

ОПТИМІЗАЦІЯ ФОРМИ МЕТАЛЕВОЇ ВАННИ ПРИ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОМУ НАПЛАВЛЕННІ В СТАЦІОНАРНОМУ СТРУМОПІДВІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ ДЛЯ ОТРИМАННЯ БІМЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ

В.Г. Соловійов, Ю.М. Кусков, І.Ю. Романова

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

Проведено математичне моделювання мультифізичних процесів джоулевого нагріву на скінченно-елементній моделі стаціонарного струмопідвідного кристалізатора (СПК). Для отримання біметалевих виробів у стаціонарному струмопідвідному кристалізаторі з круглим перерізом у процесі плавлення дискретної присадки при її порційному подаванні представлено результати розрахункової оцінки залежності таких параметрів форми металевої ванни, як діаметр дзеркала та глибина рідкої фракції, від глибини шлакової ванни та від параметрів конструкції СПК: діаметра кристалізатора, товщини мідних втулок струмопідвідної та формуючої секції кристалізатора, товщини водоохолоджуваного піддона, зміни висоти графітового облицювання в результаті зносу. Результати дослідження допоможуть у вдосконаленні конструкції кристалізатора, оптимізації форми металевої ванни та технології проведення процесу плавлення дискретної присадки при порційному подаванні в СПК. Бібліогр. 14, табл. 7, рис. 7.

Ключові слова: стаціонарний струмопідвідний кристалізатор, параметри металевої ванни, оптимізація форми, мультифізичне моделювання, електрошлакове наплавлення, біметалевий виріб

Вступ. Спосіб наплавлення та переплаву в струмопідвідному кристалізаторі (СПК) [1] має специфічні особливості, що визначаються конструкцією цього пристрою. Перш за все, він є секційним невитратним електродом кільцевого типу. Нижня секція, що електрично ізольована від верхньої, у СПК є формуючою (ФСК), в якій формується металева ванна (МВ). Другим невитратним електродом є піддон або виріб, що формується. Крім того, за допомогою вертикального розрізу у струмопідвідній секції в розплаві створюється магнітне поле, завдяки якому забезпечується обертання шлакової (ШВ) та металевої ванн у горизонтальній площині. Стаціонарний СПК має ще таку важливу особливість – у ньому наплавляються порівняно невеликі зливки (до 60 мм).

Ксендик Г.В., який є автором ідеї та базової моделі струмопідвідного кристалізатора, запропонував у якості засобу впливу на форму фронту кристалізації розплавленого металу в ФСК використовувати «підключений до пристрою подачі наповнювача в шлакову ванну затискач для подачі струму». Завдяки цьому з'явилася можливість коригувати форму МВ шляхом зміни напрямку та сили струму в затискачі. Це дозволяє зробити її пологішою і, таким чином, зменшити ризик утворення дефектів у кристалах [2, 3].

Особливо це важливо для сплавлення біметалевих деталей. Полога МВ досягається за рахунок підбору оптимального співвідношення струмів,

напруг, швидкості подачі плавкого електрода або плавкої дискретної присадки, а також теплового рівня ШВ та інтенсивності тепловідведення через стінки кристалізатора [4]. Великий вплив на формування МВ мають геометричні параметри СПК, такі як діаметри кристалізатора та електрода (плавкого та неплавкого), відстань між дзеркалом МВ і нижнім торцем графітової футерівки (ГФ), товщина електроізоляційної прокладки між обома секціями кристалізатора та піддоном тощо. Управлінню процесом формування металевої ванни присвячено ряд робіт [5, 6]. У [5] робиться висновок, що плоска форма МВ може бути отримана при двоконтурній схемі наплавлення при відповідних співвідношеннях потужностей на кристалізаторі та електроді. У [6] дається характеристика різних існуючих способів і технологічних прийомів управління кристалізацією металу при електрошлаковому переплаві, що базуються на використанні металургійних механізмів і зовнішніх фізичних впливів. Робиться висновок, що управління процесом первинної кристалізації зливок, особливо складнолегованих сплавів і зливок великих діаметрів, залишається одним з ключових завдань подальшого розвитку електрошлакових технологій. У [7] застосовується метод впливу на форму металевої ванни за допомогою зовнішнього магнітного поля. Таким чином, об'єднуються традиційний джоулевий нагрів та перемішування рідкого металу під впливом спрямованого магнітного поля.

Соловійов В.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-1454-7520>, Кусков Ю.М. – <https://orcid.org/0000-0002-8091-2274>, Романова І.Ю. – <https://orcid.org/0000-0001-7154-1830>

© В.Г. Соловійов, Ю.М. Кусков, І.Ю. Романова, 2024

У якості показників форми МВ використовують геометричні дані її розмірів, такі як відносна середня для поверхні виробу глибина проплавлення [8, 9], а також висота циліндричної частини МВ. У найкращому випадку оптимальна форма МВ повинна бути мінімальною за висотою та мати циліндричну форму.

У [10] автори прийшли до висновку, що середня секція кристалізатора, що є електропровідною, шунтує частину ШВ і зміщує зону переважного тепловиділення в пристінну область, залишаючи центральну зону відносно холодною. Проте безпосередньо біля самої стінки кристалізатора МВ залишається відносно холодною через водяне охолодження кристалізатора. Унаслідок цього дно МВ може набувати специфічної форми «сомbrero». Форма дна МВ у вигляді «сомbrero» характеризується великою відносною нерівномірністю МВ, тому потрібна її оптимізація.

Математичне моделювання процесів теплообміну, плавлення та затвердіння у електрошлаковій технології стає ефективним засобом теоретичних досліджень [11–14].

Метою роботи є аналіз факторів, що впливають на форму МВ при отриманні біметалевих виробів у стаціонарному СПК з круглим перерізом у процесі плавлення дискретної присадки при її порційному подаванні, а також питання оптимізації теплофізичних процесів наплавлення за допомогою математичного моделювання. У рамках обчислювального експерименту розглянуто можливості поліпшення форми МВ за рахунок змін у конструкції СПК.

Методи експериментальних досліджень. У роботі використано результати експериментального електрошлакового наплавлення (ЕШН) шарів різної товщини в стаціонарному струмопідвідному кристалізаторі з вертикальним розрізом у струмопідвідній секції [15], проведеного з ме-

тою вивчення характеру зміни електротехнічних параметрів процесу плавлення дискретної присадки при порційному подаванні. Під час проведення експерименту спостерігалось обертання ШВ. Напруга змінного струму від трансформатора ТШП-10 із синусоїдальною напругою, що має чотири ступеня зміни напруги, подавалася на клема струмопідвідної секції кристалізатора (СПСК) і піддона кристалізатора. Використовувався «рідкий» старт. Здійснювалася порційна чотирьохразова подача дробу по 2 кг. Під час проведення експерименту проводилися вимірювання у часі напруги, прикладеної до клем мідної втулки СПСК та піддону, а також струм у ланцюзі СПСК–шлакова ванна–металева ванна–виріб–піддон. Здійснювалося цифрове перетворення зазначених параметрів, розрахунок провідності та споживаної потужності вимірюваного електричного ланцюга. Надалі, для спрощення викладу, отримані електричні параметри були віднесені до СПК в цілому. На рис. 1 наведено характер зміни електропровідності СПК в процесі проведення експерименту.

