

ПРОГНОЗУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗВАРНОГО ШВА ПРИ ЕШЗ З БІФІЛЯРНОЮ СХЕМОЮ ПІДКЛЮЧЕННЯ ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ

В.Г. Соловійов, Ю.М. Ланкін, В.Г. Тюкалов, І.Ю. Романова

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: hhsova@gmail.com

Електрошлакове зварювання з біфілярною схемою живлення має багато позитивних властивостей. Результати аналітичних розрахунків і попередніх досліджень при живленні установки ЕШЗ з біфілярною схемою показують, що є реальна можливість управління процесом кристалізації зварного шва та величиною проплавлення кромок виробу. У роботі на розробленій математичній моделі проведений комплекс математичних експериментів по прогнозуванню основних параметрів якості зварного шва для біфілярної ЕШЗ зі зрівняльним дротом. В якості прогнозованих розглянуті такі параметри, як середнє значення глибини проплавлення кромок виробу, максимальне та мінімальне проплавлення кромок, доля основного металу в зварному шві, коефіцієнт форми металевої ванни. Запропоновано та проаналізовано на моделі параметр K_c , що характеризує рівномірність проплавлення кромок виробу. Отримано номограми прогнозованих параметрів. Бібліогр. 10, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: електрошлакове зварювання, біфілярна схема, глибина проплавлення кромок, металева ванна

Вступ. Електрошлакове зварювання (ЕШЗ) виконується різними способами, залежними в основному від типу електродів і схем підключення до джерела живлення. Напруга та швидкість зварювання, швидкість подання електродів і їх кількість, а також товщина виробу та величина проміжку визначаються для кожного конкретного випадку нормативною документацією. Основними параметрами зварного шва при ЕШЗ прийняті глибина проплавлення зварюваних кромок основного металу, що визначає ширину шва, і коефіцієнт форми металевої ванни (МВ), тобто відношення ширини шва до глибини МВ. Зміна глибини проплавлення кромок зварюваного металу впливає на долю основного металу в металі шва, що змінює його хімічний склад і тим самим механічні властивості. З цього виходить, що оптимальний режим ЕШЗ повинен забезпечити проплавлення кромок зварюваного металу на таку глибину, яка виключає появу непроварів у зварному з'єднанні, а також необхідну долю основного металу в металі шва. Коефіцієнт форми МВ значною мірою визначає стійкість зварного шва проти кристалічних тріщин.

Великий досвід використання біфілярних схем підключення джерела живлення для установок електрошлакових процесів накопичений при електрошлаковому переплаві (ЕШП) [1–5]. Для ЕШЗ біфілярна схема підключення установки до джерела живлення використовувалася тільки для зварювання чотирма електродами великого перерізу, включаючи зварювання пластинчатими та стрічковими електродами [6].

Математичному опису процесу ЕШЗ на відміну від процесу ЕШП присвячена порівняно невелика кількість публікацій. Проте досвід використання існуючих математичних описів можна застосувати і для процесів ЕШЗ з біфілярною схемою підключення джерела живлення зі зрівняльним дротом. У роботах [6, 7] аналізується взаємозв'язок глибини проплавлення вертикальних кромок з параметрами режиму ЕШЗ, описується метод наближеного розрахунку термічного циклу у високотемпературній області навколошовної зони при ЕШЗ. Розрахунок температурного поля проводився за схемою трьох лінійних джерел. Завдяки деякому вдосконаленню схеми розрахунку з трьома джерелами вдалося приблизно визначити ширину зони проплавлення. Приведений алгоритм носить, мабуть, приватний характер через довільність визначення положення та потужності трьох початкових лінійних джерел нагріву. Його універсальність не підтверджена експериментально. Алгоритм досить громіздкий і його важко застосовувати в реальному масштабі часу для автоматичного регулювання процесу ЕШЗ. Крім того, в роботах приводяться рекомендації для підвищення рівномірності провару по товщині шва, використовуючи вибір відстані між зварювальними дротами.

