 мм/с. Такі параметри забезпечили осадження з продуктивністю 2,7 кг/год, що дозволило сформувати зазначену вище модель з вагою бруто осадженого матеріалу близько 0,5 кг за 17 хв (з урахуванням пасивного часу переміщення підкладки на вихідні позиції для друку чергового шару). При цьому загальний технологічний час з урахуванням операцій завантаження, вакуумування, охолодження і

Хімічний склад (мас. %) та механічні властивості тестових зразків, отриманих 3D друком

Матеріал	O	Fe	Межа міцності, МПа	Межа пружності, МПа	Відносне подовження, %
CP Ti Grade C-2, ASTM B367	< 0,4	< 0,2	> 345	> 275	> 15
CP Ti Grade 4, xBeam 3D Metal Printing	0,24	0,24	~ 690	~ 580	~ 25

вивантаження склав близько 70 хв. Загальна вага отриманої заготовки склала близько 2 кг, з яких 1,5 кг становила вага підкладки.

Потім була проведена чистова механічна обробка бічних поверхонь отриманої заготовки і підкладки (рис. 7). Тривалість чистової обробки на верстаті з ЧПК склала близько однієї години.

Таким чином, загальний час, який знадобився на виготовлення одного диска двостулкового клапана діаметром 127 мм в остаточному вигляді, склав трохи більше двох годин (130 хв). Для порівняння, згідно з інформацією компанії «AeroTitanium AS», звичайний час виконання замовлення на виготовлення навіть штучних деталей способом вакуумно-дугового лиття становить від 10 (при наявності підготовлених ливарних форм) до 14 тижнів (якщо ливарні форми потрібно виготовляти).

Повний вихід придатного матеріалу склав 34 % (від плити і дроту до придатної деталі), при цьому вихід придатного матеріалу, сформованого 3D друком за технологією xBeam 3D (від дроту до відповідної частини придатної деталі), склав 64 %. Повний вихід придатного матеріалу при виготовленні литтям становить 10...15 % (від ливарного електрода до придатної деталі).

На підставі аналізу ресурсів, фактично використаних у повному циклі виготовлення кінцевої деталі із застосуванням технології xBeam 3D, а саме електроенергії, робочого газу, робочого часу персоналу установки xBeam-01 і верстата з ЧПУ, амортизації основного і допоміжного обладнання, була проведена приблизна оцінка операційної собівартості виробництва. Відповідні розрахунки показали операційну собівартість для титану трохи більше 50 доларів США за 1 кг готового виробу. Це відповідає загальноприйнятому на ринку адитивного виробництва показнику собівартості 3D друку одного кубічного сантиметра на рівні менше 0,3 долара США.

Таким чином, виконане тестове виготовлення реальної промислової деталі (диска двостулкового клапана діаметром 127 мм) дозволяє зробити наступні висновки:

технологія адитивного виробництва xBeam 3D Metal Printing підтвердила можливість її використання для швидкого і якісного виготовлення деталей з титанових сплавів;

продемонстровані задовільні механічні властивості (як міцність, так і пластичність) комерційно чистого титану марки Grade 4, отриманого пошаровим осадженням за технологією xBeam 3D;

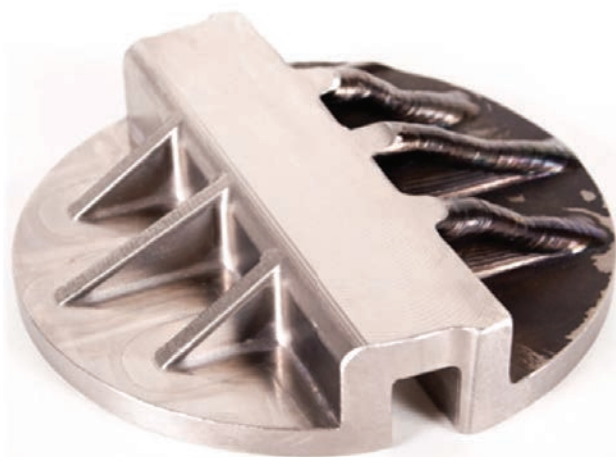


Рис. 7. Диск двостулкового клапана діаметром 127 мм після часткової механічної обробки

хороші механічні характеристики матеріалу, отриманого 3D друком з використанням технології xBeam 3D, демонструють можливість гнучкого використання альтернативних сплавів з близьким хімічним складом, що відкриває нові можливості при проектуванні промислових деталей з титану;

продемонстровані високі показники корисного використання як витратного матеріалу, так і повного виходу придатного, що враховує повну витрату матеріалів підкладки та дроту;

продемонстровано можливість виготовлення заготовки близької за формою до кінцевого виробу методом адитивного виробництва за технологією xBeam 3D за досить короткий час повного виробничого циклу;

попередні розрахунки показали операційну собівартість 3D друку за технологією xBeam 3D на рівні менше 0,3 долара США, що становить найменший показник серед існуючих технологій адитивного виробництва;

проведене дослідження дозволяє припустити можливість створення на базі технології xBeam 3D ефективний і зручний промисловий метод виготовлення складних деталей відповідального призначення, особливо з дорогих матеріалів.