Після перемикання джерела струму з 4-го ступеня на 3-й напруга на СПК змінилася з 51 до 43 В. Засипка дробу супроводжувалася поступовим збільшенням струму та електропровідності СПК навіть після закінчення засипки. Це частково пояснювалося зменшенням рівня шару шлаку між шаром розплавленого металу на піддоні та графітовою футеровкою СПСК, а також збільшенням температури ШВ за рахунок збільшення струму (з 1,9 до 2,8 кА). Зменшення струму було досягнуто за рахунок переходу на 2-й, а потім на 1-й ступінь джерела живлення. При фізичному експерименті використовувався СПК з наступними параметрами конструкції: внутрішній діаметр кристалізатора $D_k = 180$ мм; висота СПСК $h_{vk} = 90$ мм; висота ФСК $h_k = 73$ мм; висота ГФ $h_{gf} = 65$ мм; товщина ГФ $T_{gf} = 15$ мм; глибина ШВ $h_{sh} = 70$ мм.

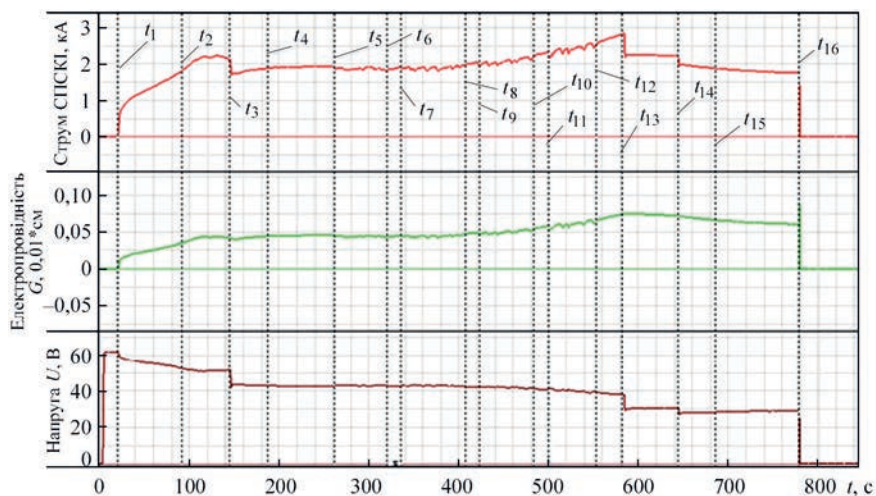


Рис. 1. Зміна струму, електропровідності та напруги в часі на СПК у процесі наплавлення

Етапи проведення наплавлення (рис. 1): t_1 – заливка рідкого шлаку, вмикання джерела живлення на 4-й ступінь; t_2 – підвищення обертання шлаку; t_3 – ввімкнено 3-й ступінь; t_4 – процес проходить стабільно; t_5 – початок подачі 1-ї порції дробу; t_6 – кінець подачі 1-ї порції дробу; t_7 – початок подачі 2-ї порції дробу; t_8 – кінець подачі 2-ї порції дробу; t_9 – початок подачі 3-ї порції дробу; t_{10} – кінець подачі 3-ї порції дробу; t_{11} – початок подачі 4-ї порції дробу; t_{12} – кінець подачі 4-ї порції дробу; t_{13} – ввімкнено 2-й ступінь; t_{14} – ввімкнено 1-й ступінь; t_{15} – обертання ванни нормальне; t_{16} – вимкнення джерела живлення.

В експерименті використовувався флюс АНФ-29 (температура плавлення 1230...1250 °С); дріб, що наплавляється, з хромистого чавуну, порція по 2 кг. Розплавляючись, порція дробу перетворювалася в рідкий метал, який в подальшому кристалізувався у вигляді наплавленого шару завтовшки ~12 мм.

За результатами аналізу даних експерименту отримано залежність питомої електропровідності флюсу АНФ-29 σ_{sh} від температури ШВ у гіпотетичній точці її максимального значення $\sigma_{sh}[T_{max}] = 1,349 \cdot 10^{-3} \cdot T_{max}^{1,638} + 138,2$ для діапазону температур 1000...2000 °С. Гіпотетична точка максимального значення температури ШВ – це точка, в якій температура ШВ досягає найбільшої величини при заданих параметрах електрошлакового процесу. Максимальне значення температури ШВ в гіпотетичній точці визначалося в результаті розрахунку теплового поля ШВ за допомогою додаткової моделі конструкції заміщення СПК, подібно до описаної в [15].

За результатами аналізу отримано залежності потужності СПК, що споживається кристалізатором, від електропровідності СПК для чотирьох ступенів роботи джерела живлення (рис. 2).

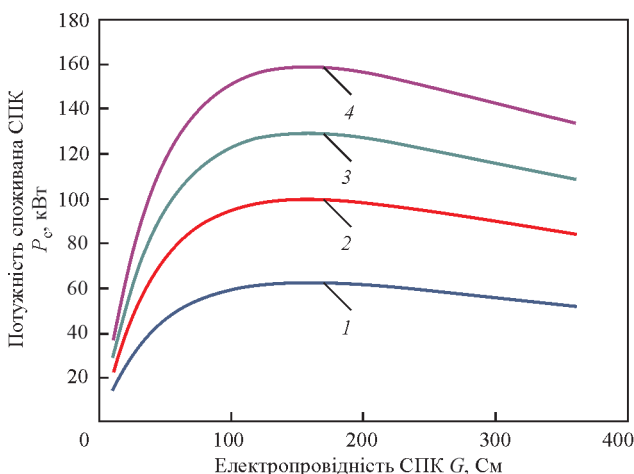


Рис. 2. Залежності потужності, що споживається кристалізатором, від електропровідності СПК для чотирьох ступенів зміни напруги джерела живлення ТШП-10, отримані при наплавленні: 1 – перший ступінь; 2 – другий ступінь; 3 – третій ступінь; 4 – четвертий ступінь

Дані цих залежностей використовувались для прогнозування параметрів наплавлення, які не були отримані під час фізичного експерименту. Аналітичний вигляд отриманих залежностей:

$$P_c(G) = a \cdot \exp(b \cdot G) + c \cdot \exp(d \cdot G)$$

де для 1-го ступеня: $a = 77,16$; $b = -0,001076$; $c = -75,78$; $d = -0,02025$; для 2-го ступеня: $a = 124,0$; $b = -0,0011076$; $c = -121,8$; $d = -0,02025$; для 3-го ступеня: $a = 160,6$; $b = -0,001076$; $c = -157,7$; $d = -0,02025$; для 4-го ступеня: $a = 197,6$; $b = -0,001076$; $c = -194,0$; $d = -0,02025$. Коефіцієнт детермінації $R = 0,9999$.

