

ПОРІВНЯННЯ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ПРИ ПІДКЛЮЧЕННІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЖИВЛЕННЯ ЗА МОНО- ТА БІФІЛЯРНОЮ СХЕМАМИ

Ю.М. Ланкін, В.Г. Соловійов, 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 (ЕШЗ) дротяними електродами з біфілярною схемою підключення живлення в даний час не застосовується. Є усі підстави вважати, що така схема підключення має навіть більше переваг перед канонічною двоелектродною ЕШЗ. Тому потрібні додаткові спеціальні дослідження процесу біфілярної ЕШЗ. Наведено порівняння процесу електрошлакового зварювання при підключенні електричного живлення за канонічною двоелектродною схемою та біфілярною схемою зі зрівняльним дротом і подвоєнням вторинної напруги. Наведено результати порівняння обох схем ЕШЗ за енергетичними витратами; досліджено закономірності тепловиділення в шлаковій ванні при зміні її геометричних параметрів, координат місць і величини заглиблення електродів, величини прикладеної до електродів напруги та швидкості подання електрода. Бібліогр. 9, табл. 2, рис. 9.

Ключові слова: електрошлакове зварювання, біфілярна схема, шлакова ванна, металева ванна, електропровідність

Автоматичне електрошлакове зварювання (ЕШЗ) виконується із застосуванням одного, двох, трьох і більше електродних дротів. У двоелектродних апаратах електродні дроти підключаються до джерела живлення паралельно за схемою електрод–зварюваний виріб. У 1960-х роках в ІЕЗ ім. Є.О. Патона був розроблений новий спосіб електрошлакового переплавлення (ЕШП) – так зване біфілярне електрошлакове переплавлення [1–6]. Суть способу полягає в тому, що в біфілярній печі два витратні електроди підключені послідовно до вторинної обмотки однофазного трансформатора. Проте, разом з перевагами (такими, як сприятливе розташування зон основного тепловиділення в шлаковій ванні, зменшення реактивного опору пічного навантаження) двоелектродна піч виявилася працездатною лише в певному діапазоні режимів переплавлення внаслідок неефективного саморегулювання. Тобто при збуреннях, що діють на процес, плавлення електродів ставало нестійким. Для усунення цього недоліку зі збереженням переваг біфілярної схеми вторинна обмотка живлячого трансформатора виконується з середньою точкою, підключеною зрівняльним дротом до зварюваного виробу.

Біфілярна ЕШЗ дротяними електродами в даний час не застосовується. Є усі підстави вважати, що вона має навіть більше переваг перед канонічною двоелектродною ЕШЗ, чим у разі ЕШП. Оскільки площа перерізу плавких електродів в ЕШЗ і ЕШП значно відрізняється, то істотно відрізняються і теплофізичні процеси, що обумовлюють їх плавлення. Тому потрібні додаткові спеціальні дослідження процесу біфілярної ЕШЗ. Такі Ланкін Ю.М. – <https://orcid.org/0000-0001-6306-8086>, Соловійов В.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-1454-7520>, Тюкалов В.Г. – <https://orcid.org/0000-0003-3491-193X>, Романова І.Ю. <https://orcid.org/0000-0001-7154-1830>
© Ю.М. Ланкін, В.Г. Соловійов, В.Г. Тюкалов, І.Ю. Романова, 2021

дослідження було проведено шляхом математичного моделювання процесів двоелектродної ЕШЗ за канонічною і біфілярною схемою підключення зварювального апарату до джерела живлення змінного струму. Для порівняння з канонічною двоелектродною ЕШЗ за схемою рис. 1, а було вибрано схему біфілярної ЕШЗ із зрівняльним дротом, що сполучає середню точку вторинної обмотки зварювального трансформатора із зварюваним виробом (рис. 1, б).

Метою цієї роботи є порівняння роздільного впливу різних чинників на теплові процеси ЕШЗ при підключенні живлення за канонічною двоелектродною схемою та біфілярною схемою зі зрівняльним дротом і подвоєнням вторинної напруги джерела живлення за допомогою математичного експерименту.

На рис. 1 наведено варіанти схем живлення ЕШЗ.

Для фізичних експериментів використовувався апарат АД-381Ш [7], розроблений в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. За основу моделювання взято експериментальні дані ЕШЗ, які було отримано в лабораторних умовах в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України за канонічною схемою живлення.

Технологічні параметри експериментальної ЕШЗ: товщина виробу $S = 80$ мм; відстань між першим електродом і найближчим водоохолоджувальним повзуном $L_1 = 10$ мм (при симетричному розташуванні електродів один відносно іншого); глибина шлакової ванни $h_{\text{ш}} = 50$ мм; діаметр електродного дроту $d_{\text{д}} = 3$ мм; кількість електродів $n = 2$, виріб – сталь 09Г2С; електродний дріт – сталь Св.08Г2С; флюс АН-8; формувальні повзуни

