

ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ КЕРУВАННЯ ФОРМУВАННЯМ МЕТАЛУ, НАПЛАВЛЕНОГО ПОРОШКОВИМИ ДРОТАМИ

А.А. Бабінець

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: a_babinets@ukr.net

Проведено комплексні порівняльні дослідження можливості керування формуванням та властивостями металу за рахунок зміни електричних параметрів при одношаровому дуговому наплавленні. У якості матеріалів використовувались електродні порошкові дроти діаметром 1,8...2,8 мм, які розроблено для трьох умов нанесення матеріалу – в середовищі захисних газів (GMAW), відкритою дугою (SSAW) та під флюсом (SAW). Металева частина дровів була розрахована таким чином, щоб отримати наплавлений метал типу теплостійкої інструментальної сталі 25X5ФМС. Дослідження виконувались у широкому діапазоні режимів: струм – 150...450 А, напруга – 20...32 В. Експериментально визначено оптимальні діапазони за величиною струму та напруги для кожного способу нанесення матеріалу та діаметру порошкового дроту, при яких забезпечується якісне формування наплавлених валиків, мінімальні глибина проплавлення та частка основного металу в наплавленому. Побудовано відповідні залежності впливу величини струму та напруги на геометричні розміри наплавлених валиків. Отримані експериментальні дані можуть бути використані у процесах адитивного виробництва при виборі оптимальних режимів дугового пошарового нанесення металічних матеріалів (WAAM) для виготовлення елементів деталей. Бібліогр. 11, табл. 3, рис. 4.

Ключові слова: дугове наплавлення, порошковий дріт, керування, режими наплавлення, формування наплавленого металу, розміри наплавлених валиків

Вступ. Відомо, що при електродуговому нанесенні металевих матеріалів формування наплавленого металу та його властивості у значній мірі визначаються електричними та технологічними параметрами процесу [1].

У сучасних умовах розвитку технологій постає питання щодо можливості використання порошкових металічних матеріалів для наплавлення та деяких методів наплавлення в адитивному виробництві. Йдеться про дугові пошарові методи нанесення матеріалу (WAAM – Wire Arc Additive Manufacturing), до яких, зокрема, відносяться такі технології як наплавлення в захисних газах (GMAW – Gas Metal Arc Welding або MIG/MAG Welding) і наплавлення методом холодного перенесення металу (CMT – Cold Metal Transfer) [2–9].

Процес дугового наплавлення порошковими дротами при виготовленні деталей в середовищі захисних газів (GMAW) або відкритою дугою (SSAW – Self-Shielded Arc Welding) при вирішенні деяких задач фактично можна віднести до вищезгаданої технології адитивного виробництва за єдиної умови, що механічна обробка наплавленого таким чином виробу має бути відсутньою або мінімальною [6].

Тому першочерговим завданням при дослідженні можливості використання дугових методів наплавлення та матеріалів для наплавлення в адитивному виробництві є визначення закономірностей впливу параметрів режиму наплавлення на геометричні розміри та якість формування наплавлених валиків.

Метою роботи є експериментальне дослідження можливості керування формуванням та властивостями металу, отриманого різними методами

дугового наплавлення порошковими дротами одного хімічного складу, але різного діаметру, за рахунок зміни електричних параметрів наплавлення.

Матеріали та методики досліджень. Для проведення порівняльних досліджень було виготовлено дев'ять дослідних партій порошкових дровів для наплавлення в середовищі захисних газів (80 % Ar + 20 % CO₂), відкритою дугою (самозахисним порошковим дротом) та під шаром флюсу (АН-26П) діаметрами 1,8; 2,4 і 2,8 мм. Металева частину шихти всіх порошкових дровів розраховували таким чином, щоб одержати наплавлений метал одного типу – 25X5ФМС. У якості основного металу використовували пластини зі сталі Ст3 завтовшки 15 мм. Величину напруги та струму під час експериментів змінювали в широкому діапазоні – 20...32 В та 150...450 А, враховуючи при цьому діаметр порошкового дроту. Швидкість наплавлення в усіх експериментах була постійною і складала 20 м/год. Наплавлення виконували на універсальній установці У-653, яку було під'єднано до джерела живлення ВДУ-505. Визначення середніх значень величини струму та напруги виконувалось за допомогою комп'ютерної інформаційно-вимірювальної системи [10].

