

УДК 621.791.92

КЕРУВАННЯ ФОРМУВАННЯМ СТРУКТУРИ МЕТАЛУ, НАПЛАВЛЕНОГО ДУГОВИМ МЕТОДОМ ПОРОШКОВИМИ ДРОТАМИ

І. О. РЯБЦЕВ, А. А. БАБІНЕЦЬ, І. П. ЛЕНТЮГОВ

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ

Досліджено керування проплавленням, часткою основного металу в наплавленому, а також формуванням та структурою металу, наплавленого дуговим методом на циліндричні та плоскі деталі самозахисними порошковими дротами ПД-Нп-25Х5ФМС діаметром 1,8...2,8 mm. Встановлено, що на проплавлення та частку основного металу в наплавленому найбільше впливає струм наплавлення, а на стабільність процесу, якість формування наплавленого металу та дефекти у ньому – напруга дуги. З'ясовано, що за дугового наплавлення циліндричних деталей вказані вище показники змінюються зі зсувом осі електродного дроту (дуги) зі zenіту наплавленої деталі проти напрямку її обертання. Виявлено, що, змінюючи режими наплавлення, які призводять до зниження погонної енергії, можна керувати структурою наплавленого металу, зменшуючи ширину кристалітів та підвищуючи його мікротвердість. Використовуючи отримані результати, можна збільшити продуктивність наплавлення деталей, зменшуючи кількість наплавлених шарів.

Ключові слова: *дугове наплавлення, наплавлений валик, глибина проплавлення, якість формування, структура металу, порошковий дріт.*

Control of fusion penetration, the fraction of the base metal in the deposited material, as well as the formation and structure of the metal deposited by the arc method on cylindrical and flat parts with self-shielding powder-coated wires ПД-Нп-25Х5ФМС Ø 1.8...2.8 mm were experimentally studied. It was established that the welding current has the greatest influence on the fusion penetration and the fraction of the base metal in the deposited material, and the arc voltage affects the stability of the process, the quality of the deposited metal formation and the presence of defects in it. At the same time, during arc welding of cylindrical parts, the above indicators change with the shift of the axis of the electrode wire (arc) from the zenith of the cylindrical part that is being welded, against the direction of its rotation. It is shown that by changing the deposition modes, which lead to a decrease in the linear energy, it is possible to control the structure of the deposited metal, by decreasing the width of the crystallites and increasing its microhardness. The use of the results obtained in this work made it possible to increase the productivity of the welded parts by reducing the number of welded layers.

Keywords: *arc surfacing, deposited bead, fusion penetration depth, forming quality, metal structure, flux-cored wire.*

Вступ. Для відновлення поверхонь великогабаритних деталей зі значним зносом, зокрема валків вальцювальних станів, штампів гарячого та холодного штампування, футерувальних елементів грохотів, бункерів, кузовів кар'єрних самоскидів тощо, часто застосовують дугові методи наплавлення: під шаром флюсу, в середовищі захисних газів та відкритою дугою самозахисними порошковими дротами (ПД) [1–3]. Кожен з них має переваги і недоліки [4–13]. Зокрема, всі характеризуються значною глибиною проплавлення основного металу та часткою

Контактна особа: І. О. РЯБЦЕВ, e-mail: ryabtsev39@gmail.com

основного металу в наплавленому, яка може досягати 50% у першому шарі [1]. Тому для досягнення необхідного хімічного складу та властивостей наплавленого металу необхідно наплавляти 3–4 шари, через що знижується продуктивність процесу, підвищується ймовірність появи в ньому дефектів, збільшуються залишкові напруження та деформації тощо.

Встановлено [1], що, змінюючи параметри режиму наплавлення, можна впливати на глибину проплавлення та якість формування наплавлених шарів, їх геометричні розміри, властивості та структуру, а отже, вибрати оптимальні режими, щоб підвищити продуктивність процесу, зменшити залишкові деформації тощо. Однак ці результати стосуються зразків та деталей плоскої форми. Під час наплавлення циліндричних деталей на глибину проплавлення та характер формування наплавлених валиків суттєво впливає зміщення електрода зі zenіту, яке за деякими припущеннями [1] повинно дорівнювати довжині зварювальної ванни, а отже, залежати від діаметра деталі, швидкості її обертання, а також струму, напруги, температури виробу тощо.