Отримані в результаті експериментів дані були використані для створення та валідації математичної моделі ЕШН в СПК.

Мультифізичне моделювання. Мультифізичне моделювання проводилося на графічній тривимірній моделі (рис. 3, а) з моделюванням джоулевого нагріву. Модель містить в собі верхню струмопідвідну секцію кристалізатора, що складається з мідної водоохолоджуваної втулки без вертикального розрізу та графітової футеровки, а також нижню формуючу секцію кристалізатора, яка є другою мідною втулкою. Крім того, модель містить шлакову ванну, виріб, піддон, гарнісаж між формуючою секцією та ШВ/виробом, а також азбестову ізоляцію між секціями кристалізатора та піддоном.

За допомогою магнітного поля, яке створюється струмопровідною секцією кристалізатора, забезпечується обертання шлакової і металевої ванн у горизонтальній площині. У результаті цього інтенсифікується нагрів зовнішніх водоохолоджуваних границь ШВ і відведення тепла від зон максимального її нагріву, що само по собі призводить до вирівнювання теплового поля ШВ у горизонтальному перерізі та підвищення інтенсифікації процесу наплавлення та споживаної процесом потужності. Проте у науковій літературі існують різні думки щодо електромагнітного впливу на глибину металевої ванни, яка утворюється при електрошлаковому процесі. Як зазначає Ксендик Г.В. у [16] «деякі з них вважають, що просте обертання шлакової і металевої ванн призводить до збільшення глибини МВ і лише зворотньо-поступальний рух забезпечує її зменшення». Ми вважаємо, що рішення гідродинамічної задачі, пов'язаної з рухом рідини в шлаковій ванні, може скоригувати певні значення глибини металевої ванни відносно розрахованої за допомогою представленої моделі. Також вважаємо, що тенденції впливу змін геометричних параметрів моделі на форму МВ не зміняться. У зв'язку з викладеним, при моделюванні струмопідвідного кристалізатора ми не застосовували розрізну струмопідвідну секцію, що забезпечує обертання шлакової і ме-

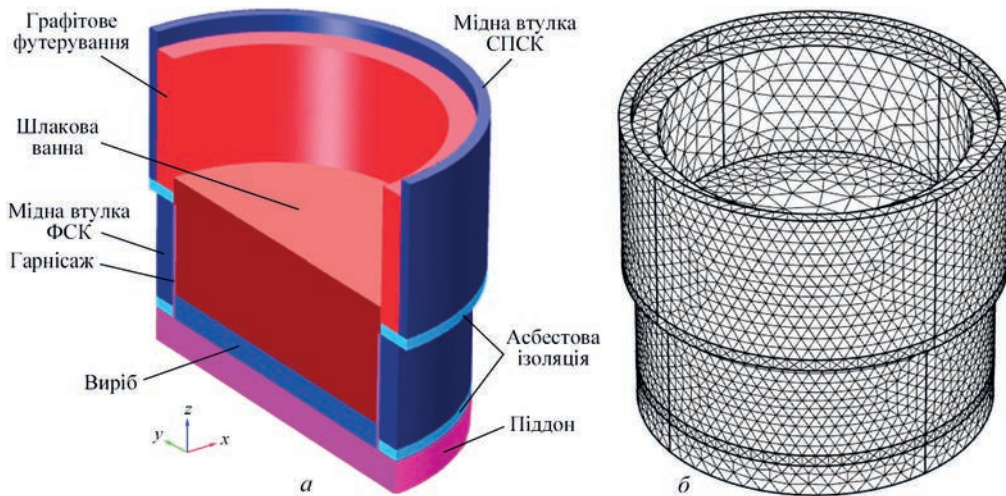


Рис. 3. Приклади схеми моделі: а – структура СПК; б – скінченно-елементна модель СПК

талевої ванни у горизонтальній площині, не розв’язували гідродинамічну задачу, а обмежилися електромагнітною і тепловою моделями.

Виходячи з положень теорії подібності [17], було створено геометричну модель, яка враховує подібність своїх геометричних параметрів з геометричними параметрами фізичної моделі. Головною умовою для моделювання було забезпечення максимальної відповідності геометричної частини моделі геометричним параметрам та результатам фізичного експерименту. При цьому використовувалися фізичні властивості матеріалів шлаку, зварювального виробу та електродів (табл. 1).

У моделі використовуються наступні параметри конструкції: внутрішній діаметр кристалізатора $D_k = 180$ мм; висота СПСК $h_{vk} = 90$ мм; висота ФСК $h_k = 74$ мм; висота ГФ $h_{gf} = 80$ мм; товщина ГФ $T_{gf} = 15$ мм; глибина ШВ $h_{sh} = 90$ мм; товщина мідної охолоджуваної водою поверхні мідної втулки СПСК $l_{gf} = 7$ мм; товщина мідної охолоджуваної водою поверхні мідної втулки ФСК $T_{mk} = 15$ мм; висота азбестової ізоляційної прокладки $h_i = 7$ мм; висота виробу $h_{za} = 15$ мм; висота піддона $h_p = 20$ мм.

Параметри $\rho[T]$, $k[T]$ задано відповідними апроксимуючими залежностями від температури T , К (у статті не наводяться).

Нагрів ШВ здійснюється за рахунок джоулевого тепла, що виділяється при протіканні електричного струму через неї. Для дослідження розподілу електричного поля, струму та потенціалу в шла-

ковій і металевій ваннах, а також для аналізу розподілу тепла в об’ємі досліджуваної зони було використано скінченно-елементну модель (рис. 3, б).

Модель вирішує наступні рівняння теплопровідності:

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

де $q = -k(T)\nabla T$; Q – додаткове джерело тепла (у якості якого може бути розігріта металева ванна), Вт/м³; q – густина потоку тепла, Вт/м².

У стаціонарній системі координат точкова форма закону Ома виглядає таким чином: $J = \sigma(T)E$; де J – густина струму, А/м²; E – напруженість електричного поля, В/м. Статична форма рівняння неперервності струму в електропровідному середовищі вимагає: $\nabla J = -\nabla \sigma(T)\nabla U = 0$, де U – напруга на СПК, В.

У моделі вирішується стаціонарна задача, при цьому виводяться результати вже встановленого процесу. Модель дозволяє визначати потенціал, густина струму та температуру в кожній точці досліджуваного простору в різних варіаціях (у межах визначених технологією параметрів) діаметра кристалізатора, товщини виробу, відстані між МВ і нижнім торцем СПСК, глибини ШВ тощо.