У процесі експериментів виконували порівняльну експертну оцінку якості формування валиків, наплавлених в один шар за один прохід, визначали наявність пор та інших дефектів. Вимірювання ширини (e), висоти (g) та глибини проплавлення (h) наплавлених валиків, а також частки основного металу в наплавленому (γ_0), виконували за 6–8 макрошліфами, вирізаними з наплавлених заготовок. Усю отриману інформацію заносили в таблиці, після чого за отриманими даними будували графіки залежності відповідних параметрів наплавлених

валиків від режимів наплавлення. Для прикладу, інформацію, отриману при напавленні трьох зразків порошковим дротом діаметром 1,8 мм різними способами, наведено в табл. 1–3, а характерні макрошліфи напавлених зразків – на рис. 1.

Результати досліджень. Спосіб напавлення під шаром флюсу отримав найбільшого поширення при напавленні сильно зношених деталей. Однак використання цього методу для вирішення задач, близьких до адитивного виробництва, наприклад відновлення реборд колісної техніки,

суттєво обмежене через необхідність додаткового технологічного оснащення як для утримання рідкої зварювальної ванни, так і для утримання флюсу, що суттєво ускладнює виконання цієї операції. Тому інформацію, отриману в даних умовах, використовували в якості еталону, так як даний спосіб дозволяє в широких межах регулювати режими напавлення із отриманням якісно сформованого напавленого металу. Проте для нього характерною є значна глибина пропавлення та частка основного металу в напавленому [11].

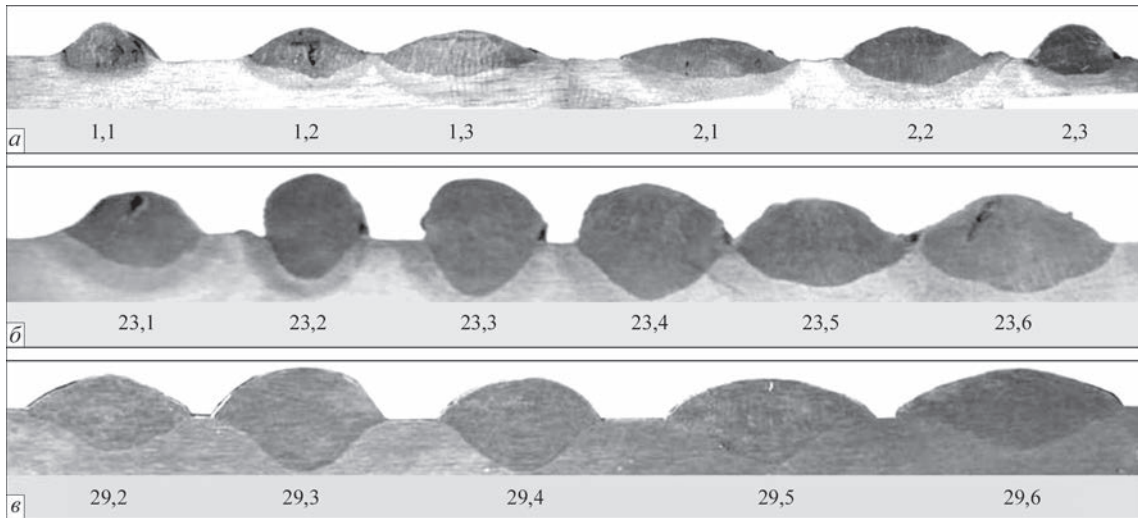


Рис. 1. Макрошліфи зразків, напавлених порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС діаметром 1,8 мм (познач. див. табл. 1–3): а – відкритою дугою; б – в середовищі захисних газів; в – під флюсом

Таблиця 1. Вплив режимів на формування валиків, напавлених самозахисним порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС діаметром 1,8 мм

Номер валка	Режим напавлення		Якість формування/наявність дефектів	Середні розміри валика, мм			$\gamma_{0\text{сеп}}$, %
	I, А	U, В		e	g	h	
1.1	178	20,3	Погане/Пори, свищі	5,4	1,6	1,1	33,5
1.2	183	23,5	Задовільне	7,2	1,4	1,9	42,8
1.3	185	25,8	Задовільне/Пори, свищі	9,8	1,2	2,1	50,5
2.1	212	26,3	Добре/Пори	10,4	1,0	1,3	53,0
2.2	218	23,4	Добре	8,8	1,7	1,5	45,0
2.3	213	20,2	Задовільне, вузький валик	6,3	2,1	1,2	35,0