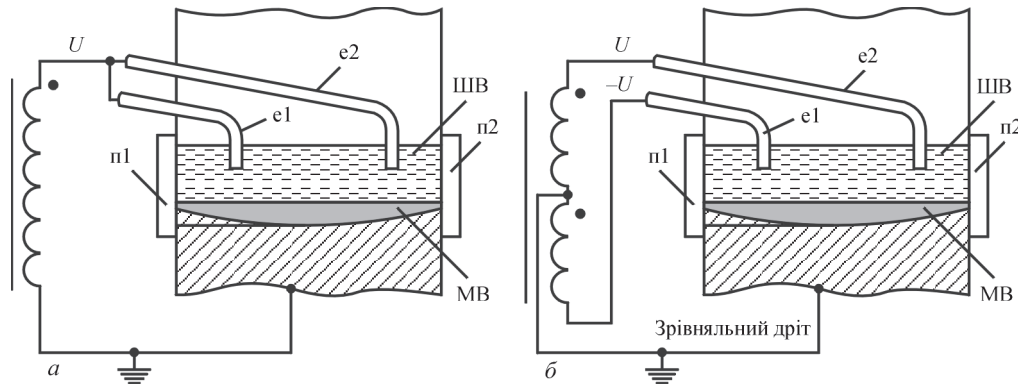


Рис. 1. Двоелектродні схеми живлення ЕШЗ: *a* – канонічна схема живлення; *б* – біфілярна схема живлення; U – напруга джерела живлення; $e1$ і $e2$ – плавкі електроди; $n1$ і $n2$ – повзуни, охолоджувані водою; ШВ і МВ – шлакова і металева ванни – мідь. Дані технологічного режиму ЕШЗ надано в табл. 1.

Результати експериментального двоелектродного ЕШЗ, проведеного з канонічною схемою живлення, використовувалися для валідації математичної моделі ЕШЗ. Математичне моделювання проводилося на графічній тривимірній моделі зони ділянки виробу (рис. 2, *a*), що включає кромки зварюваного металу на глибині 70 мм з обох сторін, на висоті ~140 мм, що настроюється (залежно від заданої глибини шлакової ванни, розрахункової глибини металевої ванни та висоти шва), і товщини виробу, що задається, ~80 мм.

Виходячи з положень теорії подібності [8], створена геометрична модель, що враховує подібність її геометричних параметрів з геометричними параметрами фізичної моделі. Основна умова для моделювання була такою, щоб забезпечити найкращу відповідність геометричної частини моделі з геометричними параметрами фізичного експерименту, при

використанні фізичних властивостей матеріалів шлаку, зварювального виробу і електродів [9] (табл. 2).

Параметри $C_p[T]$, $\rho[T]$, $k[T]$, $\alpha[T]$, $\sigma_{st}[T]$, $\sigma_{sh}[T]$, задані відповідними апроксимуючими залежностями (в статті не наводяться) від температури T , К. Графічні параметри моделі, взяті за основу: $S = 80$ мм, $b = 30$ мм, $h_m = 50$ мм, $d_e = 3$ мм, $L1 = 10$ мм.

Нагрів шлакової ванни відбувається за рахунок резистивного тепла електричного струму, що виділяється при протіканні через неї. Для дослідження розподілу електричного поля, струму і потенціалу в шлаковій ванні, в зварюваному виробі, в шві, що утворюється, і повзунах, а також розподілу тепла в об'ємі досліджуваної зони використовувалася її скінченно-елементна модель (рис. 2) у складі шлакової і металевої ванни, двох повзунів, двох електродів, занурених в шлакову ванну, а також фрагментів виробу і зварювального шва.

Модель вирішує наступні рівняння:

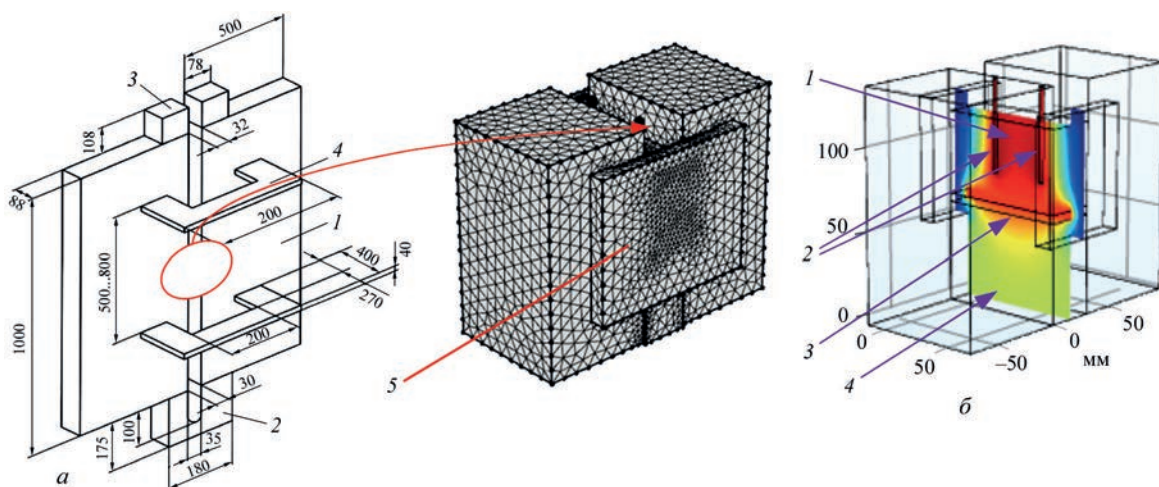


Рис. 2. Схема складання вертикального шва під ЕШЗ та скінченно-елементна модель фрагмента зони зварювання (*a*): 1 – виріб, 2 – карман вхідний, 3 – планка вивідна, 4 – скоба, 5 – повзун. Фрагмент графічної моделі в розрізі (*б*): 1 – шлакова ванна, 2 – електроди, 3 – металева ванна, 4 – зварний шов