До теперішнього часу біфілярне ЕШЗ дротяними електродами із зрівняльним дротом не застосовується у зв'язку з недостатністю досліджень. Проте є підстави вважати, що біфілярне ЕШЗ зі зрівняльним дротом має переваги перед біфілярною ЕШП зі зрівняльним дротом [8]. Оскільки площа перерізу плавких електродів в ЕШЗ і

Соловійов В.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-1454-7520>, Ланкін Ю.М. – <https://orcid.org/0000-0001-6306-8086>,

Тюкалов В.Г. – <https://orcid.org/0000-0003-3491-193X>, Романова І.Ю. – <https://orcid.org/0000-0001-7154-1830>

© В.Г. Соловійов, Ю.М. Ланкін, В.Г. Тюкалов, І.Ю. Романова, 2022

ЕШП значно відрізняється, то істотно відрізняються і теплофізичні процеси, що обумовлюють їх плавлення.

Передбачається, що модель, на якій проведено математичні експерименти у роботах [8, 9], доцільно використати і для вивчення взаємозв'язків параметрів глибини проплавлення зварюваних кромки виробу та режимів біфілярної ЕШЗ зі зрівняльним дротом. Для дослідження розподілу електричного поля, струму та потенціалу в шлаковій ванні, в зварюваному виробі, в шві, що утворюється, і в повзунах, а також розподілу тепла в об'ємі досліджуваної зони використовувалася її скінченно-елементна модель у складі шлакової і металевої ванни, двох повзунів, двох електродів, занурених в шлакову ванну, а також фрагментів виробу і зварювального шва.

Метою роботи є моделювання та прогнозування глибини проплавлення зварюваних кромки, рівномірності проплавлення кромки, доли основного металу в зварному шві та форми металевої ванни при біфілярній ЕШЗ зі зрівняльним дротом.

Схема ланцюгів живлення біфілярної ЕШЗ зі зрівняльним дротом, яка використана для моделювання процесу, представлена на рис. 1.

Моделювання. Модель [8], що використовується, вдосконалена в частині формування металевої ванни та розрахунку глибини проплавлення кромки (ГПК) зварюваного виробу з урахуванням швидкості зварювання $v_{зв}$. Оскільки ГПК визначається не лише тепловим станом шару шлаку, який межує з кромками та тепловим станом металевої ванни, але й швидкістю підвищення рівня металевої ванни відносно кромки виробу, швидкість зварювання для біфілярної схеми живлення визначалася співвідношенням:

$$v_{зв} = 0,5\pi d_e^2 \frac{v_{под}}{bS}, \quad (1)$$

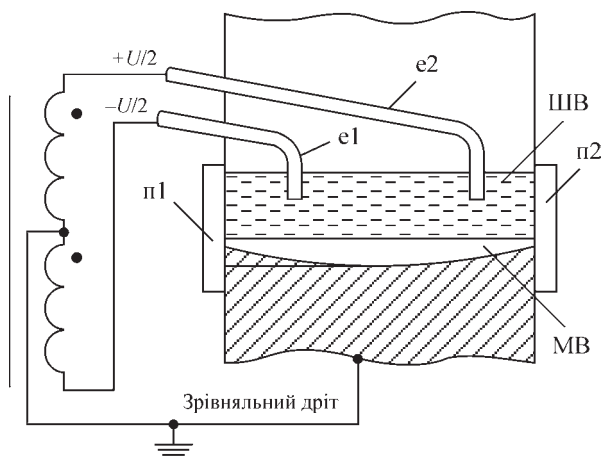


Рис. 1. Схема біфілярного живлення установки ЕШЗ зі зрівняльним дротом (U – напруга джерела живлення; e1 і e2 – плавкі електроди; п1 і п2 – повзуни, охолоджувані водою; ШВ і МВ – шлакова і металева ванни)

де d_e – діаметр електрода (мм); $V_{под}$ – швидкість подачі електрода в шлакову ванну (м/год); b – ширина проміжку зварюваного виробу (мм); S – товщина виробу (мм).

У роботі [7] використано рівняння теплового балансу для отримання алгоритму управління процесом ЕШЗ при змінному проміжку з метою стабілізації глибини проплавлення кромки $C_{пров}$ і коефіцієнта форми шва. Для прогнозування величини провару кромки $C_{пров}$ на основі теплового балансу було отримано залежність:

$$C_{пров} = \frac{knUI}{2Mv_{зв}S} - \frac{b}{2}, \quad (2)$$

де k – ефективний к.к.д. ($k = 0,9$); $n = 2$ – кількість електродів; U – напруга зварювання (В); I – струм зварювання (А); $M = C\gamma\Delta T + \gamma r$, де C , γ , r – теплоємність, щільність, питома теплота плавлення відповідно; ΔT – різниця температури плавлення та початкової температури.