Таблиця 2. Вплив режимів на формування валиків, напавлених в середовищі захисних газів порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС діаметром 1,8 мм

Номер валка	Режим напавл.		Якість формування/наявність дефектів	Середні розміри валика, мм			$\gamma_{0\text{сеп}}$, %
	I, А	U, В		e	g	h	
23.1	204	26,6	Задовільне	11,2	4,0	2,9	42,3
23.2	225	24,0	Задовільне, вузький валик	7,4	4,8	3,2	35,5
23.3	258	23,4	Задовільне	12,3	4,4	4,8	38,0
23.4	350	26,7	Добре	16,4	4,1	5,0	53,0
23.5	317	26,5	Добре	15,7	3,8	3,3	48,5
23.6	331	26,5	Добре	16,8	4,0	4,8	50,0

Таблиця 3. Вплив режимів на формування валиків, напавлених під флюсом порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС діаметром 1,8 мм

Номер валка	Режим напавл.		Якість формування/наявність дефектів	Середні розміри валика, мм			$\gamma_{0\text{сеп}}$, %
	I, А	U, В		e	g	h	
29.2	245	27,9	Задовільне	16,6	3,9	3,8	46,0
29.3	320	27,8	Добре	18,9	4,2	5,5	48,5
29.4	325	27,7	Задовільне	16,0	4,0	5,5	50,5
29.5	301	28,9	Добре	20,1	3,9	4,8	48,0
29.6	311	26,8	Добре	21,8	3,8	4,4	47,5

Графіки залежностей впливу електричних параметрів (величини струму та напруги) на геометричні характеристики валиків, наплавлених під флюсом, наведено на рис. 2. У всьому дослідженому діапазоні відмічено відсутність пор та інших дефектів в наплавленому металі.

Як видно з рис. 2, внаслідок збільшення струму, яке призводить до підвищення ефективної теплової потужності дуги, глибина проплавлення основного металу збільшується. Збільшення напруги прямо пропорційно впливає на зростання ширини валиків, але водночас призводить до деякого зменшення їх висоти. Унаслідок цього верхня частина валика отримує більш плоску форму, площа наплавленого металу зменшується, а проплавленого металу – зростає, що веде до росту частки основного металу в наплавленому.

Мінімальна величина глибини проплавлення та частки основного металу в наплавленому, при яких забезпечується якісне формування

наплавленого металу, у дослідженому діапазоні режимів при наплавленні під флюсом становить: 2,0 мм та 49...50 % (дріт діаметром 1,8 мм; $U = 30$ В, $I = 250$ А). Для діаметру порошкового дроту 1,8 мм оптимальними є наступні діапазони режимів: $U = 28...30$ В, $I = 220...300$ А; при цьому $h = 2,0...4,8$ мм, $\gamma_0 = 48...52$ %. Для діаметру 2,4 мм: $U = 28...30$ В, $I = 250...350$ А; при цьому $h = 3,7...5,4$ мм, $\gamma_0 = 48...56$ %. Для діаметру 2,8 мм: $U = 28...32$ В, $I = 250...400$ А; при цьому $h = 3,8...4,4$ мм, $\gamma_0 = 45...52$ %.

Застосування газового захисту розширює технологічні можливості у порівнянні з наплавленням під флюсом, дозволяючи наплавляти деталі складної форми із застосуванням різних просторових положень тощо. Фактично, як було сказано вище, при зведенні до мінімуму механічної обробки наплавлених поверхонь цей метод може успішно використовуватись в адитивному виробництві.