Таблиця 1. Дані технологічного режиму ЕШЗ

Прохід	Спосіб зварювання	Зварювальний струм I , А	Напруга джерела живлення U , В	Рід струму	Швидкість зварювання v_z , (м/год)	Швидкість подачі електродного дроту $v_{поз}$, (м/год)
1	ЕШЗ	880...960	38...40	Змін.	1,0	190...210

Таблиця 2. Фізичні властивості матеріалів, що використовувалися в моделі

Параметр	Виріб	Електроди	Шлак	Повзуни	Шов
Теплоємність C_p , Дж/(кг·К)	$C_p[T]$	$C_p[T]$	1400	385	$C_p[T]$
Відносна діелектрична проникність ϵ	1	1	2,5	1	1
Щільність ρ , кг/м ³	$\rho[T]$	$\rho[T]$	2600	8960	$\rho[T]$
Теплопровідність k , Вт/(м·К)	$k[T]$	$k[T]$	295	400	$k[T]$
Коефіцієнт температурного розширення α , 1/К	$\alpha[T]$	$\alpha[T]$	-	17E-6	$\alpha[T]$
Питома електропровідність σ , См/м	$\sigma_{st}[T]$	$\sigma_{st}[T]$	$\sigma_{sh}[T]$	6E7	$\sigma_{st}[T]$

$$\rho(T)C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla q = Q,$$

де $q = -k(T)\nabla T$; Q – додаткове джерело тепла (в якості додаткового джерела тепла може бути розігріта металева ванна).

При роботі з стаціонарними електричними струмами в середовищі, що є провідником, необхідно враховувати стаціонарне рівняння нерозривності. У стаціонарній системі координат точкова форма закону Ома свідчить:

$$J = \sigma(T)E,$$

де J – щільність струму; E – напруженість електричного поля.

Статична форма рівняння нерозривності вимагає:

$$\nabla J = -\nabla\sigma(T)\nabla U = 0,$$

де U – напруга.

В результаті валідації моделі за результатами експериментального ЕШЗ отримано наступні результати розрахунків при $U = 40$ В, $v_{\text{под}} = 200$ м/год:

- сумарний струм електродів $I = 922$ А;
- провідність ШВ $\sigma = 11,82$ См;
- швидкість зварювання 1,07 м/год.

Такий результат практично підтверджує правильність підібраних фізичних і графічних параметрів моделі і можливість використання її в запланованих математичних експериментах. У зв'язку з тим, що перемикання моделі з двохелектродної канонічної на біфілярну схему живлення не змінює ні фізичних, ні графічних параметрів самої моделі, а змінює тільки зовнішні ланцюги живлення, то вважаємо, що отримані параметри моделі поширюються і на модель ЕШЗ з біфілярною схемою живлення.

У моделі вирішується стаціонарне завдання, виводяться результати процесу, що встановився. Модель дозволяє визначати потенціал, щільність струму і температуру в кожній точці об'єму досліджуваної зони при різних варіаціях (в межах $\pm 20\%$) діаметру електродів, товщини виробу, величини проміжку, глибини шлакової ванни, а також величини заглиблення електродів (у межах 5...95% $h_{\text{ш}}$) і розташування електродів відносно повзунів (у межах 10...90% $S/2$).

За результатами математичного експерименту отримано залежність питомої провідності шлаку від температури для кожного елементарного об'єму ШВ. Проведено розрахунок величини заглиблення електродів l_3 в ШВ (при $h_{\text{ш}} = 50$ мм), а також середньої температури поверхні металевої ванни $T_{\text{мв}}$ від U і $v_{\text{под}}$. Заглиблення електродів визначалося за результатами розрахунку температури нижнього торця електрода, яка досягла заданої температури плавлення електрода (1500 °С).

На рис. 3, а наведено залежність провідності ШВ σ від U при незмінній $v_{\text{под}} = 280$ м/год і $L1 = 20$ мм. Провідність ШВ при біфілярній ЕШЗ і при рівності споживаної потужності з канонічною ЕШЗ завжди приблизно в 4 рази менша, ніж при канонічній. Залежність має екстремальний характер. Максимум σ спостерігається при $U = 50$ В для біфілярної ЕШЗ і при $U = 25$ В для канонічної ЕШЗ відповідно.