Мета дослідження – експериментально вивчити можливості керування глибиною проплавлення, якістю формування та структурою металу, отриманого методами дугового наплавлення циліндричних та плоских деталей ПД, змінюючи електричні параметри процесу.

Методи випроб. Для оцінки особливостей процесу виготовили три дослідні партії ПД для наплавлення відкритою дугою самозахисним ПД-Нп-25Х5ФМС (система захисту $\text{CaO} + \text{TiO}_2 + \text{MgO} + \text{CaF}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$) діаметрами 1,8; 2,4 та 2,8 mm. Вміст металевої частини шихти всіх ПД розраховували так, щоб одержати наплавлений метал одного типу – інструментальну сталь 25Х5ФМС. Як основний метал використовували пластини зі сталі Ст3 товщиною 15 mm і циліндричні заготовки – труби із цієї сталі діаметром 125 mm з товщиною стінки 20 mm. Одержані під час наплавлення плоских зразків результати використовували як еталон.

Напругу та струм під час експериментів змінювали в широкому діапазоні – від 22 до 28 V та від 150 до 350 A, враховуючи діаметр ПД. Швидкість наплавлення становила 20 m/h. Оскільки використовували наплавлювані зразки однакового діаметра і однакової швидкості процесу, то зміщення електрода зі zenіту проти напрямку обертання зразка у всіх експериментах також було однакове і становило 10 mm.

Наплавлювали на універсальній установці У-653 зі джерелом живлення ВДУ-505. Середні значення струму та напруги визначали за допомогою комп'ютерної інформаційно-вимірювальної системи. Під час випроб оцінювали якість формування наплавлених валиків, появу пор та інших дефектів. Для визначення впливу електричних параметрів дугового наплавлення на ширину e , висоту g і глибину проплавлення h валиків, частку основного металу в наплавленому γ_0 наплавлені заготовки розрізали поперек валиків на окремі зразки, з яких виготовляли відповідні макрошліфи (рис. 1). Оскільки такі зразки в перерізі мали скошену форму (рис. 1с), для вимірювання вказаних вище параметрів розробили методику, засновану на методі простої пропорції.

Спочатку кожен макрошліф фотографували з розміщенням в одній площині з ним еталоном відомої довжини. Далі знімки імпортували в програму AutoCAD, де відповідним інструментом вирізали відрізки, за якими визначали довжину еталона B та розміри наплавленого валика. За довжиною кожного відрізка на екрані та враховуючи довжину еталона методом простої пропорції вираховували геометричні розміри валиків. Частку основного металу в наплавленому визначали як частку площі проплавленого F_b і суми площ F_d проплавленого та наплавленого металів. Відповідні площі встановлювали інструментом “Сплайн”, по черзі обводючи необхідні контури (рис. 1d). Потрібні характеристики кожного наплавленого

го валика визначали для 3–5 поперечних макрошліфів. Похибка вимірювань для отриманих знімків з високою роздільною здатністю (300 dpi) не перевищувала 1 рх або 0,09 mm. За одержаними результатами на одній координатній площині будували залежності геометричних розмірів валиків, наплавлених на плоскі та циліндричні деталі, від режимів наплавлення.