Прийнято наступні обмеження для розрахунку параметрів мультифізичних процесів у моделі:

- не розглядаються гідродинамічні процеси у шлаковій ванні;
- не розглядається пристрій водяного охолодження мідних втулок СПСК і ФСК, а також піддона;

Таблиця 1. Фізичні властивості матеріалів для моделювання

Параметр	Виріб	Шлак	Графіт	Асбест	Мідь
Теплоємність C_p , Дж/(кг·К)	475	1200	710	1000	385
Відносна діелектрична проникність ϵ	1	1	1	5	1
Щільність ρ , кг/м ³	7850	8960	1950	$\rho[T]$	8940
Теплопровідність k , Вт/(м·К)	44,5	60	150	$k[T]$	400
Коефіцієнт температурного розширення α , 1/К	$12,3 \cdot 10^{-6}$	–	–	–	$3,862 \cdot 10^{-3}$
Питома електропровідність σ , См/м	$4,032 \cdot 10^6$	$\sigma_{sh}[T]$	$2 \cdot 10^5$	$4,032 \cdot 10^{-6}$	$5,998 \cdot 10^7$

- електричними контактами моделі є вільні бічні поверхні електрода СПСК і піддона;
- напруга на СПК, що підводиться, не перевищує 15...60 В;
- струм джерела живлення не перевищує 7 кА;
- максимальне значення температури T_{\max} нагріву елементів ШВ не перевищує температури кипіння шлаку. У моделі $T_{\max} = 1800$ °С;
- не розглядаються теплові втрати за рахунок випромінювання;
- розглядаються значення тільки встановлених параметрів після перехідного процесу.

За результатами аналізу даних, отриманих з експерименту, визначено залежність питомої електропровідності флюсу АНФ-29 від температури ШВ у точці її максимального значення. Цю залежність використано для контролю T_{\max} під час розрахунку результатів моделювання з метою її не перевищення. Якщо в результаті проведення математичного експерименту при заданих вхідних параметрах T_{\max} перевищує значення температури кипіння шлаку, то значення вхідних параметрів переглядаються.

Математичні експерименти з формування МВ.

1. Вплив глибини шлакової ванни на форму металеві ванни. Вплив зростання глибини ШВ на її тепловий рівень при незмінній міжелектродній відстані розглянуто при наступних початкових умовах: відстань між виробом і рівнем нижнього торця СПСК $H_{gl} = 73$ мм; глибина ШВ $h_{sh} = 90$ мм; напруга на СПК відносно піддона $U = 42,7$ В. Розрахунок при цих початкових умовах показав, що максимальна температура ШВ на рівні нижнього торця СПСК $T_{\text{СПСК}} = 1767$ °С; максимальна температура дзеркала МВ $T_{\text{МВ}} = 1450$ °С; електропровідність кристалізатора $G_{\text{к}}^{\text{МВ}} = 44,5$ См; потужність споживання $P_{\text{к}} = 81,1$ кВт; максимальна глибина рідкої частини МВ $H_{\text{mv}} = 6,7$ мм; глибина міжфазової частини МВ $H_{\text{mf}} = 2$ мм.

Після збільшення глибини ШВ на 40 мм (від 90 мм до 130 мм) при незмінних значеннях інших параметрів розрахунок показав наступне: максимальна температура ШВ на рівні нижнього торця СПСК $T_{\text{СПСК}} = 1627$ °С; максимальна температура дзеркала МВ $T_{\text{МВ}} = 1525$ °С; електропровідність кристалізатора $G_{\text{к}}^{\text{МВ}} = 49,9$ См; потужність споживання $P_{\text{к}} = 91$ кВт; максимальна глибина рідкої частини МВ $H_{\text{mv}} = 9,6$ мм; глибина міжфазової частини МВ $H_{\text{mf}} = 2$ мм.

Відносний вплив глибини ШВ при незмінних інших геометричних параметрах на споживану процесом потужність, електропровідність СПК і глибину МВ наступний: $\delta P_{\text{к}} = (91 - 81,1)/40 = 0,25$; $\delta G_{\text{к}} = (49,9 - 44,5)/40 = 0,135$; $\delta h_{\text{mv}} = (9,6 - 6,7)/40 = 0,0725$.

З цього випливає, що збільшення глибини ШВ при незмінних інших геометричних параметрах призводить до збільшення глибини МВ. Наприклад, збільшення глибини ШВ на 10 мм призводить до збільшення глибини МВ на ~0,7 мм.

2. Вплив величини зносу нижнього краю графітової футеровки на форму металеві ванни. Розглянуто вплив зносу O_{gr} нижнього краю графітової футеровки СПСК у результаті експлуатації на споживану кристалізатором потужність, електропровідність і глибину МВ. Для розрахунків прийнято шість значень висоти зносу ГФ відносно її початкового місця положення, маючи на увазі, що при значенні $O_{gr} = 0$ розрахунок проведено в п. 1. Результати наведено в табл. 2.

У №№ 5 і 6 експерименту відсутність ванни обумовлюється відсутністю необхідного рівня потужності, що виділяється в шлаковій ванні, за даних умов, що створилися.

Дані (табл. 2) свідчать про значний вплив зносу нижнього краю ГФ на формування МВ. Це явище пов'язане з різким охолодженням ШВ, викликаним безпосереднім контактом шлаку з водоохолоджуваною мідною втулкою. Важливо враховувати, що оголення стінки мідної втулки СПСК може призвести до її швидкого зносу через електроерозію, особливо враховуючи, що нижній край СПСК характеризується найбільшою густиною струму, що протікає в кристалізаторі. Крім того, збільшення вироблення ГФ призводить до зростання площі контакту зі шлаком і, відповідно, до підвищення температури стінки мідної втулки, що межує з ним. Чим більша площа струмоподвідної втулки захищена графітом, тим менше ймовірність пошкодження втулки в цьому місці ерозією і тим більша ймовірність того, що при якійсь малій площі незахищеної втулки та відповідній малій щільності струму, що проходить через цю частину, можливо утворення шлакової корки на цій малій площі поверхні. Тобто, в якийсь момент і протягом якогось часу може відбутися заміна графітової

Таблиця 2. Вплив зносу нижнього краю ГФ на форму металеві ванни

№ експ.	Знос ГФ O_{gr} , мм	Потужність $P_{\text{к}}$, кВт	Провідність СПК $G_{\text{к}}$, См	Глибина МВ H_{mv} , мм	Діаметр дзеркала МВ $\phi_{\text{м}}$, мм
1	0,1	80,2	44,0	6,7	176
2	1	79,6	43,6	6,2	176
3	4	77,2	42,3	4,28	146
4	8	73,9	40,6	1	74
5	12	70,7	38,7	–	Ванна відсутня
6	16	67	36,8	–	Ванна відсутня