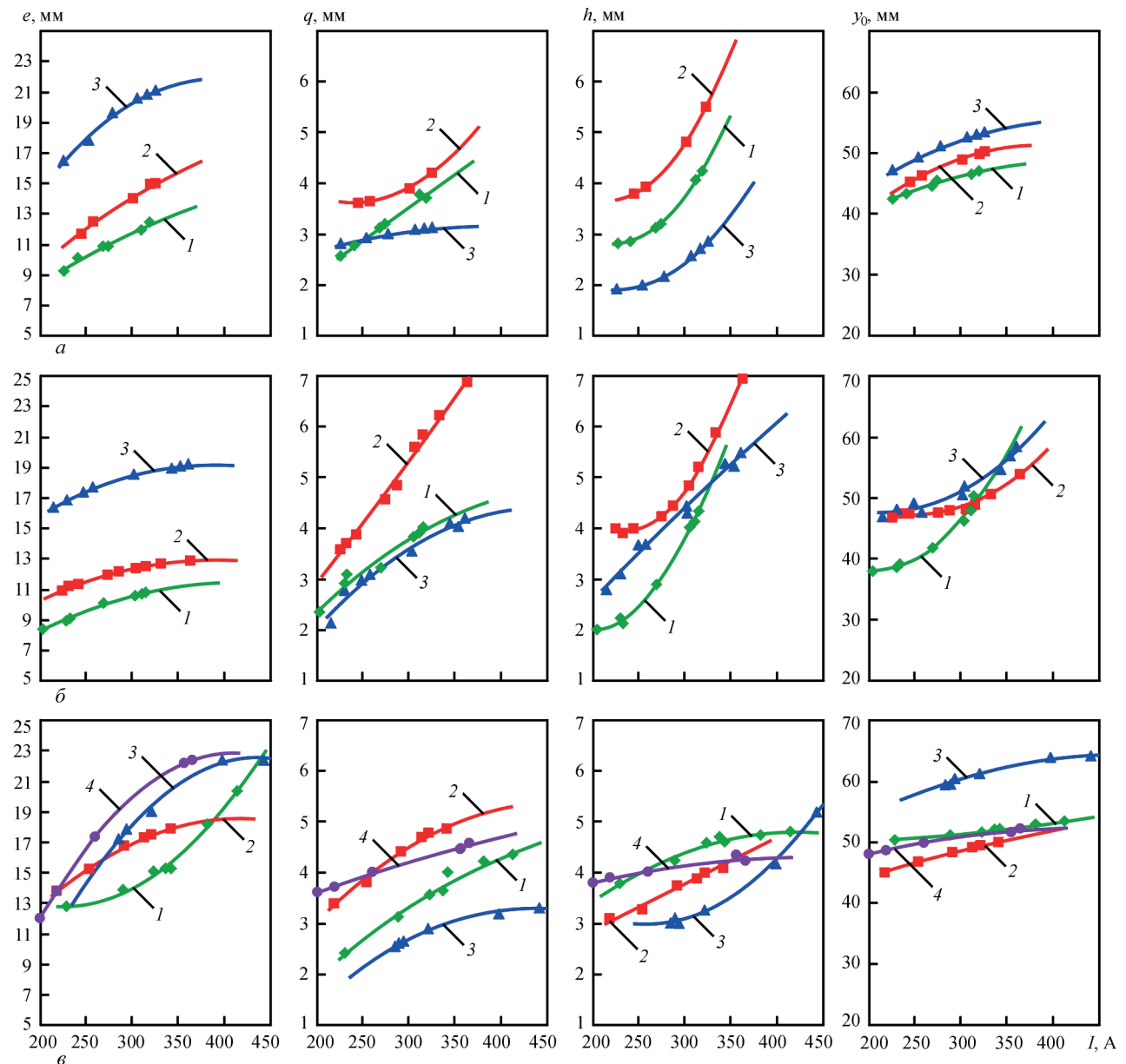


Рис. 2. Вплив струму та напруги на розміри валиків, наплавлених під шаром флюсу дротом Пп-Нп-25Х5ФМС діаметром 1,8 мм (а), 2,4 мм (б) та 2,8 мм (е): $U = 26$ В (1); 28 В (2); 30 В (3); 32 В (4)

Вплив величини струму та напруги на якість формування та розміри валиків, наплавлених в середовищі захисних газів, наведено на рис. 3.

З рис. 3 видно, що при наплавленні в середовищі захисних газів, як і при наплавленні під флюсом, підвищення струму та напруги, загалом призводить до збільшення глибини проплавлення, ширини наплавлених валиків і частки основного металу в наплавленому.

Можна відзначити меншу інтенсивність впливу величин струму та напруги на формування валиків у порівнянні з наплавленням під флюсом, що пояснюється меншим тепловим ККД даного способу через втрати на вигорання та розбризкування.