При підстановці (1) в (2) отримаємо:

$$C_{пров} = b \left(\frac{0,573UI}{MV_{под}d_e^2} - 0,5 \right). \quad (3)$$

Як бачимо, після зроблених перетворень у формулі розрахунку $C_{пров}$ (3) відсутній один з параметрів, що впливає на глибину проплавлення – S . Крім того, автори не конкретизують, що характеризує отримане за (3) значення $C_{пров}$ (мінімальне, максимальне або середнє значення), але це важливо, оскільки глибина провару розподіляється по товщині виробу нерівномірно. У зв'язку з цим в моделі довелося відмовитися від обчислення за (3). Запропоновано введення залежності коефіцієнта теплопровідності χ_i кромки виробу від швидкості зварювання $v_{зв}$ в розрахунок ГПК на моделі. Ця залежність повинна моделювати зв'язок ГПК як зі швидкістю зварювання, так і з тепловим станом шлакової та металевої ванни [10].

На рис. 2 представлені види моделі металевої ванни.

Математичний експеримент. В результаті математичного експерименту отримано залежність:

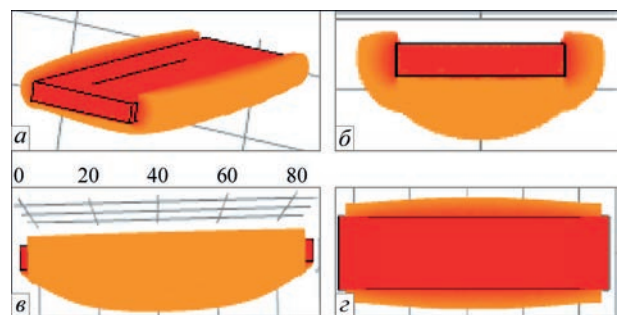


Рис. 2. Графічний вид моделі металевої ванни: а – загальний вигляд в ізометричній проекції; б – вид збоку повзунів (вид ліворуч); в – вид по товщині виробу (вид праворуч); г – вид зверху

$$\chi_i = \frac{p1X + p2}{X + q1}, \text{ де}$$

$$X = \frac{4\alpha d_c^2 UI}{v_{зв} S} - \frac{b}{2};$$

$p1 = -57,39; p2 = 9215; q1 = 19,23; \alpha = 2,336E-2.$

При параметрах ЕШЗ, що відповідають значенням: $S = 80$ мм; $b = 30$ мм; глибина шлакової ванни $h_{ш} = 50$ мм; $U = 40$ В; $I = 922$ А; $V_{под} = 200$ м/год; $v_{зв} = 1,17$ м/год, отримано зварне з'єднання і поперечний макрошліф (рис. 3, а). Характеристики глибини проплавлення кромки:

- середнє значення по товщині виробу $C_{проп}^{сер} = 3,9$ мм;
- максимальний провар $C_{проп}^{max} = 6,9$ мм;
- мінімальний провар $C_{проп}^{min} = 1,8$ мм.

Середнє значення ГПК визначалося як відношення площі провару по всій товщині виробу до товщини виробу S . При тих же параметрах ЕШЗ на моделі розрахунковим шляхом отримано горизонтальний переріз в районі поверхні металевої ванни (рис. 3, б), на якому видно контур провару кромки виробу. Характеристики глибини проплавлення кромки на моделі:

- середнє значення по товщині виробу $C_{проп}^{сер} = 4,11$ мм;
- максимальний провар $C_{проп}^{max} = 5,27$ мм;
- мінімальний провар $C_{проп}^{min} = 2,9$ мм.

Цей приклад може свідчити, що запропонована модель характеризує залежність ГПК від значень основних параметрів ЕШЗ, а використання її в проведенні математичного експерименту дозволить виявити якість ГПК при різних співвідношеннях з $U, V_{под}, S, b, h_{ш}$ і відстанню електрода від охолодженого повзуну Л1.

