

УДК 621.791

Олексій Швець, кандидат технічних наук, доцент, Сергій Березовецький, кандидат технічних наук, доцент, Петро Коруняк, кандидат технічних наук, доцент
Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького, Україна

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ АДИТИВНОГО ЕЛЕКТРОДУГОВОГО
НАПЛАВЛЕННЯ**

Анотація. В роботі досліджено вплив режимів зварювання на геометричні параметри та твердість поверхонь, отриманих за технологією адитивного наплавлення. В результаті досліджень встановлено суттєву різницю характеристик поверхонь. Комплексна оцінка якісних характеристик наплавлених поверхонь дає можливість в повній мірі оцінити придатність даної технології до практичного застосування.

Ключові слова: адитивна технологія, наплавлення, режим зварювання, характеристики поверхні.

Oleksii Shvets, Serhiy Berezovetskyi, Petro Koruniak

STUDY OF ADDITIVE ELECTRIC ARC WELDING TECHNOLOGY

Abstract. The work investigates the influence of welding modes on the geometric parameters and hardness of surfaces obtained by additive surfacing technology. As a result of the research, a significant difference in surface characteristics was established. A comprehensive assessment of the qualitative characteristics of deposited surfaces makes it possible to fully assess the suitability of this technology for practical application.

Keywords: additive technology, surfacing, welding mode, surface characteristics.

В сучасних технологічних процесах виготовлення заготовок та деталей, а також відновлення їх геометрії все частіше застосовуються адитивні технології, зокрема процес Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). Це різновид технології адитивного виробництва, яка базується на використанні джерел для електродугового зварювання та різноманітних присадкових матеріалів [1]. Він побудований на принципі пошарового наплавлення валиків металу. На відміну від процесу зварювання, в адитивних процесах намагаються досягати мінімального проплавлення деталі (основи) та перемішування металу кожного наступного шару з попереднім. Це забезпечується шляхом підбору оптимальних режимів роботи сучасних зварювальних джерел, які мають широкий діапазон налаштування та регулювань.

З поміж усіх відомих способів адитивного наплавлення суттєвого розвитку набули технології наплавлення плавким електродом у середовищі захисних газів Gas Metal Arc Welding (GMAW) [1, 2, 4]. Основними перевагами їх використання в адитивному виробництві є: достатньо висока точність формування валиків; незначна кількість контрольованих параметрів режиму наплавлення, що сприяє простоті керування процесом та його автоматизації; простота, доступність та відносно низька вартість обладнання.

Мета роботи – дослідити вплив процесів зварювання, які забезпечує зварювальне джерело живлення, на характеристики поверхонь виробів, отриманих методом адитивного дугового наплавлення.

Для досліджень технологічного процесу GMAW наплавлення використовували комплект обладнання фірми Fronius, до якого входить зварювальне джерело живлення CMT 4000 Advanced, механізм подачі дроту VR 7000 CMT, пульт дистанційного керування RCU 5000i, пальник Robacta Drive CMT з шланговим пакетом Fronius

ROBOTER BRENNER та дрововим буфером [3, 5]. Переміщення зварювального пальника по траєкторії накладання валиків для формування наплавленої поверхні здійснювався за допомогою колаборативного робота-маніпулятора UR-10. Загальний вигляд експериментальної установки показаний на рис. 1.

Під час досліджень задавались три різні режими роботи джерела живлення: Standard – стандартний; Impulse – імпульсний; Cold Metal Transfer (CMT) – холодне перенесення металу. На цих режимах здійснювали адитивне наплавлення зразків для подальшого дослідження їх впливу на характеристики отриманих поверхонь.

Процес GMAW наплавлення виконувався на мінімальних можливих значеннях зварювального струму. Процес та струм зварювання задавався за допомогою пульта дистанційного керування RCU 5000i. В якості наплавленого матеріалу використовувався зварювальний дріт ER70S-6 діаметром 1,0 мм. Для захисту дуги й наплавленого шару металу застосовували зварювальну газову суміш 82 % Ar + 18 % CO₂.

Фото експериментальних зразків, виконаних за допомогою процесів CMT, Impulse та Standard наведені на рис. 1.



Рисунок 1 – Процес адитивного наплавлення та експериментальні зразки, отримані в процесі CMT (а), Impulse (б) та Standard (в) наплавлення

Отриману форму валиків для кожного з досліджуваних процесів оцінювали за коефіцієнтом форми:

$$k_{\phi} = \frac{a}{b}$$

Встановлено, що при наплавленні в процесі CMT висота валиків перевищує їх ширину в середньому на 27 %, а їх форма характеризується коефіцієнтом $k_{\phi} = 1,36$. Крім того процес CMT забезпечує малі тепловкладення в деталь, що в сукупності є хорошою передумовою побудови тонкостінних поверхонь. Процеси Standard та Impulse вирізняються більшими тепловкладеннями, меншою висотою та значно більшою шириною валиків. Коефіцієнт їх форми є меншим одиниці і становив $k_{\phi} = 0,43$ і $k_{\phi} = 0,39$ відповідно. Тому дані процеси краще підходять для наплавлення широкими валиками та побудови поверхонь з товщиною стінки понад 5 мм.

Експериментальні дослідження показали, що процес наплавлення також впливає на геометричні параметри (висоту та товщину) отриманих виробів. Так, процес CMT в порівнянні з процесами Standard та Impulse, дозволяє отримати за заданої кількості циклів наплавлення більшу висоту виробу ($h = 20-22$ мм) при мінімальній товщині

наплавленого шару ($\delta = 3,5-4$ мм). За рахунок менших значень коефіцієнта форми валиків, які вдавалося наплавляти за один цикл, висота експериментального зразка, отриманого з використанням процесу Standard становила $h = 16-18$ мм при товщині наплавленого шару $\delta = 6,0-7,0$ мм.