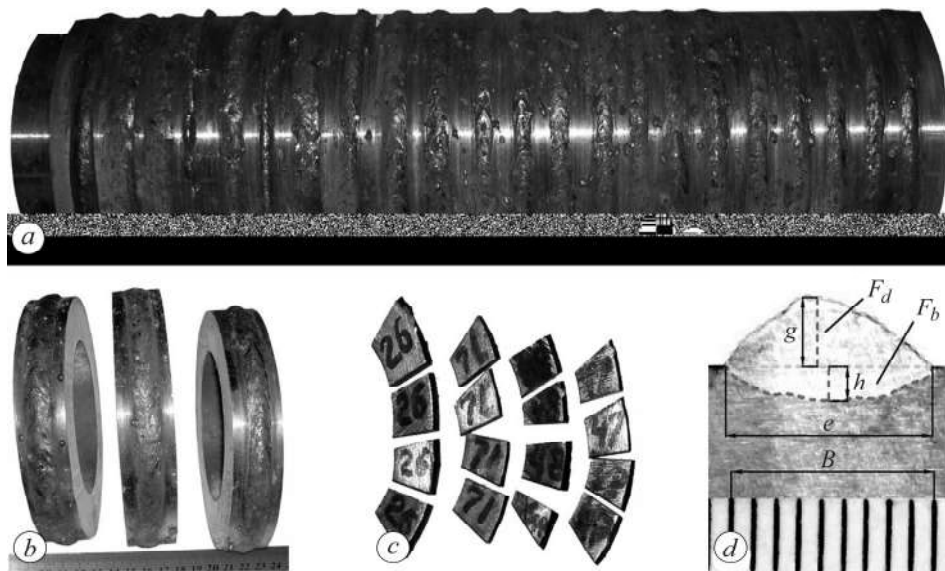


Рис. 1. Етапи виготовлення макрошліфів: *a, b* – циліндрична заготовка після наплавлення та розрізання; *c, d* – вирізані сегменти та підготовлений макрошліф.

Fig. 1. Stages of manufacturing macrosections: *a, b* – cylindrical workpiece after surfacing and cutting; *c, d* – cut segments and their macrosection.

Готували поверхні зразків для металографічних досліджень за стандартними методами, які охоплюють поетапне шліфування алмазними пастами різної дисперсності та подальше електролітичне травлення в 20%-му розчині хромової кислоти за напруги 20 V упродовж 3...5 s. Мікроструктуру вивчали на металографічному оптичному мікроскопі МІМ-7 з цифровим відео-окуляром Sigeta MCMOS-3100 за збільшення в 200–400 разів. Мікротвердість за Віккерсом вимірювали приладом LECO M-400 за навантаження на індентор 1 kg. Термічну тривкість зразків оцінювали за кількістю повторюваних циклів нагрівання (630...650°C) та охолодження водою (80°C) до моменту появи на напавленій поверхні розгалуженої сітки термічних тріщин [14].

Результати та їх обговорення. Загалом під час наплавлення і плоских, і циліндричних деталей ПД діаметром 1,8...2,8 mm (рис. 2–4) з підвищенням струму різко збільшується глибина проплавлення та утворюються вузькі валики через інтенсивніше витіснення рідкого металу з-під електрода внаслідок збільшення тиску дуги та зростання погонної енергії.

Напруга дуги слабше впливає на глибину проплавлення, але суттєво – на ширину і висоту наплавлених валиків та якість їх формування. За надто малої напруги валик вузький і високий. З її підвищенням збільшується його ширина і зменшується висота, оскільки зростає довжина дуги, а отже, підвищуються втрати на вигорання, розбризкування тощо. За підвищеної напруги валик надто широкий.

Вплив параметрів дугового наплавлення на частку основного металу описує складна залежність (рис. 2–4d). Загалом з ростом струму та напруги вона збільшується, проте є такі діапазони наплавлення, коли з підвищенням струму прак-

тично не змінюється або дещо зменшується. Це пояснюють співвідношенням значень струму та напруги, від яких залежить теплова потужність дуги, а отже, швидкість зростання площ наплавлення та розплавленого основного металу, що визначають його частку. Залежності впливу однакових режимів наплавлення і плоских, і циліндричних деталей на ширину і висоту валика практично ідентичні (рис. 2–4а, b).