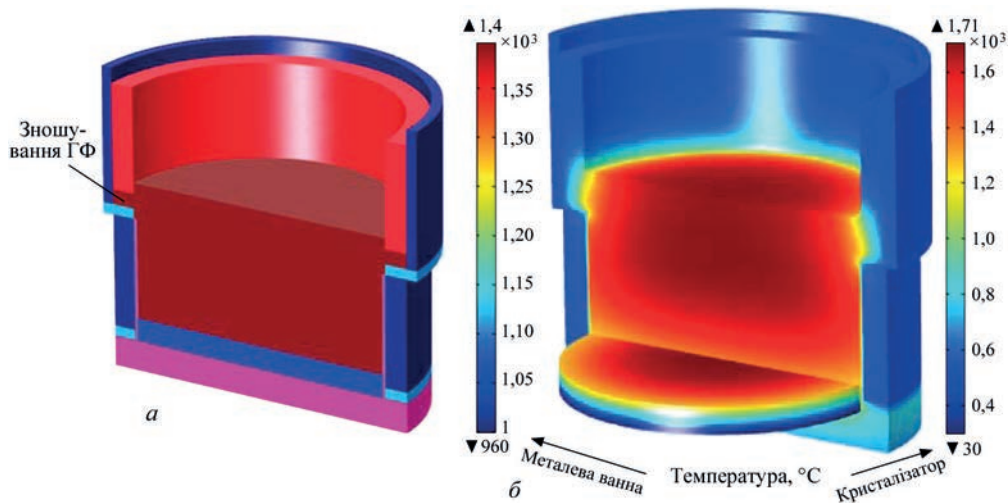


Рис. 4. Приклади результатів моделювання: а – місце зносу графітової футеровки; б – графічний розподіл температури в СПК при деформації ГФ

го захисту якоїсь частини мідної поверхні захистом за допомогою шлакової корки. Але так як струмопідвідна секція підключена до джерела живлення, то при подальшому збільшенні площі незахищеної графітом мідної втулки буде відбуватися нагрів мідної стінки до температури плавлення (близько 1100 °С) і може виникнути аварійна ситуація.

На рис. 4 наведено фрагменти моделювання зносу ГФ.

3. Вплив зміни товщини мідної втулки СПСК на форму металевої ванни. Товщини водоохолоджуваних мідних втулок верхнього СПСК і нижнього ФСК, а також товщина водоохолоджуваного піддона в сумі з заготовкою визначають витратну складову теплового балансу СПК. У результаті зміни товщин вказаних складових конструкції СПК при незмінній напрузі можна змінювати тепловий рівень процесу наплавлення та впливати на форму МВ.

За допомогою створеної моделі проведено аналіз величини впливу зміни товщини стінки мідної втулки СПСК l_{gf} на P_k , G_k і H_{mv} . Початкове значення $l_{gf} = 7$ мм. У табл. 3 наведено результати розрахунків впливу товщини мідної втулки СПСК на параметри МВ. Розрахунки проведено при напрузі на СПК $U = 35,7$ В, відстані між дзеркалом МВ та нижньою кромкою СПСК 58 мм.

Наведені дані свідчать, що при незмінній напрузі практично відсутній вплив товщини стінки мідної втулки СПСК на електропровідність кристалізатора, споживану ним потужність і тем-

пературу сторони втулки, що межує з ГФ. Зміна товщини стінки має відносно малий вплив на глибину МВ. При збільшенні товщини стінки мідної втулки СПСК глибина МВ трохи збільшується, при цьому й діаметр дзеркала або висота циліндричної частини МВ трохи збільшується. Це пояснюється тим, що при збільшенні товщини стінки мідної втулки СПСК збільшується тепловий рівень ШВ за рахунок зменшення втрат через втулку. При незмінній величині споживаної потужності нагрів МВ збільшується. Це супроводжується збільшенням глибини та ширини МВ. Той факт, що незначна зміна товщини стінки призводить до зміни температури сторони втулки, що межує з ГФ, говорить про те, що товщину стінки можна ще зменшити до певної величини, яка залежить від організації системи охолодження мідної втулки. При цьому зменшиться глибина МВ.

У зв'язку з тим, що втулка СПСК знаходиться під тепло- та електрозахистом ГФ, виникає потреба перевірити можливість заміни мідної втулки на сталеву, як менш вартісну.

4. Заміна мідної втулки СПСК на сталеву. Вплив на форму металевої ванни. Експеримент проведено в умовах, аналогічних наведеним у п. 3 розділу. Для експерименту обрано сталь Ст3. Представлені дані (табл. 4) підтверджують, що при заміні мідної втулки СПСК на сталеву та при збереженні такої ж напруги на СПК, як і в попередньому експерименті, споживана потужність і електропровідність СПК залишилися без змін. Проте спостерігалось збільшення теплового впли-

Таблиця 3. Аналіз впливу товщини стінки мідної втулки СПСК на параметри МВ

№ експ.	Товщина мідної стінки l_{gf} , мм	Потужність P_k , кВт	Провідність СПК G_k , См	Глибина МВ H_{mv} , мм	Діаметр дзеркала МВ \varnothing_{mv} , мм	Температура мідної стінки, °С
1	7	71,9	56,5	7,2	162	571
2	11	72,0	56,5	7,4	162	580
3	15	72,0	56,5	7,5	164	590

Таблиця 4. Аналіз впливу заміни мідної втулки СПСК на сталеву на форму металевої ванни

№ експ.	Товщина сталеві стінки l_{gr} , мм	Потужність P_k , кВт	Провідність СПК G_k , См	Глибина МВ H_{mv} , мм	Діаметр дзеркала МВ \varnothing_{mv} , мм	Температура сталеві стінки, °С
1	7	71,9	56,5	8,8	172	701
2	11	72,0	56,5	9,7	176	761
3	15	72,0	56,5	10,4	176	810

Таблиця 5. Аналіз впливу товщини стінки мідної втулки ФСК на параметри МВ

№ експ.	Товщина мідної стінки T_{mk} , мм	Потужність P_k , кВт	Провідність СПК G_k , См	Глибина МВ H_{mv} , мм	Діаметр дзеркала МВ \varnothing_{mv} , мм	Температура мідної стінки, °С
1	7	76,1	56,5	7	167	559
2	11	76,2	56,5	7,2	167,8	565
3	15	76,2	56,6	10,2	170,2	588

Таблиця 6. Аналіз впливу товщини піддона на параметри МВ

№ експ.	Товщина піддона h_p , мм	Потужність P_k , кВт	Провідність СПК G_k , См	Глибина МВ H_{mv} , мм	Діаметр дзеркала МВ \varnothing_{mv} , мм	Макс. температура верхньої поверхні виробу, °С
1	20	71,9	56,5	7,2	162,0	1425
2	26	71,9	56,4	10,5	173,8	1464
3	30	71,9	56,4	12,5	176,0	1486

ву на МВ, що призвело до збільшення її глибини та діаметра дзеркала. З цього випливає, що шляхом зниження напруги на СПК і, відповідно, зниження споживаної потужності СПК, можна повернути характеристики МВ до значень, аналогічних попередньому експерименту (п. 3).