На рис. 3, б наведено залежність I від U . Струм при біфілярній схемі ЕШЗ завжди нижче в порівнянні із струмом при канонічній схемі у зв'язку з подвоєним значенням напруги для біфілярної схеми ЕШЗ. Цей чинник забезпечує зменшення енергетичних втрат в короткій мережі живлення. Оби-

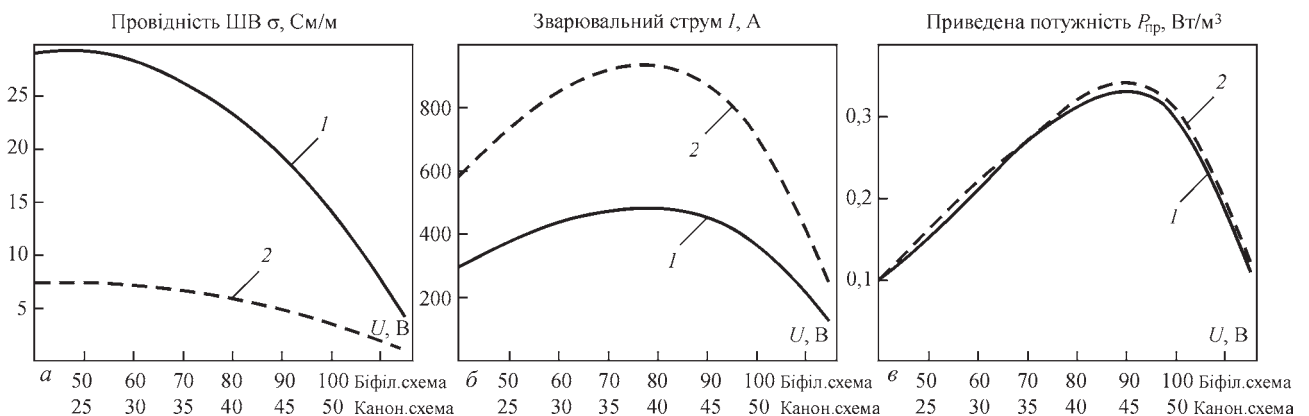


Рис.3. Залежність від напруги U : а – провідності ШВ σ ; б – зварювального струму I ; в – потужності $P_{\text{пр}}$, приведені до одиниці об'єму шлакової ванни, для біфілярної і канонічної схем ЕШЗ при незмінній $v_{\text{под}} = 280$ м/год і $L1 = 20$ мм (1 – біфілярна схема ЕШЗ; 2 – канонічна)

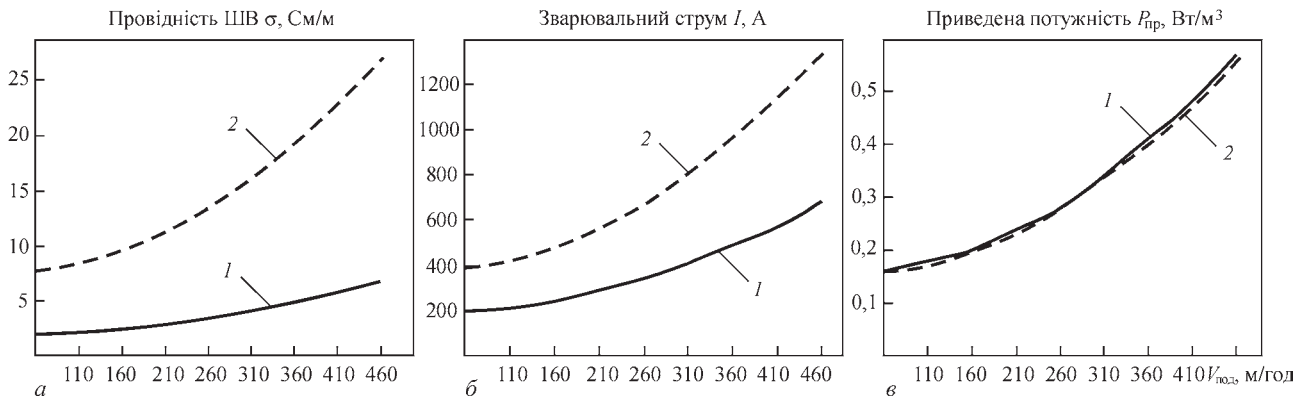


Рис. 4. Залежність від швидкості подання електродів $v_{\text{под}}$: а – провідності ШВ σ ; б – зварювального струму I ; в – потужності $P_{\text{пр}}$, приведені до одиниці об’єму шлакової ванни для біфілярної (1) та канонічної (2) схем ЕШЗ

дві залежності мають екстремальний характер з максимумом приблизно 480 А при 80 В при біфілярній схемі і приблизно 940 А при 40 В для канонічної схеми.

На рис. 3, в наведено залежність споживаної потужності ЕШЗ, приведені до одиниці об’єму ШВ, від напруги джерела U . Обидві залежності мають екстремальний характер. При одній і тій же продуктивності ЕШЗ для обох схем підключення джерела живлення споживана потужність процесу практично однакова.

Наявність екстремумів функцій $\sigma(U)$, $I(U)$ і $P_{\text{пр}}(U)$ необхідно використати з урахуванням оптимізації характеристик якості зварного з’єднання.

На рис. 4 представлено залежності провідності ШВ, струму джерела живлення та приведені споживаної потужності від $v_{\text{под}}$ при $U = 100$ В для біфілярної схеми та $U = 50$ В для канонічної схеми живлення ЕШЗ. Для усіх трьох залежностей спостерігається зростання їх значень при збільшенні швидкості подачі. Наведена споживана потужність процесу практично однакова.