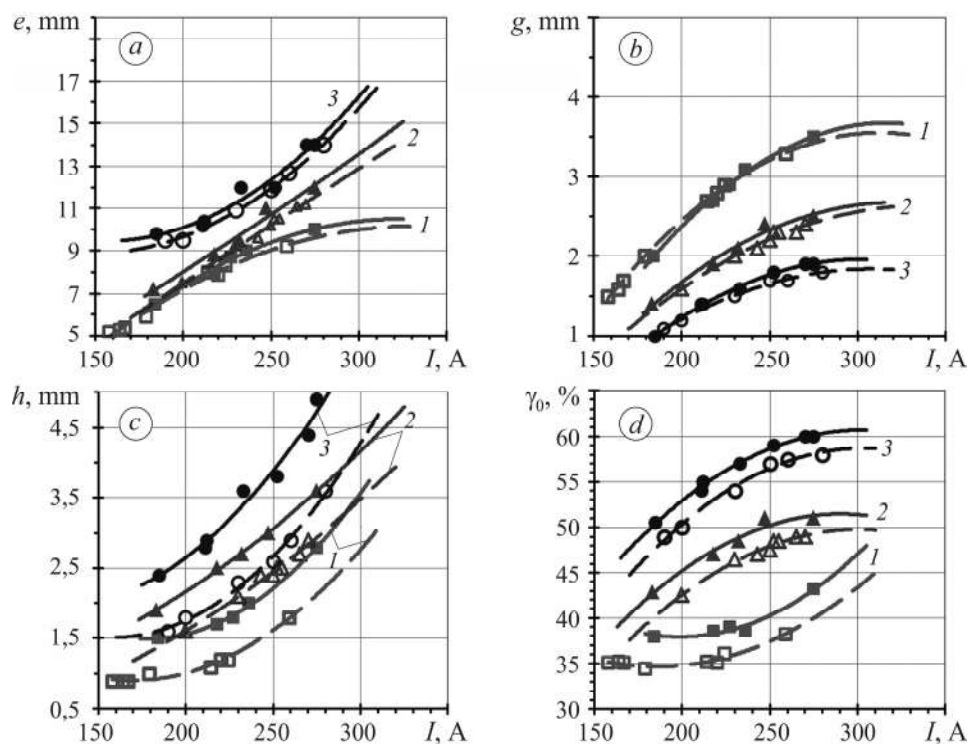


Рис. 2. Вплив струму та напруги на ширину (а) і висоту (b) валика, глибину проплавлення (с) та частку основного металу (d) за наплавлення дротом діаметром 1,8 mm плоских (суцільні лінії) та циліндричних (штрихові) деталей: 1 – $U = 22$ V; 2 – 24; 3 – 26.

Fig. 2. Influence of current and voltage on the width (a) and height (b) of the bead, the depth of fusion penetration (c) and the fraction of the base metal (d) during surfacing with a wire with a diameter of 1.8 mm on flat (solid lines) and cylindrical (dashed) details: 1 – $U = 22$ V; 2 – 24; 3 – 26.

Слід вказати на меншу глибину проплавлення основного металу та, відповідно, його частку під час наплавлення циліндричних деталей, ніж плоских, отриманих за однакових режимів (рис. 2–4с, d). Це пов'язано з тим, що в першому випадку на ці показники додатково впливає відстань від осі зеніту наплавлюваної поверхні до осі електрода (рис. 5).

Форма перерізу наплавленого валика залежатиме від урівноваження тиску дуги та гідростатичного тиску рідкої ванни. Якщо наплавлювана ділянка поверхні нахилена в той же бік, куди переміщається дуга, рівень рідкого металу в кратері підвищується і він ніби витісняє дугу. Це призводить до зменшення глибини проплавлення і валик набуває найсприятливішої форми (рис. 5b).

Нижче наведено експериментально визначені діапазони режимів наплавлення плоских та циліндричних деталей, за яких забезпечуються мінімальна, але достатня глибина проплавлення і частка основного металу в наплавленому, якісне формування наплавленого металу та відсутність дефектів. Зі зменшенням та збіль-

шенням напруги та струму за межами вказаних оптимальних діапазонів погіршується стабільність наплавлення, що спричиняє надто вузькі і високі або надто широкі і низькі валики, незадовільну якість формування їх поверхні та появу пор. Оптимальні діапазони наплавлення порошковим дротом ПД-Нп-25Х5ФМС такі:

– для дроту $\varnothing 1,8$ mm напруга становить 22...24 V за струму 200...250 A; при цьому для плоских зразків $h = 1,6...2,4$ mm, $\gamma_0 = 37...40\%$, для циліндричних, відповідно, 1,2...1,6 mm і 35...37%;

– для дроту $\varnothing 2,4$ mm напруга дорівнює 24...26 V за струму 220...270 A; при цьому для плоских зразків $h = 1,7...2,4$ mm, $\gamma_0 = 43...52\%$, для циліндричних, відповідно, 1,5...1,7 mm і 40...50%;

– для дроту $\varnothing 2,8$ mm напруга становить 25...26 V за струму 240...300 A; при цьому для плоских зразків $h = 2,3...2,9$ mm, $\gamma_0 = 50...56\%$, для циліндричних, відповідно, 1,9...2,2 mm і 49...52%.