Відомий параметр, що характеризує ГПК – коефіцієнт форми провару $\Psi_{пр} = S / C_{проп}^{max}$. Розроблена модель дозволяє розрахувати розподіл ГПК уздовж усієї товщини виробу на відміну від наведених у

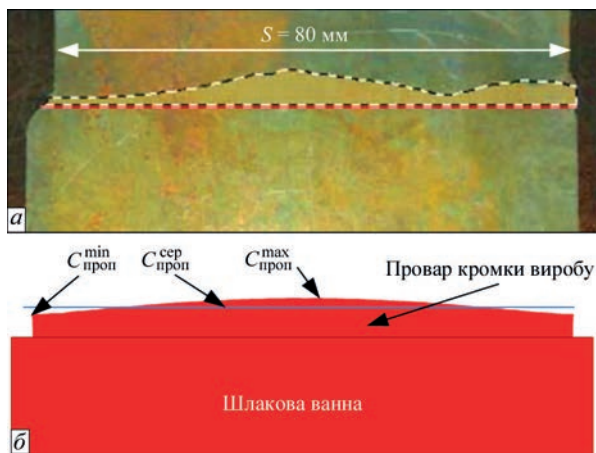


Рис. 3. Горизонтальний шліф зварного шва з позначеним проваром кромки виробу (а); горизонтальний переріз в районі поверхні металевої ванни, отриманий при моделюванні (б)

роботах [9, 10] залежностей. У зв'язку з цим запропонована більш точна універсальна характеристика ГПК, яка може бути використана при виборі параметрів необхідного режиму біфілярного ЕШЗ – коефіцієнт рівномірності проплавлення K_c :

$$K_c = \frac{C_{проп}^{max} - C_{проп}^{min}}{C_{проп}^{сер}}.$$

Одним з параметрів при моделюванні процесу ЕШЗ, який потрібний для управління процесом, вимір якого в реальному часі ускладнений, є величина заглиблення електродів. Тепло ШВ, яке є основним джерелом для плавлення при ЕШЗ, повинно бути найраціональніше використано як для плавлення електродів, оплавлення кромки виробу, необхідної взаємодії розплавленого присадного металу з розігрітим шлаком на шляху від електродів до металевої ванни, так і для підтримки необхідного теплового рівня та рівномірності нагріву металевої ванни. У зв'язку з цим при біфілярній схемі живлення особливе значення має підтримка величини заглиблення електродів на необхідному рівні, враховуючи, що основна концентрація тепла в ШВ зосереджена між електродами (за умови достатньої відстані між ними). На рис. 4 наведено номограму розподілу величини заглиблення електродів l_3 залежно від U і $V_{под}$, побудовану за результатами математичного експерименту на моделі та розрахунку температури нижнього торця електрода до досягненні заданої температури його плавлення. На номограмі позначена робоча зона сплаву електродів в діапазоні температур 1500...2000 °С.

Для параметрів ЕШЗ, що знаходяться в межах цієї зони, проведено серію математичних експериментів для визначення характеристик ГПК. У таблиці наведено результати розрахунків характеристик якості ЕШЗ за результатами моделювання. До складу розрахованих характеристик, включаючи розглянуті вище, увійшли такі, як доля основного металу в зварному шві (ДОМ) і коефіцієнт форми металевої ванни ψ . ЕШЗ дозволяє в широких ме-

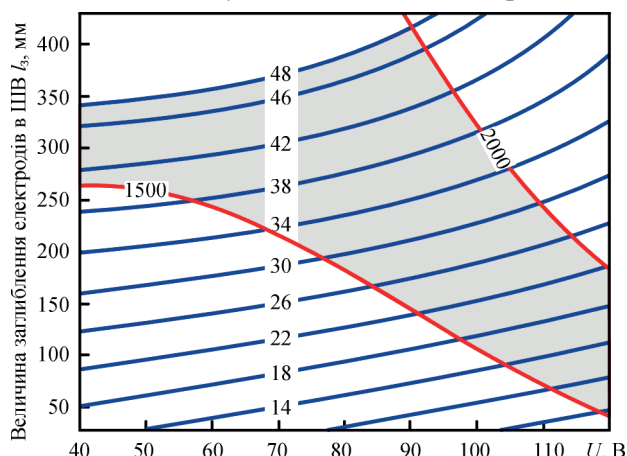


Рис. 4. Номограма заглиблення електродів в шлакову ванну з позначенням меж робочої зони сплавлення електродів