Список літератури/References

- (2013) *Additive manufacturing. A game changer for the manufacturing industry?* Roland Berger Strategy Consultants GmbH. Additive manufacturing market outlook. Value chain — Market size — Key players — Business models.
- (2019) *3D Printing: hype or game changer?* A Global EY Report 2019.
- (2020) *Metal additive manufacturing.* The AMPower Report 2020.
- Wohlers Report 2020. 3D Printing and additive manufacturing state of the industry annual worldwide progress report. ISBN 978-0-9913332-3-3.

5. Norsk titanium to deliver the world's first FAA-approved, 3D-Printed, structural titanium components to boeing. *Business wire*. <https://www.businesswire.com/news/home/20170410005330/en/Norsk-Titanium-Deliver-World%E2%80%99s-FAA-Approved-3D-Printed-Structural>
6. Lockheed M. (2018) *3D Prints large titanium domes for satellite fuel tanks*. Sarah saunders. Jul 12, 2018, *3D printing, aerospace 3D Printing, metal 3D Printing*. <https://3dprint.com/219196/lockheed-martin-fuel-tank-domes/>
7. Chaplais C. (2016) *Challenges to a wider adoption of additive manufacturing in the industry*. *Manufacturing transformation blog*. <http://www.aprison.com/blog/2016/07/7-challenges-to-a-wider-adoption-of-additive-manufacturing-in-the-industry-part-1/>
8. (2015) The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, **69**, 65–89.
9. Sand M. (2019) The TRUE economics of metal additive manufacturing: What you need to know to succeed. *3D Printing*, Apr. 23. <https://3dprint.com/242023/the-true-economics-of-metal-additive-manufacturing-what-you-need-to-know-to-succeed/>
10. (2020) The 3 reasons your 3D Printed parts are so expensive. *3D Printing*. *Team blueprint*. March 3. <https://3dprint.com/264099/the-3-reasons-your-3d-printed-parts-are-so-expensive/>
11. ISO/ASTM 52900:2015 (ASTM F2792). *Additive manufacturing general principles — terminology*.
12. AMS 4999.
13. AMS 7004.
14. *Method of manufacturing of 3D objects and device for its realization*. Ukraine, Pat. 112682 [in Ukrainian]
15. Kovalchuk D., Melnyk V., Melnyk I., Tugai B. (2016) Prospects of application of gas-discharge electron beam guns in additive manufacturing. *Electrotechnic and Electronic (E+E)*, **5–6**, 36–42.
16. Makhnenko, O.V., Milenin, A.S., Velikoivanenko, E.A. et al. (2017) Modelling of temperature fields and stress-strain state of small 3D sample in its layer-by-layer forming. *The Paton Welding J.*, **3**, 11–19.

xBeam 3D Metal Printing technology on the path to industrial production

D.V. Kovalchuk, V.G. Melnik, I.V. Melnik, B.A. Tugai

PJSC «SPA «Chervona Hvylya».

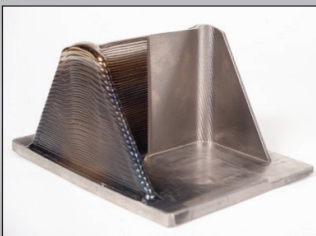
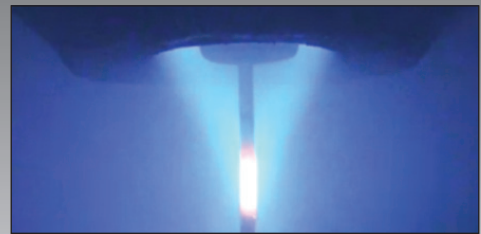
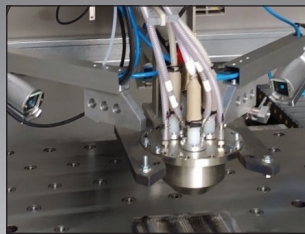
28 Dubrovyska Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: info@xbeam3d.com

The possibility of introduction of a new electron beam technology of adaptive manufacturing xBeam 3D Metal Printing into industry was studied. The ability to produce a net-shape blank, using xBeam 3D Metal Printing adaptive manufacturing is demonstrated, and economic advantages of the proposed technology application over the traditional methods of metal product manufacturing are substantiated. Ref. 16, Tabl. 1, Fig. 7.

Key words: electron beam technology; additive manufacturing; 3D printing; metal; titanium; properties; deposition

Надійшла до редакції 27.07.2020

Система xBeamGrand для 3D друку металів



Ключовою відмінністю технології xBeam 3D Metal Printing є можливість подачі дроту для 3D друку коаксіально з електронним променем у вигляді порожнистого конуса, який генерується низьковольтною газорозрядною електронною гарматою.

Вироби, виготовлені за технологією xBeam 3D Metal Printing для різних галузей промисловості, мають високу якість та вимагають лише незначної механічної обробки.



ПрАТ «НВО «Червона Хвиля»
E-mail: info@xbeam3d.com