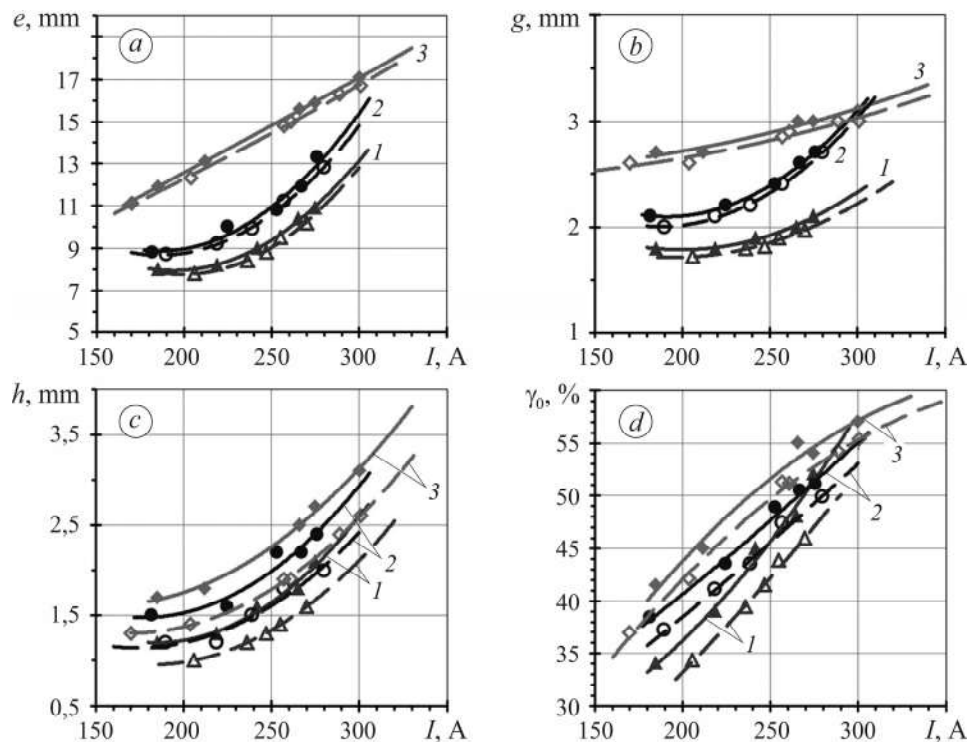


Рис. 3. Вплив струму та напруги на ширину (а) і висоту (б) валика, глибину проплавлення (с) та частку основного металу (д) за наплавлення дротом діаметром 2,4 mm плоских (суцільні лінії) та циліндричних (штрихові) деталей: 1 – $U = 24$ V; 2 – 26; 3 – 28.

Fig. 3. Influence of current and voltage on the width (a) and height (b) of the bead, the depth of fusion penetration (c) and the fraction of the base metal (d) during surfacing with a wire with a diameter of 2.4 mm on flat (solid lines) and cylindrical (dashed) details: 1 – $U = 24$ V; 2 – 26; 3 – 28.

Виявили, що мікроструктура металу типу 25Х5ФМС, наплавленого за різних режимів (з різною погонною енергією), складається з мартенситної матриці та залишкового аустеніту, розміщеного у вигляді включень як уздовж меж, так і у тілі кристалітів (рис. 6). Чіткої структурної неоднорідності у всіх наплавлених зразках не зафіксували. Встановили, що з підвищенням погонної енергії збільшується ширина кристалітів наплавленого металу і дещо знижується мікротвердість його матриці (табл. 1).