При незмінній малій напрузі зварювання та швидкості подачі електродів, що підвищується, зазвичай спостерігається наближення торця електрода до металевої ванни, збільшення сили струму джерела живлення та споживаної потужності, приведені до об’єму ШВ. При зменшенні швидкості подачі повинен спостерігатися зворотний процес. При постійній швидкості подачі (напри-

клад, $v_{\text{под}} = 280$ м/год) і зменшенні напруги (наприклад, з 80 до 60 В для біфілярної схеми ЕШЗ або з 40 до 30 В для канонічної схеми) закономірність стає зворотною (рис. 3, б).

Так, для забезпечення заданої швидкості подачі при зменшенні напруги повинен збільшитися струм за рахунок заглиблення електрода в ШВ і зменшення опору проміжку між електродом і металевою ванною. Однак, при опусканні електродів ближче до металевої ванни, тобто до додаткового джерела тепла, швидкість їх плавлення збільшується, а вирівнювання швидкості подачі і лінійної швидкості плавлення відбувається без значного збільшення струму. Це пов’язано з суперпозицією тепла від резистивного нагріву та зовнішнього тепла від металевої ванни. Струм при цьому зменшується, потужність, що вводиться, зменшується, а швидкість плавлення тимчасово стабілізується. З часом у зв’язку зі зменшенням потужності (рис. 3, в), що вводиться, тепловий рівень в цій зоні падає, а заглиблення електродів збільшується. Подальше зниження температури ШВ може призвести до порушення стабільності ЕШЗ.

На рис. 5 наведено залежності провідності ШВ, струму джерела живлення та приведені споживаної потужності від зміни ширини проміжку виробу при незмінних значеннях $S = 80$ мм, $h_{\text{ш}} = 50$ мм, $v_{\text{под}} = 280$ м/год, $L1 = 20$ мм, $d_c = 3$ мм,

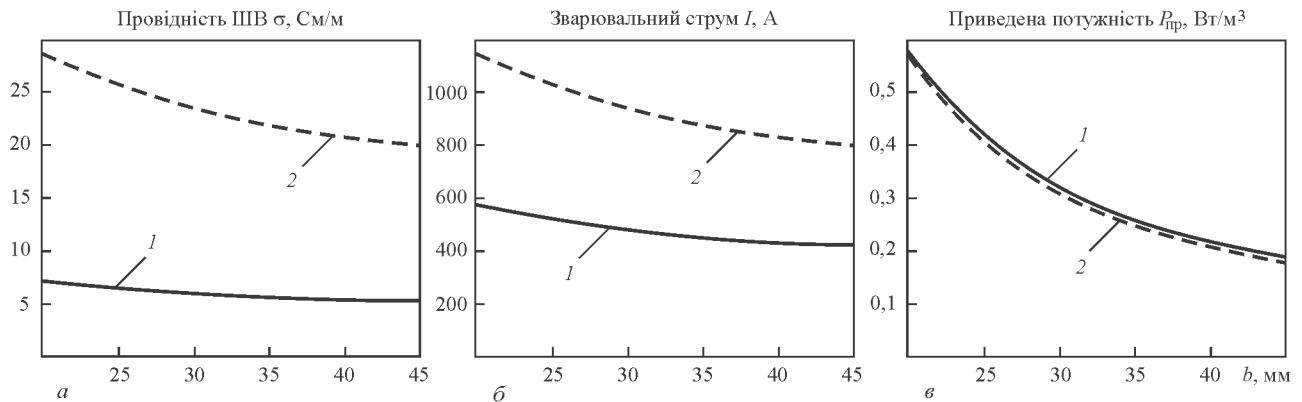


Рис. 5. Залежність від зварювального проміжку b : а – провідності ШВ, σ ; б – зварювального струму I ; в – потужності $P_{\text{пр}}$, приведені до одиниці об’єму шлакової ванни, для біфілярної (1) та канонічної (2) схем ЕШЗ

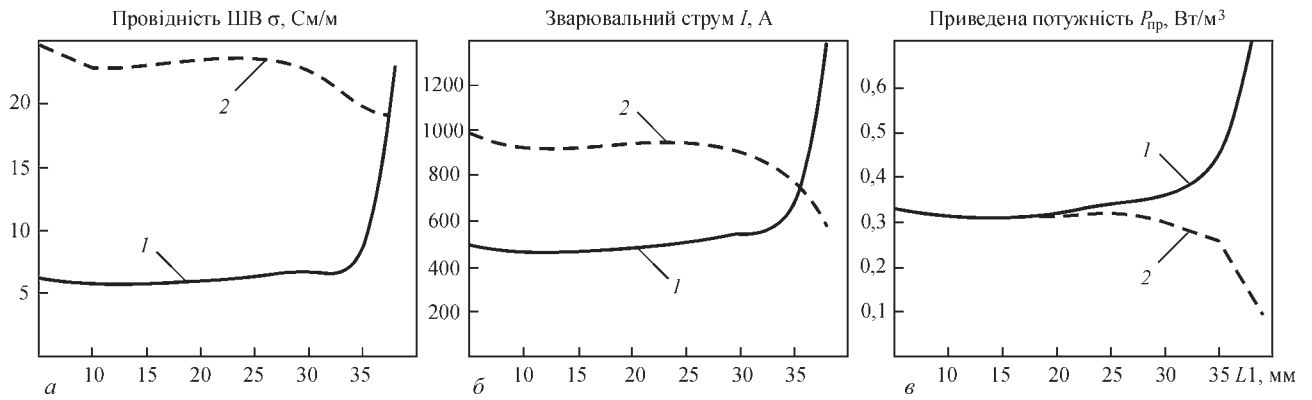


Рис. 6. Залежність від відстані між електродом і повзуном L_1 : а – провідності ШВ σ ; б – зварювального струму I ; в – потужності $P_{пр}$, приведеної до одиниці об'єму шлакової ванни, для біфілярної (1) та канонічної (2) схем ЕШЗ

$U = 80$ В для біфілярної схеми ЕШЗ і $U = 40$ В для канонічної схеми живлення ЕШЗ.