5. Вплив зміни товщини мідної втулки ФСК на форму металевої ванни. Експеримент проведено в умовах, аналогічних п. 3. У табл. 5 наведено дані розрахунку впливу товщини охолоджуваної водою мідної втулки формуючої секції ФСК T_{mk} на P_k , G_k і H_{mv} .

Наведені дані свідчать, що при незмінній напрузі практично відсутній вплив товщини стінки мідної втулки ФСК на електропровідність кристалізатора та споживану ним потужність. Зміна товщини стінки має значніший вплив на глибину МВ, ніж зміна товщини мідної стінки СПСК, через наявність в СПСК теплоізолюючої ГФ. При збільшенні товщини стінки мідної втулки ФСК глибина МВ збільшується, при цьому й діаметр дзеркала МВ збільшується. Це пояснюється тим, що при збільшенні товщини стінки мідної втулки ФСК збільшується тепловий рівень ШВ за рахунок зменшення втрат тепла через втулку. При незмінній величині споживаної потужності нагрів МВ збільшується, що супроводжується збільшенням глибини та ширини МВ. Це важливо в тому випадку, якщо необхідно при заданій напрузі збільшити діаметр дзеркала МВ до максимальної величини.

6. Вплив зміни товщини охолоджуваного водою піддона на форму металевої ванни. Експеримент проведено в умовах, аналогічних описаним у п. 3. У табл. 6 наведено дані розрахунку впливу зміни товщини охолоджуваного водою піддона h_p на P_k , G_k і H_{mv} . Висота виробу в експерименті залишається незмінною $h_{za} = 30$ мм. Наведені дані свідчать, що при незмінній напрузі джерела живлення прак-

тично відсутній вплив зміни товщини піддона на електропровідність кристалізатора та споживану ним потужність.

Зміна товщини піддона призводить до збільшення глибини та діаметра дзеркала МВ. При зменшенні товщини піддона та збільшенні напруги на СПК можна значно покращити форму МВ. На рис. 5 наведено приклад МВ з глибиною $H_{mv} = 2,6$ мм і діаметром дзеркала 176 мм при $U = 51$ В, товщиною піддона $h_p = 5$ мм, $P_k = 116$ кВт і $G_k = 44,5$ См. У даному прикладі при зменшенні товщини піддона досягнуто обмеження за значенням максимального значення температури ШВ $T_{max} < 1800$ °С.

При пошуку конфігурації СПК і напруги на СПК для досягнення мінімальної глибини та максимального діаметра дзеркала ванни були дотримані умови, що температура ШВ у зоні її максимального значення не перевищувала 1800 °С і напруга на СПК не перевищувала 60 В.

7. Вплив зміни діаметра кристалізатора на форму МВ. Експеримент проведено в діапазоні зміни діаметра кристалізатора $D_k = 180...300$ мм.

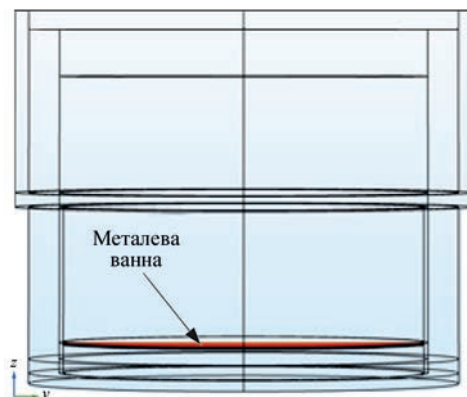


Рис. 5. Приклад металевої ванни з мінімальною глибиною для даної конфігурації СПК при мінімальній товщині піддона

Таблиця 7. Аналіз впливу зміни діаметра кристалізатора на параметри МВ

№ експ.	Діаметр кристалізатора D_k , мм	Потужність P_k , кВт	Провідність СПК G_k , См	Глибина МВ H_{mv} , мм	Діаметр дзеркала МВ \varnothing_{mv} , мм	Макс. температура верхньої поверхні виробу, °С
1	180	74,4	60,8	10,6	176	1471
2	220	100,0	81,8	9,7	216	1451
3	260	126,0	102,8	5,7/7,5*	256	1402/1435*
4	300	152,0	124,0	5,1/7,1*	296	1355/1418*

Примітка. * при діаметрі кристалізатора 260 мм і вище; напрузі на СПК $U = 35$ В і відстані між виробом і рівнем нижнього торця СПСК $H_{gl} = 53$ мм МВ приймає форму «сомbrero» [9] (див. рис. 6), яке характеризується двома значеннями параметрів H_{mv} і максимальними значеннями температури поверхні виробу.

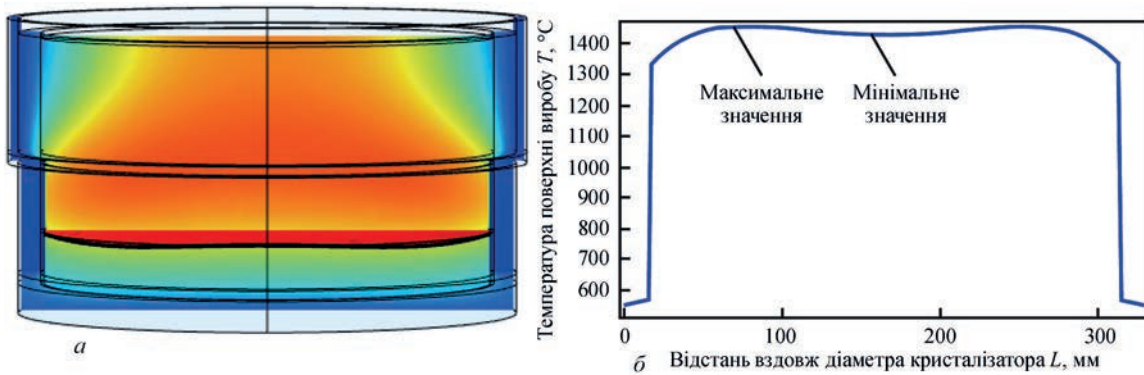


Рис. 6. Форма МВ і температура вздовж діаметра верхньої кромки виробу при діаметрі кристалізатора 260 мм: а – форма МВ «сомbrero»; б – розподіл температури з підтвердженням нерівномірності у формі «сомbrero» з позначенням мінімального та максимального значень температури

Для отримання шуканих параметрів, які не будуть виходити за межі робочих, прийнято значення напруги на СПК $U = 35$ В і відстань між виробом і рівнем нижнього торця СПСК $H_{gl} = 53$ мм. Результати наведено в табл. 7.

Представлені дані свідчать, що при стабільних значеннях напруги на СПК та незмінній відстані між виробом і нижньою кромкою СПСК діаметр дзеркала МВ збільшується майже пропорційно діаметру кристалізатора. Потужність, споживана кристалізатором, та електропровідність зростають приблизно на 20 % швидше. Максимальна температура верхньої поверхні виробу залишається майже незмінною. Водночас глибина МВ зменшується майже вдвічі, що призводить до зростання співвідношення діаметра дзеркала до глибини (\varnothing_{mv}/H_{mv}) з 16,6 до 58.