Для способу наплавлення в середовищі захисних газів мінімальна величина глибини проплавлення та частки основного металу в наплавленому складає відповідно 3,4 мм та 43...45 % (дріт діаметром 1,8 мм; $U = 26$ В, $I = 250$ А). Оптимальний

діапазон режимів, при якому забезпечується якісне формування наплавлених валиків для дроту діаметром 1,8 мм: $U = 26...27$ В, $I = 250...320$ А; при цьому $h = 3,4...3,8$ мм, $\gamma_0 = 45...50$ %. Для діаметру 2,4 мм: $U = 26...28$ В, $I = 270...350$ А; при цьому $h = 3,6...4,0$ мм, $\gamma_0 = 56...58$ %. Для діаметру 2,8 мм: $U = 27...29$ В, $I = 270...350$ А; при цьому $h = 3,2...3,7$ мм, $\gamma_0 = 60...64$ %.

Наплавлення відкритою дугою (самозахисним порошковим дротом) має ряд переваг перед розглянутими вище способами наплавлення, наприклад не потребує додаткового захисту зварювальної ванни від навколишнього середовища, однак має й основний недолік, який обмежує широке використання даного способу – це досить вузький діапазон допустимих режимів наплавлення, відхилення від якого веде до погіршення якості формування наплавленого металу та утворення