Результати розрахунків характеристик якості ЕШЗ

Номер п/п	S, мм	b, мм	d _c , мм	U, В	V _{пол.} , м/год	L1, мм	l _s , мм	V _{зв.} , м/год	I, А	K _c , відн. од.	C _{проп.} ^{сер} , мм	C _{проп.} ^{макс} , мм	C _{проп.} ^{мін} , мм	ДОМ, %	ψ, відн. од.
1	70	30	3	80	200	18	35,5	1,35	807	0,42	3,1	3,93	2,62	17	3,52
2	80	30	3	115	60	20	8,4	0,35	451	0,96	3,44	4,94	1,65	19	3,27
3	80	30	3	65	260	20	38,3	1,53	785	0,47	3,47	4,26	2,62	19	3,19
4	80	30	3	50	300	20	43,6	1,77	677	0,33	3,95	4,63	3,31	21	2,86
5	90	30	3	90	160	23	24,5	0,84	806	0,94	4,06	6,76	2,96	21	3,48
6	80	30	3	100	250	20	32,3	1,47	1200	0,82	4,54	8,06	4,34	23	2,9
7	80	30	3	50	320	20	43,6	1,88	934	0,42	5,47	6,58	4,28	27	2,83
8	80	30	4	110	100	20	14,3	1,05	750	0,98	5,69	8,52	2,95	27	2,8
9	80	30	3	70	300	20	41,7	1,77	953	0,47	5,77	6,72	4,03	28	2,9
10	80	30	3	90	220	20	35	1,3	987	0,63	6,25	7,93	3,97	29	3,03
11	85	25	3	60	320	21	44,7	2,13	914	0,42	5,37	6,71	4,47	30	2,44
12	70	35	3	115	150	18	19,2	0,87	843	0,66	7,63	10,1	5,05	30	3,02
13	80	40	3	100	250	20	32,3	1,1	1080	0,67	8,88	11,5	5,57	31	2,98
14	75	35	4	105	200	19	26,4	1,91	1140	0,61	9,19	12,1	6,55	34	2,73
15	80	30	3	90	320	20	40,5	1,88	1290	0,56	9,46	11,9	6,61	39	2,7
16	80	30	3	85	360	20	44,8	2,12	1350	0,52	9,48	11,9	6,91	39	2,63
17	80	30	3	100	330	20	18,4	1,94	1410	0,57	12,2	15,5	8,6	45	2,63
18	90	20	3	110	150	23	20,1	1,18	978	0,98	10,7	15,8	5,26	52	2,98
19	80	20	3	100	300	20	36,8	2,65	1530	0,65	14,9	19,6	9,96	60	2,53