При збільшенні ширини проміжку від 20 до 45 мм спостерігається зменшення провідності ШВ (рис. 5, а), зменшення струму джерела живлення (рис. 5, б) і зменшення потужності (рис. 5, в), приведеної до одиниці об'єму ШВ для обох схем живлення ЕШЗ. Це пов'язано з видаленням електродів від виробу. Потужність (рис. 5, в), приведена до одиниці об'єму ШВ, практично не відрізняється для обох схем живлення за інших рівних і незмінних умов.

На рис. 6 наведено залежність провідності (рис. 6, а), струму джерела живлення (рис. 6, б) і приведеної потужності (рис. 6, в) від L_1 . Умови обчислювального експерименту ідентичні до умов для рис. 5. При збільшенні L_1 з 5 до 15 мм спостерігається незначне зменшення провідності для обох схем підключення у зв'язку з віддаленням електрода від повзунів, які мають безпосередній контакт з виробом. При збільшенні L_1 з 15 до 25 мм спостерігається незначне збільшення провідності для обох схем підключення у зв'язку зі зближенням різнополярних електродів (біфілярна схема) і збільшенням шлакового електропровідного простору (канонічна схема). При збільшенні L_1 з 25 до 38 мм спостерігається різке збільшення

провідності для біфілярної схеми за рахунок зменшення відстані між різнополярними електродами і різке зменшення провідності для канонічної схеми підключення. Останнє пов'язане з тим, що тепловий рівень ШВ між електродами збільшується за рахунок суперпозиції теплових полів кожного з електродів, при цьому збільшується радіальна складова швидкостей плавлення електродів, заглиблення електродів зменшується для вирівнювання швидкостей подання і плавлення електродів, а це, у свою чергу, призводить до зменшення струму. При біфілярній схемі живлення зближення електродів призводить до зменшення опору між ними. При цьому струм різко зростає, збільшуючи швидкість радіального плавлення, що призводить до зменшення заглиблення електродів. Такий режим може привести до виходу одного з електродів зі шлакового простору. Аналогічний характер мають зміни струмів (рис. 6, б) для обох схем підключення джерела. Приведені потужності (рис. 6, в) для обох схем практично не відрізняються при збільшенні L_1 з 5 до 20 мм. Проте при збільшенні L_1 з 20 до 38 мм приведена потужність при біфілярній схемі різко зростає, а при канонічній різко падає. Очевидно, не слід видаляти електроди від повзунів на відстань більше, ніж 20 мм, імовірно $L_1 = L/4$.

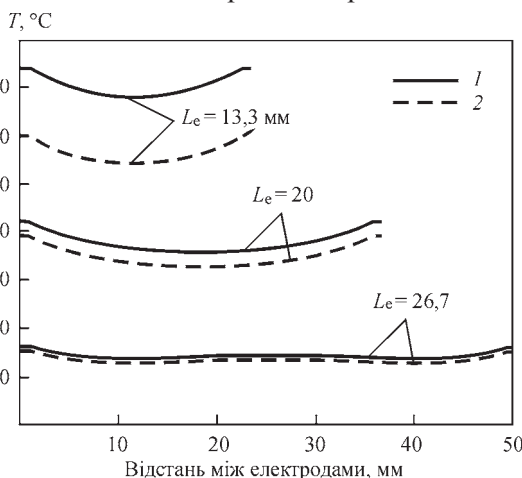


Рис. 7. Розподіл температури між серединами мокрих частин електродів для обох схем підключення живлення ЕШЗ: 1 – біфілярна; 2 – канонічна

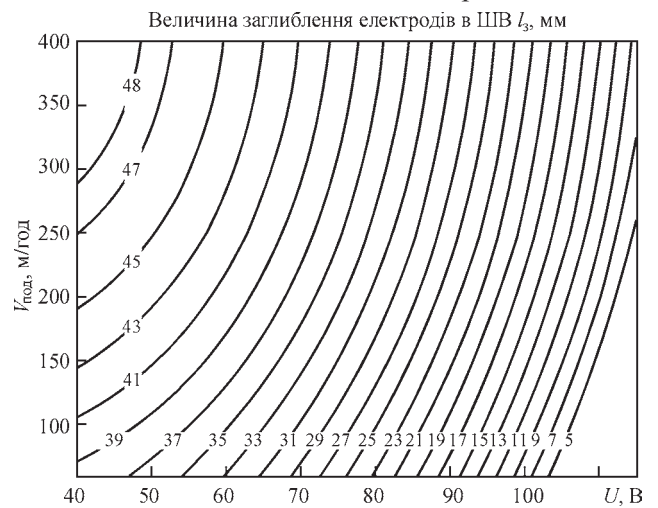


Рис. 8. Номограма розподілу величини заглиблення електродів в ШВ I_3 при різних поєднаннях значень U і $v_{под}$ для біфілярної схеми ЕШЗ