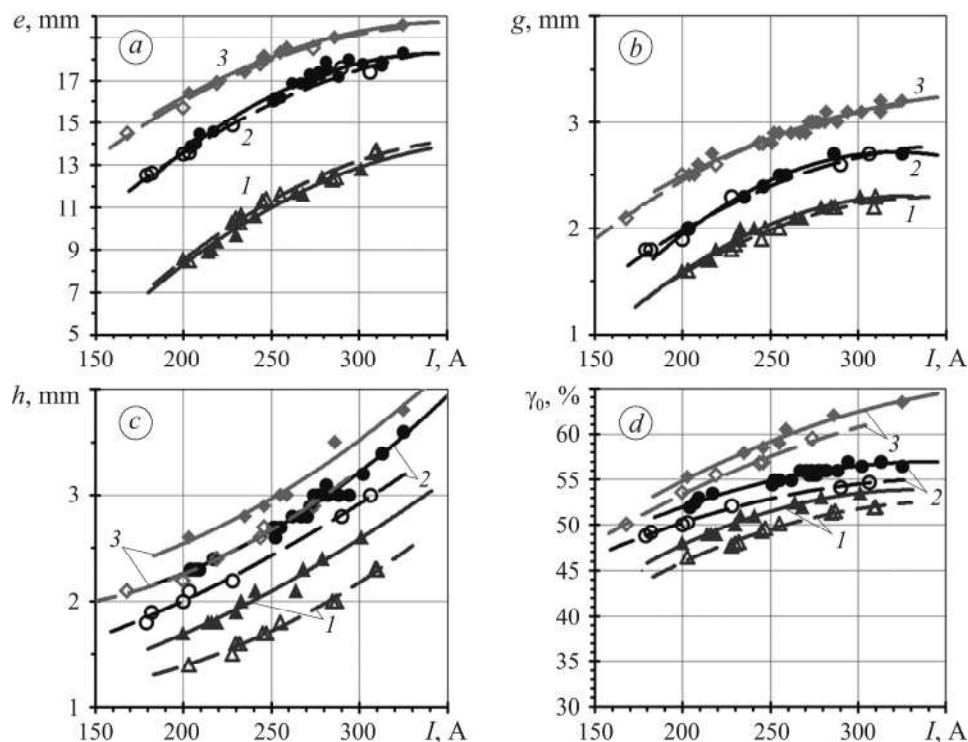
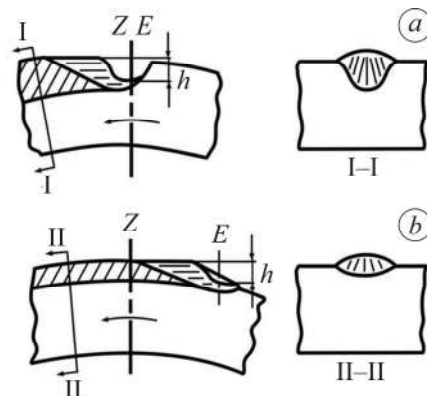


Рис. 4. Вплив струму та напруги на ширину (а) і висоту (б) валика, глибину проплавлення (с) та частку основного металу (д) за наплавлення дротом діаметром 2,8 мм на плоскі (суцільні лінії) та циліндричні (штрихові) деталі: 1 – $U = 24$ В; 2 – 26; 3 – 28.

Fig. 4. Influence of current and voltage on the width (a) and height (b) of the bead, the depth of fusion penetration (c) and the fraction of the base metal (d) during surfacing with a wire with a diameter of 2.8 mm on flat (solid lines) and cylindrical (dashed) details: 1 – $U = 24$ V; 2 – 26; 3 – 28.

Рис. 5. Вплив зміщення електрода зі zenіту на глибину проплавлення та форму перерізу наплавленого валика, якщо вісь електрода E збігається з віссю zenіту Z (а) і вісь електрода зміщена зі zenіту проти напрямку обертання (б).

Fig. 5. Effect of the electrode displacement from the zenith on the depth of fusion penetration and the shape of the section of the deposited bead for the cases when the axis of the electrode E coincides with the axis of the zenith Z (a) and when the axis of the electrode is displaced from the zenith (b).