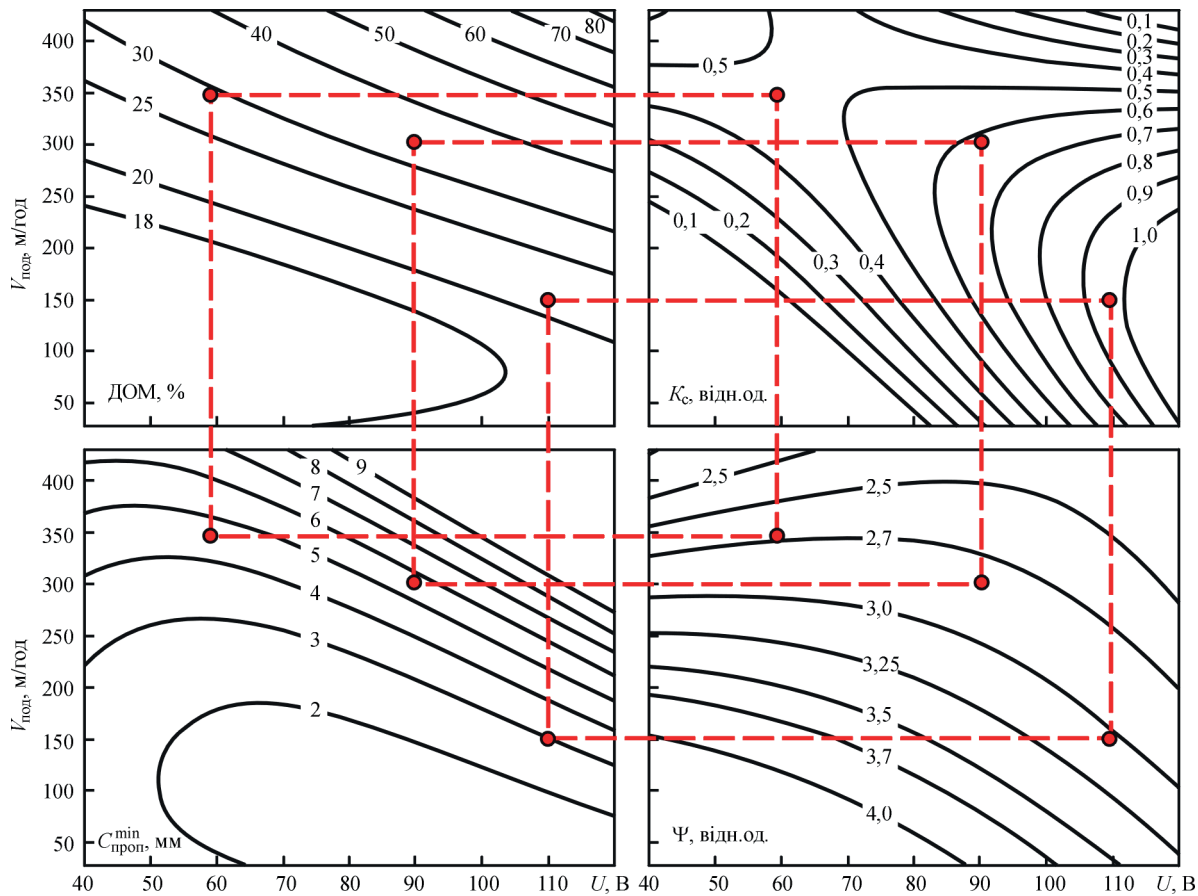


Рис. 5. Номограми залежностей прогнозованих параметрів: доля основного металу в зварному шві ДОМ, рівномірність проплавлення кромки виробу K_c, мінімальна глибина проплавлення кромки виробу C_{проп.}^{мін} і коефіцієнт форми металеві ванни ψ

жах регулювати розплавлення зварюваних кромки металу, тобто ДОМ. У наших математичних експериментах отримано шви з долею основного металу в межах 17...60%. Для обмеження проникнення легуючих домішок з основного металу в шов мож-

на вибрати найбільш сприятливі режими. У таблиці усі режими згруповані за збільшенням параметру ДОМ. Для вибору режиму зварювання з найбільшим значенням рівномірності параметра «глибина проплавлення кромки» слід вибрати режим № 4.

Для зменшення ймовірності отримання непровару кромки виробу не слід використовувати режим № 2 з найменшим $C_{\text{проп}}^{\text{min}}$. Найкраще значення коефіцієнта форми металевої ванни з розглянутих в експерименті – при режимі № 1.

Для параметрів $S = 80$ мм, $b = 30$ мм, $d_e = 3$ мм і $L1 = 20$ мм можна отримати прогнозовані орієнтовні відомості про деякі параметри якості зварного шва, таких, як ДОМ, K_c , $C_{\text{проп}}^{\text{min}}$ і ψ на графіках рис. 5.

Апроксимація шуканих функцій для номограм здійснена за допомогою многочлена типу $F = a1 + a2X + a3Y + a4XY + a5X^2Y + a6XY^2$, де F – шукана функція (ДОМ, K_c , $C_{\text{проп}}^{\text{min}}$, ψ); $a1 \dots a6$ – постійні коефіцієнти, відповідні кожній з шуканих функцій.

За рис. 5 зручно оцінювати можливості вибраного режиму біфілярної ЕШЗ зі зрівняльним дротом для досягнення того або іншого поєднання параметрів зварювального шва. Приклади такої оцінки наведені на рис. 5 (позначені пунктирними лініями).

Висновки

За результатами роботи проведено комплекс математичних експериментів на розробленій моделі по прогнозуванню основних параметрів якості зварювального шва для біфілярної ЕШЗ із зрівняльним дротом.

В якості прогнозованих розглянуті такі параметри, як середнє значення глибини проплавлення кромки виробу, максимальне та мінімальне проплавлення кромки, доля основного металу в зварному шві, коефіцієнт форми металевої ванни. Запропонований та проаналізований на моделі параметр K_c , що характеризує рівномірність проплавлення кромки виробу.

Отримано номограми прогнозованих параметрів.

Запропонована модель може бути використана для аналізу процесів ЕШЗ з двохелектродною канонічною та біфілярною схемою підключення установок до джерел живлення.