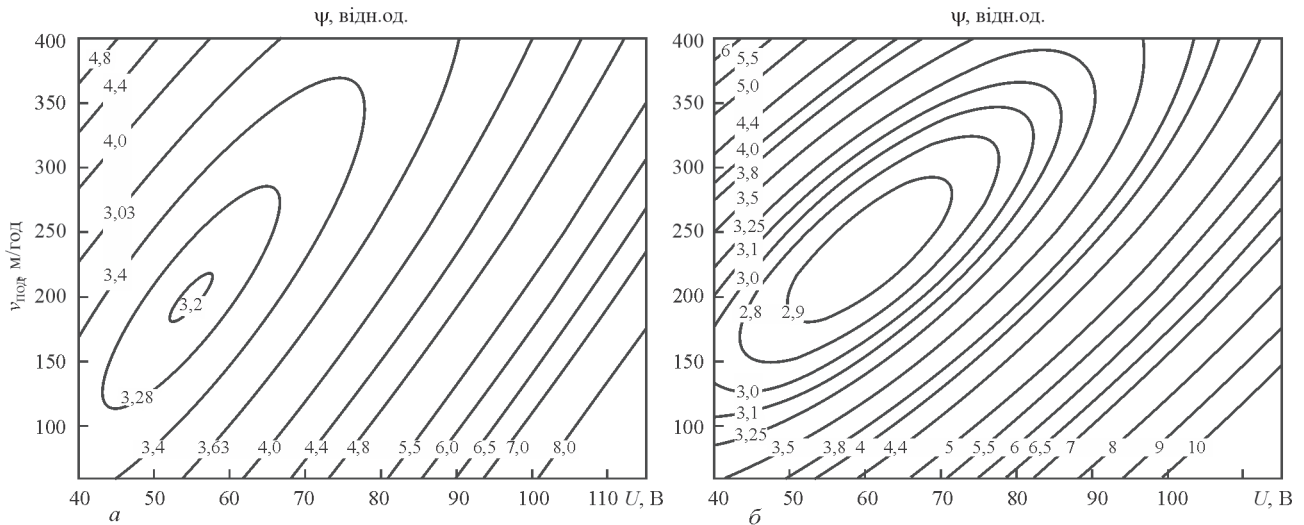


Рис. 9. Розподіл значень коефіцієнта форми зварювального шва ψ залежно від спільних значень U і $v_{\text{под}}$ для біфілярної (а) і канонічної (б) схем живлення ЕШЗ

На рис. 7 наведено залежності розподілу температури в ШВ між серединами мокрих частин обох електродів при різних значеннях відстані L_e між ними. Проведено порівняння цих розподілів для обох схем живлення. Із залежностей видно, що при відстані $L_e > 27$ мм тепловий рівень ШВ між електродами для обох схем підключення практично однаковий. Тобто перевага, яка пов'язана з управлінням проплавленням кромки виробу тільки напругою при біфілярній схемі відносно канонічної схеми живлення [1], при ЕШЗ підтверджується тільки при певних відстанях між електродами.

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 металеві ванни, так і для підтримки необхідного теплового рівня та рівномірності нагріву металеві 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. 8 наведено номограму розподілу величини заглиблення електродів l_3 залежно від U і $v_{\text{под}}$, побудовану за результатами математичного експерименту на моделі та розрахунку температури нижнього торця електрода до досягнення заданої температури його плавлення.

Тепловий рівень металеві ванни підтримується за рахунок тепло-масообміну між розплавленим присадним металом і шлаковою ванною. За рахунок конвекції більш гарячі конгломерати шлаку підіймаються вгору, витісняючи вниз холодніші. В результа-

ті дії гравітаційних сил важчі з більшою щільністю конгломерати шлаку осідають вниз. Оскільки конгломерати шлаку рухаються в магнітному полі електричного струму, який протікає по електродах і по ШВ за допомогою заряджених частинок іонів в певному напрямі, а також крапель розплавленого металу, що рухаються вниз під дією гравітаційних сил, то на них діє електродинамічна сила Ампера.

При канонічній схемі живлення, якщо використовуються джерела постійного струму, краплі розплавленого металу, що падають, під дією сили Ампера падають ближче до середини металеві ванни або зміщуються в сторони від середини металеві ванни залежно від полярності підключення установки. При біфілярній схемі живлення, якщо використовуються джерела постійного струму, краплі зміщуються від кожного електрода вліво або вправо залежно від полярності підключеного джерела живлення. При використанні джерела живлення зі змінним струмом краплі опускаються вертикально вниз по електродах, незалежно від того, канонічна або біфілярна схема живлення використовується.

Враховуючи викладене вище, величина заглиблення електродів при біфілярній схемі живлення має бути дещо збільшена для забезпечення теплового балансу між верхом і низом ШВ.