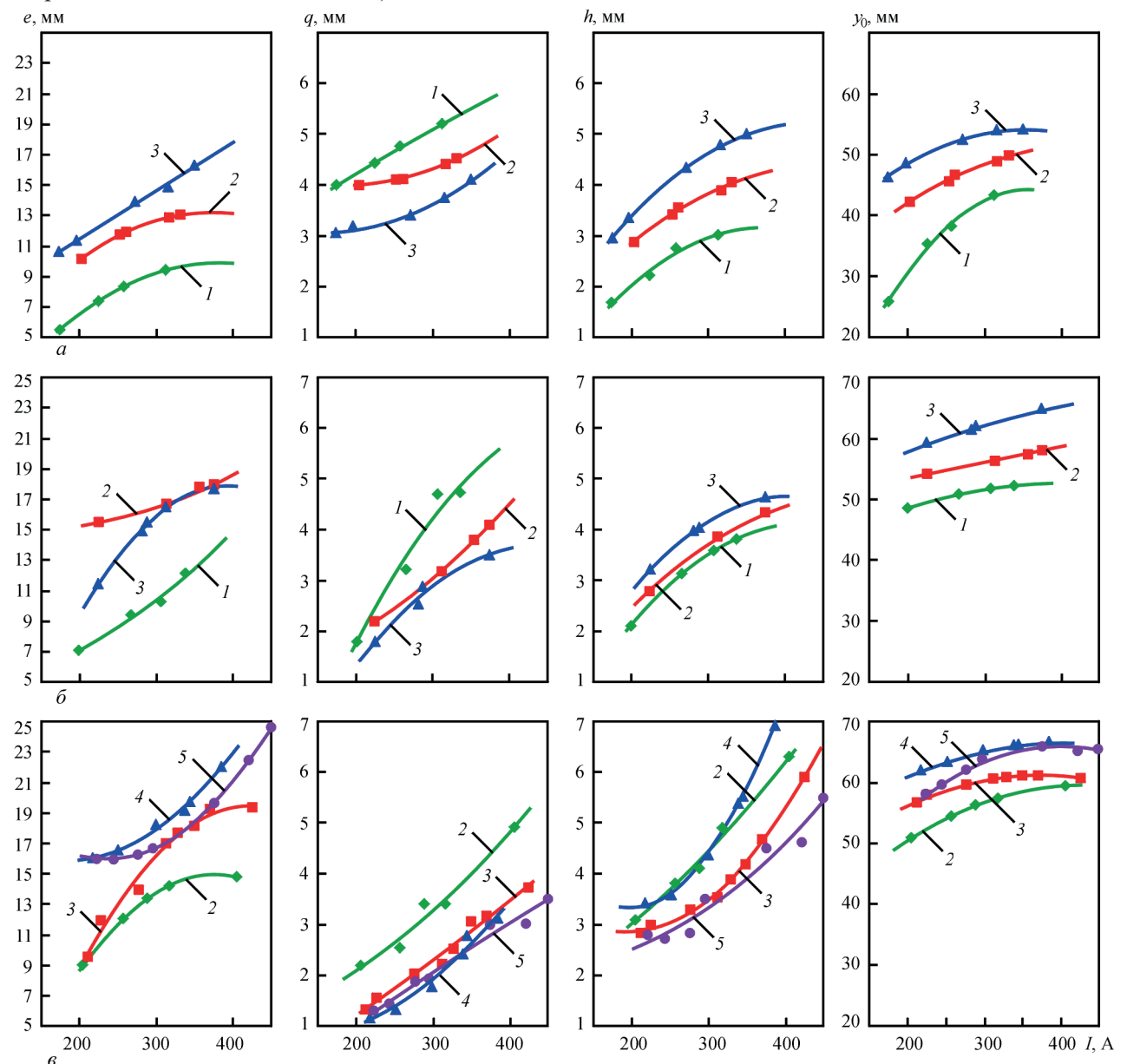


Рис. 3. Вплив струму та напруги на розміри валиків, наплавлених в середовищі захисних газів дротом Пп-Нп-25Х5ФМС діаметром 1,8 мм (а), 2,4 мм (б) та 2,8 мм (в): $U = 24$ В (1); 26 В (2); 28 В (3); 30 В (4); 32 В (5)

пор. Цей фактор може бути проблемою при розробленні технології адитивного виробництва.

Дослідження впливу електричних параметрів на формування металу при наплавленні відкритою дугою показали (рис. 4), що в даному випадку відстежується аналогічний вплив величини струму та напруги на геометричні розміри валиків, як і для двох попередніх способів.

Збільшення величини струму при незмінній величині напруги призводить до різкого збільшення глибини проплавлення та утворення високих і вузьких валиків. Це пов'язано з інтенсивнішим витисненням рідкого металу з-під електрода внаслідок збільшення тиску дуги та росту погонної енергії.

Напруга дуги мало впливає на глибину проплавлення, але суттєво впливає на ширину та висоту наплавлених валиків, якість формування та наявність дефектів в наплавленому металі. При занадто малих і занадто великих значеннях напруги формування ва-

ликів погане, у них наявні пори. Для цього способу є характерним дуже вузький діапазон «оптимальних» режимів, у першу чергу за величиною напруги.

Мінімальна глибина проплавлення та частка основного металу в наплавленому, при якому забезпечується якісне формування наплавленого металу при наплавленні відкритою дугою, складає 1,6 мм та 34...37 % (дріт діаметром 1,8 мм; $U = 22$ В, $I = 220$ А).

Для порошкового дроту діаметром 1,8 мм оптимальним є діапазон режимів: $U = 22...24$ В, $I = 200...250$ А; при цьому $h = 1,6...2,4$ мм, $\gamma_0 = 37...40$ %. Для діаметру 2,4 мм: $U = 22...24$ В, $I = 210...300$ А; при цьому $h = 1,6...2,4$ мм, $\gamma_0 = 38...52$ %. Для діаметру 2,8 мм: $U = 23...25$ В, $I = 220...300$ А; при цьому $h = 2,0...2,6$ мм, $\gamma_0 = 48...54$ %.

Для всіх розглянутих вище способів наплавлення слід відзначити наявність таких діапазонів на-