Використовуючи отримані результати, досліджували вплив режимів наплавлення на властивості наплавленого металу. Встановили, що за наплавлення дротом ПД-Нп-25Х5ФМС за стандартного режиму (табл. 1, режим № 3) для досягнення заданого хімічного складу та твердості металу, згідно з технічними умовами [15], необхідно наплавити не менше 3–4 шарів. За оптимізованих режимів з меншою погонною енергією (режим № 1) внаслідок зменшення глибини проплавлення та частки основного металу в наплавленому отримали такі ж показники вже в другому наплавленому шарі (табл. 2).

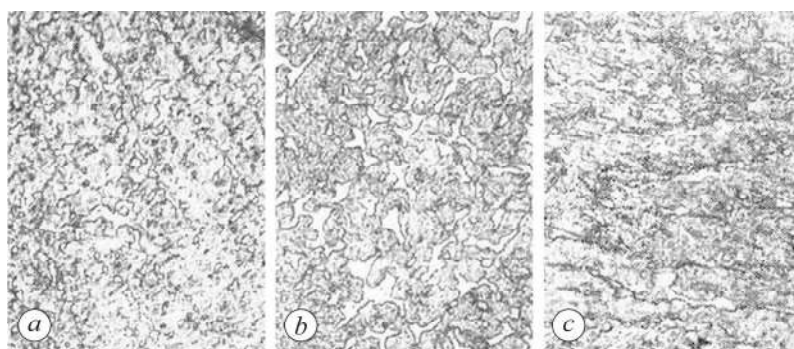


Рис. 6. Вплив режимів наплавлення на мікроструктуру металу 25Х5ФМС, наплавленого з різною погонною енергією: $a - q = 1740$, $b - 3050$ та $c - 4070$ cal/cm ($\times 200$).

Fig. 6. Influence of deposition modes on the microstructure of 25X5ΦMC metal deposited with different linear energies: $a - q = 1740$, $b - 3050$, and $c - 4070$ cal/cm ($\times 200$).

Таблиця 1. Вплив режимів наплавлення на структуру металу

№ режиму наплавлення	I , A	U , V	V_n , m/h	Погонна енергія q , cal/cm	Параметри структури	
					мікротвердість HV_1 , МПа	ширина кристалітів, μm
1	200	24	20	1740	4800...4830	40...50
2	300	28	20	3050	4210...4250	60...70
3	350	32	20	4070	4200...4230	60...100

Таблиця 2. Хімічний склад та твердість металу згідно з технічними умовами [15] (режим № 1) та наплавленого за стандартного (№ 2) і оптимізованого (№ 3) режимів

№ режиму наплавлення	Кількість шарів	Вміст легувальних елементів, mass%						Твердість, HRC
		C	Si	Mn	Cr	V	Mo	
1	3–4	0,22...0,33	0,7...1,2	0,4...1	4,7...5,9	0,3...0,6	0,9...1,5	45...53
2	3	0,26	0,79	0,64	5,5	0,4	1,01	50...52
3	2	0,25	0,76	0,56	5,4	0,37	0,99	49...51

За повторних циклів нагрівання–охолодження метал, наплавлений за оптимізованого режиму у два шари, не поступається за термостійкістю металу, наплавленому за стандартного режиму в три шари (табл. 3).

Таблиця 3. Вплив режимів наплавлення на термічну тривкість металу

№ режиму наплавлення	Кількість шарів	Кількість циклів нагрівання–охолодження до появи:		Середня глибина тріщин, mm
		дрібних тріщин	сітки тріщин	
2	3	67	180	0,32
3	2	70	180	0,25

При цьому глибина розповсюдження термічних тріщин менша, що, імовірно, пов'язано з подібненням мікроструктури металу, наплавленого за режиму з

меншою погонною енергією, а також з меншими залишковими наплавлювальними напруженнями внаслідок меншої кількості наплавлених шарів.

ВИСНОВКИ

На проплавлення та частку основного металу в наплавленому найбільше впливає струм наплавлення, а на стабільність наплавлення, якість формування наплавленого металу та появу дефектів у ньому – напруга дуги. Встановлено, що під час наплавлення відкритою дугою циліндричних та плоских деталей залежності впливу режимів наплавлення на ширину та висоту валика практично ідентичні. При цьому під час наплавлення за однакових режимів глибина проплавлення та частка основного металу в наплавленому менша, якщо вісь електрода (дуги) зміщена зі zenіту наплавлюваної циліндричної деталі проти напрямку її обертання. Визначено оптимальні діапазони режимів наплавлення самозахисними дротами ПД-Нп-25Х5ФМС діаметрами 1,8...2,8 mm, які забезпечують наплавлений метал з дрібнозернистою мікроструктурою з поліпшеними експлуатаційними властивостями.