Для процесу Impulse дані параметри виробу становили: $h = 14-15$ мм; $\delta = 5,5-6,0$ мм. В результаті можна стверджувати, що процес СМТ є кращим для виготовлення тонкостінних виробів.

Під час дослідження процесів GMAW наплавлення за технологією WAAM встановлено, що вироби, які мають форму замкнутого контуру з чітко вираженими кутами характеризуються суттєвим відхиленням параметрів h та δ в кутовій зоні, порівняно з прямолінійною частиною напавленої поверхні. Експериментальні дослідження показали, що відхилення висоти напавленої поверхні в кутовій зоні h_t може відрізнятись на 10,5-18,6 %, а відхилення по товщині δ_t – на 12,5-33,3 %. Причому, максимальні відхилення геометрії виробу в кутовій зоні характерні для зразків, напавлених методом Standard.

Ще однією важливою характеристикою досліджуваних процесів є нерівномірність поверхні отриманих зразків. З рис. 1,а видно, що поверхня зразка, отримана в процесі СМТ-напавлення має чітко виражені границі в зоні сплавлення сусідніх валиків. Поверхня зразка, отриманого за допомогою процесу Standard (рис. 1,б), має найбільшу нерівномірність і характеризується значними напливами шарів металу. Найкращої рівномірності поверхні вдалося досягти напавленням в процесі Impulse (рис. 1,в). Шари металу сплавлялися рівномірно без утворення западин в зоні сплавлення та підтікань.

Важливою характеристикою досліджуваного процесу є твердість напавленої поверхні. Дослідження твердості матеріалу напавлених зразків проводили за допомогою портативного твердоміра ТПУ-1.



Рисунок 2 – Дослідження твердості матеріалу за допомогою твердоміра ТПУ-1

- 1 - блок індикації; 2 – індентор;
- 3 – досліджуваний експериментальний зразок;
- 4 – експериментальні зразки

За результатами досліджень встановлено суттєву різницю між технологіями напавлення як за твердістю, так і за якістю формування шару. Так, для процесу СМТ характерні відносно стабільні значення твердості в межах 268–346 НL, при цьому основна частина результатів зосереджена у діапазоні 293–314 НL. Технологія Impulse забезпечує найнижчу твердість - у межах 246–295 НL, з переважанням значень 263–288 НL. В процесі Standard було отримано значення твердості в діапазоні від 272 до 346 НL.

Висновки. Дослідження процесів зварювання Standard, Impulse та Cold Metal Transfer, які здатні забезпечувати сучасні зварювальні цифрові джерела струму, показали суттєву різницю геометричних параметрів виробів, напавлених за їх допомогою. Стандартний процес зварювання (Standard), який можуть реалізовувати більшість зварювальних апаратів показав низьку ефективність його застосування для напавлення за технологією WAAM через значну нерівномірність напавлених шарів,

значні відхилення за геометричними параметрами виробу, суттєві тепловкладення та низьку якість наплавлених поверхонь та нерівномірну твердість поверхні. Процес СМТ в порівнянні з двома іншими, дозволяє наплавляти деталі тонкими високими валиками і отримувати тонкостінні вироби більшої висоти, характеризується мінімальними відхиленнями висоти та товщини виробів, які мають чітко виражені кути і наплавлених по замкнутому контуру, а також дозволяє отримати достатню твердість і високу стабільність формування наплавленого шару. Процес імпульсного наплавлення (Impulse), на нашу думку, є кращим для формування поверхонь з більшої товщини. За його допомогою вдається досягти більшої рівномірності наплавленої поверхні з рівномірним сплавленням шарів металу та значних відхилень розмірів в кутових зонах виробу.

Загалом отримані результати свідчать про те, що при оцінюванні ефективності технологій наплавлення доцільно враховувати не лише максимальні значення твердості, а також якість формування поверхні, оскільки саме комплекс цих показників найбільш повно характеризує придатність технології до практичного застосування.

Перелік посилань

1. Квасницький В.В., Лагодзінський І.М. Вплив методів GMAW і PAW адитивного дугового наплавлення та складу захисного газу на геометричні характеристики поверхонь і структуру металу виробів. Журнал «Автоматичне зварювання», № 11, 2023, с. 23-31. <https://doi.org/10.37434/as2023.11.02>.
2. Лагодзінський І.М., Квасницький В.В., Гринюк А.А. Особливості використання СМТ та Pulse технологій при дуговому адитивному виготовленні просторових виробів. Зварювання та споріднені технології: перспективи розвитку : тези доп. V Міжнар. наук.-тех. конф. (м. Краматорськ, 19-20 жовт. 2021 р.). Краматорськ: Донбаська державна машинобудівна академія, 2021. с. 50-53.
3. Швець О.П., Талабко Ю.І. Технологічний комплекс для відновлення спрацьованих деталей наплавленням. Modern research in world science. Proceedings of the 5th International scientific and practical conference. SPC -Sci-conf.com.ua. Lviv, Ukraine. 2022. Pp. 281-285.
4. Kvasnytskyi V., Korzhyk V., Lahodzinkyi I. et al. (2020) Creation of volumetric products using additive arc cladding with compact and powder filler materials. IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP), pp. 02SAMA16-1–02SAMA16-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/NAP51477.2020.9309696>
5. Shvets O.P. The effect of the operating modes of the welding source on the hardness of the deposited metal. B: Shibaev AG, editor. SWorld &D.A. Tsenov Academy of Economics, 2025; 34 (01). 23-32. DOI: <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2025-34-01-031>.