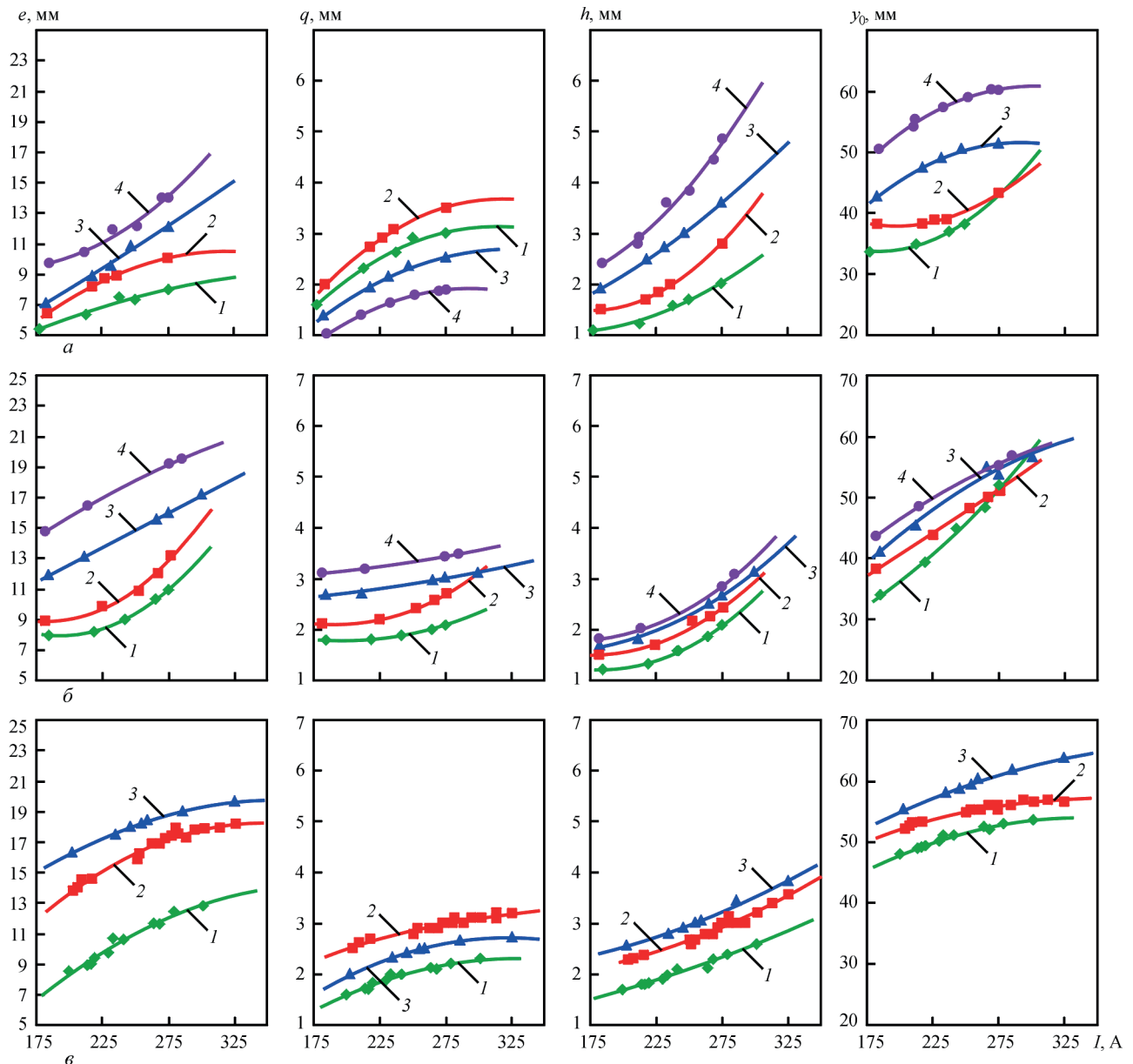


Рис. 4. Вплив струму та напруги на розміри валиків, наплавлених самозахисним дротом Пп-Нп-25Х5ФМС діаметром 1,8 мм (а), 2,4 мм (б) та 2,8 мм (в): $U = 20$ В (1); 22 В (2); 24 В (3); 26 В (4); 28 В (5); 30 В (6)

плавлення, для яких підвищення струму та напруги призводить до менш різкого збільшення глибини проплавлення та частки основного металу в наплавленому або навіть до їх деякого зменшення. Це пояснюється співвідношенням величин струму та напруги в кожному випадку, від яких залежить теплова потужність і тиск дуги та, відповідно, швидкість росту площ наплавленого та розплавленого металів. Крім того, на глибину проплавлення та частку основного металу впливає величина густини струму, тому в деяких діапазонах значень сили струму глибина проплавлення для дротів більшого діаметру може бути меншою або ж дорівнювати отриманій при наплавленні дротом меншого діаметру.

Висновки

1. Визначено оптимальні діапазони величини струму та напруги для дугового наплавлення порошковими дротами діаметром 1,8; 2,4 та 2,8 мм в середовищі захисних газів, відкритою дугою та під флюсом з точки зору отримання якісного сформованих наплавлених валиків, відсутності дефектів і мінімальних глибини проплавлення та частки основного металу в наплавленому. Визначені залежності можуть бути використані при розробці технології адитивного виробництва, заснованій на WAAM-методах, у першу чергу – GMAW-технології.

2. Для способу наплавлення в середовищі захисних газів (GMAW) і діаметру порошкового дроту 1,8 мм мінімальна величина глибини проплавлення та частки основного металу в наплавленому складає відповідно 3,4 мм та 43...45 % при $U = 26$ В, $I = 250$ А, $V = 20$ м/год.