Висновки

За результатами аналізу отриманих експериментальних даних побудовано залежність питомої електропровідності флюсу АНФ-29 від температури ШВ у точці її максимального значення. Отримано залежності потужності, що споживається кристалізатором, від електропровідності ШВ для чотирьох ступенів роботи джерела живлення ТШП-10.

Проведено мультифізичне моделювання, яке дозволяє моделювати процеси джоулевого нагріву для отримання біметалічних виробів у стаціонарному струмопідвідному кристалізаторі з круглим перерізом у процесі плавлення дискретної присад-

ки при її порційному подаванні. Проведені математичні експерименти дозволили виявити шляхи оптимізації деяких значень вихідних параметрів процесу наплавлення, включаючи геометричні параметри СПК.

Отримані при математичному експерименті результати показали, що збільшення глибини ШВ при незмінних інших геометричних параметрах призводить до збільшення глибини МВ. Виявлено значний вплив зносу нижнього краю ГФ на параметри МВ. При збільшенні зносу зменшуються глибина та діаметр МВ, падає електропровідність і споживана потужність ШВ.

Заміна мідної втулки СПСК на сталеву при збереженні напруги на СПК практично не впливає на зміну споживаної потужності та електропровідності, але призводить до збільшення глибини та діаметра МВ.

При незмінній напрузі на СПК практично відсутній вплив зміни товщини стінки мідної втулки СПСК і ФСК на електропровідність кристалізатора та споживану ним потужність.

При незмінній напрузі на СПК практично відсутній вплив зміни товщини піддона на електропровідність кристалізатора та споживану ним потужність. Але збільшення товщини піддона призводить до збільшення глибини та діаметра дзеркала МВ.

При збільшенні діаметра кристалізатора з 180 до 300 мм діаметр дзеркала МВ збільшується майже пропорційно діаметру кристалізатора. Потужність, споживана кристалізатором, та електропро-

відність зростають приблизно на 20 % швидше. Максимальна температура верхньої поверхні виробу залишається майже незмінною. Водночас глибина МВ зменшується майже вдвічі, що призводить до зростання співвідношення діаметра дзеркала до глибини ($\frac{D_{mv}}{H_{mv}}$) з 16,6 до 58.

Аналіз результатів дослідження допоможе у вдосконаленні конструкції кристалізатора та технології проведення процесу плавлення дискретної присадки при порційному подаванні в СПК.

Список літератури

1. Ksendzyk, G.V., Frumin, I.I., Shirin, V.S. *Electroslag remelting and surfacing apparatus*. Patent GB 1568746A, Fil. 22.06.77, Publ.4.06.80. <https://patentimages.storage.googleapis.com/6c/fe/4a/9f5b70c9345524/GB1568746A.pdf>
2. Медовар Б.И. и др. (1986) *Металлургия электрошлакового процесса*. Киев, Наукова думка.
3. Кусков Ю.М., Грищенко Т.И. (2019) Формирование металлической ванны при электрошлаковом процессе в токоподводящем кристаллизаторе. *Автоматическая сварка*, **4**, 42–45. DOI: <https://dx.doi.org/10.15407/as2019.04.07>
4. Мамишев В.А., Шинский О.И., Соколовская Л.А. (2018) Интенсификация внутреннего и внешнего теплоотвода при получении литых заготовок в формах с разными свойствами. Сообщение 2. *Металл и литье Украины*, **5-6**(300-301), 38–45.
5. Медовар Л.Б., Цыкуленко А.К., Чернец А.В. и др. (2000) Исследование влияния параметров двухконтурной схемы ЭШП на размеры и форму металлической ванны. *Проблемы специальной электрометаллургии*, **4**, 3–7.
6. Протокивилон И.В., Порохонько В.Б. (2014) Способы управления кристаллизацией металла слитков при ЭШП. *Современная электрометаллургия*, **3**, 7–15.
7. Hou, Z., Dong, Y., Jiang, Z. et al. (2022) Effect of an external magnetic field on improved electroslag remelting cladding process. *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, **29**, 1511–1521. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12613-021-2277-3>
8. Соловьев В.Г., Кусков Ю.М. (2018) Влияние технологических и электрических параметров ЭШН в токоподводящем кристаллизаторе на скорость плавления электрода и проплавление основного металла. *Автоматическая сварка*, **6**, 24–32. DOI: <https://dx.doi.org/10.15407/as2018.06.03>
9. Матвиенко В.Н., Мазур В.А., Лещинский Л.К. (2015) Оценка формы и размеров сварочной ванны при наплавке комбинированным ленточным электродом. *Автоматическая сварка*, **9**, 30–33.
10. Томиленко С.В., Кусков Ю.М. (2000) Регулирование и стабилизация глубины проплавления основного металла при электрошлаковой наплавке в токоподводящем кристаллизаторе. *Сварочное производство*, **9**, 32–35.
11. Соколовская Л.А., Мамишев В.А. (2009) О математическом моделировании задач с фазовыми переходами в металлургии и литейном производстве. *Процессы литья*, **2**, 24–29.
12. Liu, Fb., Zang, Xm., Jiang, Zh. et al. (2012) Comprehensive model for a slag bath in electroslag remelting process with a current-conductive mould. *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, **19**, 303–311. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12613-012-0555-9>
13. Махненко О.В., Миленин А.С., Козлитина С.С., Дзюбак Л.И. (2016) Оптимизация технологического процесса электрошлаковой плавки стальных цилиндрических слитков на основе результатов математического моделирования. *Зб. докладов 8-ї Міжнародної конференції «Математическе моделювання та інформаційні технології в сварці та родственных процессах», 19–23 сентября 2016 г., Одесса*, сс. 96–101.
14. Zhiwen Hou, Yanwu Dong, Zhouhua Jiang et al. (2018) Simulation of compound rolls produced by electroslag remelting cladding method. *Metals*, **8**(7), 504. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8070504>
15. Кусков Ю.М., Соловьев В.Г., Лентюгов И.П., Жданов В.А. (2018) Электрошлаковая наплавка слоев разной толщины в стационарном токоподводящем кристаллизаторе. *Автоматическая сварка*, **10**, 40–44. DOI: <https://dx.doi.org/10.15407/as2018.10.06>
16. Ксэндзык Г.В. (1975) Токоподводящий кристаллизатор, обеспечивающий вращение шлаковой ванны. *Спецелектрометаллургия*, **27**, 32–40.
17. Гухман А.А. (1973) *Введение в теорию подобия*. 2-е изд. Москва, Высш. школа.