На рис. 9 наведено номограму розподілу коефіцієнта форми зварювального шва ψ залежно від U і $v_{\text{под}}$. Математичний експеримент проводився при $S = 80$ мм, $b = 30$ мм, $h_{\text{ш}} = 50$ мм, $L1 = 20$ мм, $d_e = 3$ мм.

Найкращі значення коефіцієнта форми зварювального шва виходять при малих швидкостях подання електродів і великій напрузі джерела живлення. Так, наприклад, при $v_{\text{под}} = 300$ м/год і $U = 115$ В для біфілярної схеми живлення $\psi = 6$ і $\psi = 5,7$ для канонічної схеми. Тобто зона режимів з високим значенням коефіцієнта ψ для біфілярної схеми набагато ширша, що дозволяє надійніше утримувати режим з великим коефіцієнтом форми

зварювального шва і направляти теплові потоки у бік поліпшення можливості формування поверхні зварного шва і проплавлення кромки виробів, що зварюються.

Висновки

1. Проведено пошук теплофізичних параметрів шлакової ванни як додаткових складових моделі ЕШЗ з урахуванням нерівномірного розподілу температури в шлаковій ванні, а також з урахуванням впливу температури охолоджуваних водою повзунів на розподіл температури виробу, шлакової та металевої ванни в приграничних зонах.

2. На моделях ЕШЗ з біфілярною та канонічною схемами живлення проведено попереднє порівняльне дослідження закономірності зміни провідності в шлаковій ванні при зміні геометричних параметрів шлакової ванни, а також координат місць і величини заглиблення електродів.

3. Перевага, яка пов'язана з управлінням проплавлення кромки виробу тільки напруженою при біфілярній схемі відносно канонічної схеми живлення, підтверджується тільки при певних відстанях між електродами.

4. Досліджено закономірність зміни величини заглиблення електродів від величини напруги та швидкості подачі електродів. Показано, що при розташуванні торця електрода поблизу металевої ванни спостерігається зменшення заглиблення електрода і зменшення споживаної електричної потужності за рахунок суперпозиції тепла, виробленого струмом, що протікає в ШВ, і тепла МВ. Результуючого тепла досить для забезпечення необхідної швидкості плавлення електродів. Однак, у зв'язку зі зменшенням в зазначеному режимі тепла, створюваного електричною енергією, відбувається поступове зменшення теплового стану процесу ЕШЗ, що може призвести до його дестабілізації.

5. У загальному випадку зона режимів з високим значенням коефіцієнта форми зварювального шва для біфілярної схеми набагато ширше,

ніж для канонічної схеми, що дозволяє надійніше утримувати режим з достатньо великим коефіцієнтом форми зварювального шва і направляти теплові потоки у бік поліпшення можливості формування поверхні зварного шва і проплавлення кромки зварюваних виробів.

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., Bojko, 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. Xi-min, Zang, Tian-yu, Qiu, Xin, Deng et al. (2015) Industrial test of a 6-m long bearing steel ingot by electroslag remelting withdrawing process. *China Foundry*, 12(3), 202–207.
4. Tezuka, M., Yamamoto, S., Takahashi, F. 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, 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, pp. 333–337.
6. 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, pp. 57–64.
7. Ланкин Ю.Н., Москаленко А.А., Тюкалов В.Г. и др. (2008) Применение электрошлаковой сварки в строительстве и при ремонте металлургических агрегатов. *Сварщик*, 1, 6–9.
Lankin, Yu.N., Moskalenko, A.A., Tyukalov, V.G. et al. (2008) Application of electroslag welding in construction and in repair of metallurgical assemblies. *Svarshchik*, 1, 6–9 [in Russian].
8. Гухман А.А. (1973) *Введение в теорию подобия*. 2-е изд. Москва, Высш. шк.
Gukhman, A.A. (1973) *Introduction to similarity theory*. 2nd Ed. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
9. Сорокин В.Г., Волосникова А.В., Вяткин С.А. и др. (1989) *Марочник сталей и сплавов*. Сорокин В.Г. (ред.). Москва, Машиностроение.
Sorokin, V.G., Volosnikova, A.V., Vyatkin, S.S. et al. (1989) *Grades of steels and alloys*. Ed. by V.G. Sorokin. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

COMPARISON OF THE PROCESSES OF ELECTROSLAG WELDING AT POWER CONNECTION BY MONO- AND BIFILAR DIAGRAM

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

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: hhsova@gmail.com

Electroslag welding (ESW) with wire electrodes with a bifilar diagram of power connection is not applied now. There is every reason to believe that such a connection diagram has even more advantages over the canonic two-electrode ESW. Therefore, additional special investigations of the process of bifilar ESW are required. A comparison is given of the process of electroslag welding at power connection by the canonic two-electrode diagram and by the bifilar diagram with equalizing wire and doubling of secondary voltage. Given are the results of comparison of both the ESW diagrams by energy consumption; regularities of heat evolution in the slag pool at the change of its geometrical parameters, coordinates of the points and extent of immersion of the electrodes, value of voltage applied to the electrodes and electrode feed rate were studied. 9 Ref., 2 Tabl., 9 Fig.

Keywords: electroslag welding, bifilar diagram, slag pool, metal pool, electric conductivity

Надійшла до редакції 13.09.2021