Список літератури/References

1. Медовар Б.И., Ступак Л.М., Бойко Г.А. и др. (1976) *Электрошлаковые печи*. Патон Б.Е. и Медовар Б.И. (ред.). Киев, Наукова думка.
Medovar, B.I., Stupak, L.M., Boyko, G.A. et al. (1976) *Electroslag furnaces*. Ed. by B.E. Paton, B.I. Medovar. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
2. Jing, Xie (2008) Structure advantage of a 5-t double pole series circuit electroslag furnace. *Heavy Casting and Forging*, 5(3), 43–45. (In Chinese).
3. Kubin, M., Scheriau, A., Knabl, M. et al. (2013) Operational experience of large sized ESR plants and attainable quality of ESR ingots with diameter of up to 2600 mm. *Proceedings of the International Symposium on Liquid Metal Processing & Casting (LMPC). Austin (Texas, USA), 22–25 September (2013)*, pp. 57–64.
4. Tezuka, M., Yamamoto, S., Takahashi, ? et al. (2014) Internal quality of 2150 mm-diameter ingot manufactured using new 150-ton ESR furnace. *Proceedings of the 19th International Forgemasters Meeting (IFM). Tokyo (Japan), 29.09–03.10, 2014*, pp. 90–94.
5. Son, I., Lee, W., Sim, Kw. et al. (2014) Installation of 150-ton new ESR facility and production of 120-ton ESR ingot for 12Cr HIP rotor forgings. *Ibid*, Tokyo (Japan), 29.09–03.10, 2014, pp. 333–337.
6. (1980) *Электрошлаковая сварка и наплавка*. Патон Б.Е. (ред.). Москва, Машиностроение.
(1980) *Electroslag welding and surfacing*. Ed. by B.E. Paton. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
7. Маришкин А.К. (1984) К вопросу о расчете глубины проплавления основного металла при ЭШС. *Автоматическая сварка*, 3, 71–72.
Marishkin, A.K. (1984) To problem of calculation of base metal penetration depth in ESR. *Avtomatich. Svarka*, 3, 71–72 [in Russian].
8. Ланкін Ю.М., Соловйов В.Г., Тюкалов В.Г., Романова І.Ю. (2021) Порівняння процесів електрошлакового зварювання при підключенні електричного живлення за моно- та біфілярною схемами, 11, 28–34. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.11.05>
Lankin, Yu.M., Soloviov, V.G., Tyukalov, V.G., Romanova, I.Yu. (2021) Comparison of the processes of electroslag welding at power connection by mono- and bifilar circuits. *The Paton Welding J.*, 11, 22-28.
9. Ланкін Ю.М., Соловйов В.Г., Тюкалов В.Г., Романова І.Ю. (2021) Стабільність процесу електрошлакового зварювання з біфілярною схемою живлення без зрівняльного дроту. *Там само*, 12, 33–37. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.12.04>
Lankin, Yu.M., Soloviov, V.G., Tyukalov, V.G., Romanova, I.Yu. (2021) Stability of the process of electroslag welding with bifilar power circuit without equalizing wire. *Ibid.*, 12, 24-28.
10. Негода Е.Н. (2008) *Тепловые процессы при сварке*. Владивосток, Дальневосточный ГТУ.
Negoda, E.N. (2008) *Thermal processes in welding*. Vladivostok, Dalnevostochny GTU [in Russian].

PREDICTION OF WELD PARAMETERS IN ESW WITH A BIFILAR CIRCUIT OF POWER SOURCE CONNECTION

V.G. Solovyov, Yu.M. Lankin, V.G. Tyukalov, I.Yu. Romanova

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: hsova@gmail.com

Electroslag welding with a bifilar power circuit has many positive characteristics. Results of analytical calculations and preliminary research when powering the ESW unit by the bifilar circuit show that there is a real possibility of controlling the process of weld solidification and depth of item edge penetration. In the work, the developed mathematical model was used to conduct a set of mathematical experiments on prediction of the main parameters of weld quality for bifilar ESW with equalizing wire. Such parameters as average value of item edge penetration depth, maximum and minimum edge penetration, base metal share in the weld, metal pool form factor are considered as predicted parameters. K_c parameter characterizing the uniformity of item edge penetration was proposed and analyzed on the model. Nomograms of predicted parameters were derived. 10 Ref., 1 Tabl., 5 Fig.

Keywords: electroslag welding, bifilar circuit, edge penetration depth, metal pool

Надійшла до редакції 29.10.2021