1. *Surfacing Management of Penetration of the Base Metal and Formation of Deposited Layers* / I. A. Ryabtsev, Yu. M. Kuskov, E. F. Pereplechikov, and A. A. Babinets. – Kyiv: Interservis, 2021. – 392 p.
2. *Minnick W. H. Flux Cored Arc Welding Handbook*. – Illinois: Goodheart-Willcox, 2009. – 176 p.
3. *Walker J. R. and Polanin W. R. Shielded Metal Arc Welding*. – Illinois: Goodheart-Willcox, 2023. – 208 p.
4. *Pokhodnya I. K., Suptel A. M., and Shlepakov V. N. Flux-cored wire surfacing*. – K.: Naukova Dumka, 1972. – 224 p.
5. *Prediction of fill factor and charge density of self-shielding flux-cored wire with variable composition* / B. O. Trembach, D. V. Hlushkova, V. M. Hvozdettskyi, V. A. Vynar, V. I. Zakiev, O. V. Kabatskyi, D. V. Savenok, and O. Yu. Zakavorotnyi // *Materials Science*. – 2023. – **59**, № 1. – P. 18–25.
6. *Pulse-arc surfacing of corrosion-resistant austenitic-martensitic steel* / Yu. M. Kuskov, Kh. R. Zadorozhna, V. D. Makarenko, V. A. Tishchenko, G. N. Gordan, I. L. Bogaychuk, and T. V. Kaida // *Materials Science*. – 2022. – **58**, № 1. – P. 28–34.
7. *Ghazvinloo H. R. and Honarbakhsh-Raouf A. Effect of the robotic GMAW parameters on the HAZ width in HQ130 steel joints* // *Materials Science*. – 2022. – **57**, № 4. – P. 582–587.
8. *Vlasovets V. M., Ridniy R. V., and Antoshchenkov R. V. Elevation of hardness of the surfaces of renewable parts by economical microalloying* // *Materials Science*. – 2022. – **57**, № 6. – P. 865–872.
9. *Features of formation and destruction of clad layers cored wires system Fe–Cr–B–C for shock* / A. A. Voitovych, H. V. Pokhmurs'ka, M. M. Student, and O. Z. Student // *Problems of Tribology*. – 2016. – **78**, № 4. – P. 105–114.
10. *Mechanical characteristics and wear resistance of the cladding layers obtained by melting of cored wires with simultaneous vibration of substrate* / M. Student, A. Voitovych, H. Pokhmurs'ka, O. Maruschak, O. Student, and P. Maruschak // *Strojnicky Casopis*. – 2019. – **69**, № 1. – P. 109–122.
11. *Rosert R. Application of flux-cored wires for surfacing under industrial conditions* // *TPWJ*. – 2014. – № 6/7. – P. 60–64.
12. *Shlepakov V. N. Physical-metallurgical and surfacing-technological properties of gas-shielded flux-cored wires in surfacing of structural steels* // *TPWJ*. – 2014. – № 6/7. – P. 56–59.
13. *Lebedev V., Loy S., and Khalimovskyy O. Technical and technological impacts on metal crystallization during automatic and mechanized electric arc surfacing-surfacing* // *Sci. J. of the Ternopil National Techn. University*. – 2022. – № 3 (107). – P. 29–44.
14. *Methods of investigation of the deposited metal properties and their application for the development of flux cored wires* / I. O. Ryabtsev, A. A. Babinets, I. P. Lentugov, V. O. Zhdanov, I. I. Ryabtsev, and V. V. Osin // *Materials Science*. – 2023. – **59**, № 4. – P. 467–473.
15. *TUU 28.7.05416923.066–2002: Flux-cored wires for surfacing*. – Kyiv: PWI, 2002.

Одержано 02.11.2023