3. Найменші величину глибини проплавлення та частку основного металу в наплавленому можна отримати при наплавленні відкритою дугою порошковим дротом діаметром 1,8 мм на режимі $U = 22$ В, $I = 220$ А; при цьому $h = 1,6$ мм, $\gamma_0 = 37$ %. Проте через наявність незначної кількості шлакового покриву та бризок на поверхні на-

плавлених валиків даний спосіб важко застосувати для адитивного виробництва.

Список літератури/References

1. Рябцев И.А., Кусков Ю.М., Переpletчиков Е.Ф., Бабинец А.А. (2021) *Наплавка. Управление проплавлением основного металла и формированием наплавленных слоев*: монография. Рябцев И.А. (ред.). Киев, Интерсервис. Ryabtsev, I.A., Kuskov, Yu.M., Pereplyotchikov, E.F., Babinets, A.A. (2021) *Surfacing. Control of base metal penetration and formation of deposited layers*: Monography. Ed. by I.A.Ryabtsev. Kyiv: Interservice [in Russian].
2. *The Future for WAAM*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://additivemanufacturing.com/2019/08/27/the-future-for-waam/>
3. Wohlers, T. (2014) *Additive manufacturing and 3D-printing state of the industry*: Annual worldwide progress report, Wohlers Associates.
4. Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D. et al. (2015) Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *The Int. J. of Adv. Manuf. Technol.*, 81(4), 465–481. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>
5. Bonaccorso, F., Cantelli, L., Muscato, G. (2011) Arc welding control for shaped metal deposition process. *IFAC Proceedings Volumes*, 44(1), 11636–11641. DOI: <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.01575>
6. Ding, D., Shen, C., Pan, Z. et al. (2016) Towards an automated robotic arc-welding-based additive manufacturing system from CAD to finished part. *Computer-Aided Design*, 73, 66–75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.12.003>
7. Prado-Cerqueira, J.L., Dieguez, J.L., Camacho, A.M. (2017) Preliminary development of a Wire and Arc Additive Manufacturing system (WAAM). *Procedia Manufacturing*, 13, 895–902. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.154>
8. *CMT – Cold Metal Transfer: The cold welding process for premium quality*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/world-of-welding/fronius-welding-processes/cmt>
9. Cong, B., Ding, J., Williams, S. (2015) Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al–6.3%Cu alloy. *The Int. J. of Adv. Manuf. Technol.*, 76, 1593–1606. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6346-x>
10. Ryabtsev, I.A., Lankin, Yu.N., Soloviov, V.G. et al. (2015) Computer information-and-measuring system for investigation of arc surfacing processes. *The Paton Welding J.*, 9, 32–35. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.09.05>
11. Babinets, A.A., Ryabtsev, I.A., Panfilov, A.I. et al. (2016) Influence of methods of arc surfacing with flux-cored wire on penetration of base metal and formation of deposited metal. *The Paton Welding J.*, 11, 17–22. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.11.03>

TECHNOLOGICAL METHODS OF CONTROLLING THE FORMATION OF METAL DEPOSITED BY FLUX-CORED WIRES

A.A. Babinets

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: a_babinets@ukr.net

Integrated comparative studies of the possibility of controlling formation and properties of metal by changing the electric parameters in single-layer arc surfacing were conducted. The materials used were flux-cored electrode wires of 1.8 – 2.8 mm diameter, which were developed for three conditions of material deposition: in shielding gas atmosphere (GMAW), with open arc (SSAW) and submerged-arc (SAW). Metal part of the wires was designed so as to produce deposited metal of the type of heat-resistant tool 25Kh5FMS steel. Studies were conducted in a broad mode range: current of 150...450 A, and voltage of 20...32 В. The optimal ranges of current and voltage were experimentally determined for each material deposition method and flux-cored wire diameter, which ensure sound formation of the deposited beads, minimal penetration depth and dilution of deposited metal by base metal. Respective dependencies of the influence of current and voltage on the deposited bead geometry were plotted. Obtained experimental data can be used in the processes of additive manufacturing at selection of optimal modes of layer-by-layer arc deposition of metal materials – wire arc additive manufacturing (WAAM) of part elements. 11 Ref., 3 Tables, 4 Fig.

Keywords: arc surfacing, flux-cored wire, control, surfacing modes, deposited metal formation, deposited bead dimensions

Надійшла до редакції 19.10.2023