References

1. Ksendzyk, G.V., Frumin, I.I., Shirin, V.S. (1980) *Electroslag remelting and surfacing apparatus*. USA, Patent GB 1568746A, Fil. 22.06.77, Publ.4.06.80. <https://patentimages.storage.googleapis.com/6c/fe/4a/9f5b70c9345524/GB1568746A.pdf>
2. (1986) *Metallurgy of electroslag process*. Ed. by B.I. Medovarov et al. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
3. Kuskov, Yu.M., Grishchenko, T.I. (2019) Formation of metal pool in current-supplying mould at electroslag process. *The Paton Welding J.*, **4**, 33–36. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.04.07>
4. Mamyshev, V.A., Shinskii, O.I., Sokolovskaya, L.A. (2018) Intensification of internal and external heat sink at the manufacture of cast billets in molds with different properties. Report 2. *Metal and Casting of Ukraine*, **5-6**(300-301), 38–45 [in Russian]
5. Medovar, L.B., Tsykulenko, A.K., Chernets, A.V. et al. (2000) Examination of the effect of the parameters of the two-circuit system of electroslag remelting on the dimensions and shape of the metal pool. *Advances in Special Electrometallurgy*, **4**, 3–7.
6. Protokovilov, I.V., Porokhonko, V.B. (2014) Methods to control metal solidification in ESR. *Sovrem. Elektrometall.*, **3**, 7–15.
7. Hou, Z., Dong, Y., Jiang, Z. et al. (2022) Effect of an external magnetic field on improved electroslag remelting cladding process. *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, **29**, 1511–1521. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12613-021-2277-3>
8. Soloviov, V.G., Kuskov, Yu.M. (2018) Influence of technological and electrical parameters of ESS in current-supplying mould. *The Paton Welding J.*, **6**, 20–27. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.06.03>
9. Matvienko, V.N., Mazur, V.A., Leshchinsky, L.K. (2015) Evaluation of shape and sizes of weld pool in surfacing using combined strip electrode. *The Paton Welding J.*, **9**, 28–31. <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.09.04>
10. Tomilenko, S.V., Kuskov, Yu.M. (2000) Regulation and stabilization of base metal depth penetration in electroslag surfacing in current-supplying mould. *Svarochn. Proizvodstvo*, **9**, 32–35 [in Russian].
11. Sokolovskaya, L.A., Mamihev, V.A. (2009) Mathematical modeling of problems with phase transitions in metallurgy and foundry *Protsessy Litya*, **2**, 24–29 [in Russian].
12. Liu, Fb., Zang, Xm., Jiang, Zh. et al. (2012) Comprehensive model for a slag bath in electroslag remelting process with a current-conductive mould. *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, **19**, 303–311. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12613-012-0555-9>
13. Makhnenko, O.V., Milenin, A.S., Kozlitina, S.S., Polishko, A.A., Dzyubak, L.I. (2016) Optimizing technological process of electroslag melting of steel cylindrical ingots based on results of mathematical modeling. In: *Proc. 8th Int. Conf. On Mathematical Modeling and Information Technologies in Welding and Related Processes (19–23 September 2016, Odesa)*, 96–101.
14. Zhiwen Hou, Yanwu Dong, Zhouhua Jiang et al. (2018) Simulation of compound rolls produced by electroslag remelting cladding method. *Metals*, **8**(7), 504. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8070504>
15. Kuskov, Yu.M., Soloviov, V.G., Lentjugov, I.P., Zhdanov, V.A. (2018) Electroslag surfacing of layers of different thickness in stationary current-supplying mould. *The Paton Welding J.*, **10**, 33–36. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwg2018.10.06>
16. Ksendzyk, G.V. (1975) Current-supplying mould providing slag pool rotation. *Spets. Elektrometall.*, **27**, 32–40 [in Russian].
17. Gukhman, A.A. (1973) *Introduction to the theory of similarity*. 2nd ed. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].

OPTIMIZATION OF THE METAL POOL SHAPE DURING ELECTROSLAG MELTING IN A STATIONARY CURRENT-CARRYING MOULD FOR MANUFACTURING OF BIMETALLIC PRODUCTS

V.G. Solovyov, Yu.M. Kuskov, I.Yu. Romanova

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

E-mail: hhsova@gmail.com

Mathematical modeling of multiphysics processes of Joule heating has been conducted, using a finite-element model of a stationary current-carrying mould (CCC). To manufacture bimetallic products using a stationary current-carrying mould with a circular cross-section during melting of a discrete additive at its batch feeding, the study presents the results of calculated assessment of the dependence of such metal pool shape parameters as the mirror diameter and the liquid fraction depth on the slag pool depth and CCC design parameters, namely the mould diameter, the thickness of copper bushings in the mould current-carrying and forming sections, the water-cooled pallet thickness, and the variations in the graphite lining height, because of wear. The findings will contribute to improvement of the mould design, optimization of the metal pool shape, and the technology of discrete additive melting at batch feeding in stationary CCC. 17 Ref., 7 Tabl., 6 Fig.

Keywords: stationary current-carrying mould, metal pool parameters, shape optimization, multiphysics modeling, electroslag surfacing, bimetallic product

Надійшла до редакції 21.02.2024

Отримано у переглянутому вигляді 04.04.2024

Прийнято 20.05.2024

IX Міжнародна зварювальна виставка ExpoWELDING

Міжнародний конгрес-центр в Катовіце, Польща

15–17 Жовтня 2024



9th International Welding Fair ExpoWELDING

International Congress Centre in Katowice, Poland

15–17 October 2024

ExpoWELDING є найважливішою зварювальною виставкою в Польщі та однією з найкращих галузевих у даній галузі в Європі. Серед учасників виставки – представники провідних польських та міжнародних виробників зварювального обладнання, програмного забезпечення, робототехніки та автоматизації. Виставка – це чудова нагода розпочати та розширити ваші ділові відносини.

За традицією, центральне місце на виставці ExpoWELDING займає Міжнародна конференція зі зварювання, організована її головним спонсором: Łukasiewicz Research Network – Institute of Welding. Конференція є можливістю налагодити зв'язки між польською дослідницькою спільнотою та промисловими технологіями та інженерами, а також представити нові відкриття та оцінити поточний стан знань у галузі зварювання.

3300 спеціалістів галузі, майже 100 експонентів з 11 країн, 10 000 м² виставкової площі, 5 додаткових заходів, 63-я престижна міжнародна конференція зі зварювання – це була 8-а виставка ExpoWELDING у цифрах. Присутність лідерів зварювальної галузі та відомих гостей з провідних зварювальних установ робить ExpoWELDING особливо популярним серед спеціалістів галузі.

ExpoWELDING збирає представників таких галузей, як металургія, гірничодобувна промисловість, суднобудування, будівництво, залізничний транспорт, енергетика, харчова та автомобільна промисловість. Серед відвідувачів – спеціалісти зі зварювання, менеджери та інженери виробничих підприємств, які мають можливість ознайомитися з найновішими пристроями та технологіями, призначеними для промислових зварювальних процесів.

Демонстрація найновіших комплексних зварювальних рішень, а також інструментів, які покращують якість та ефективність, – це лише деякі з атракцій, які чекають на ExpoWELDING.

Тематика виставки:

- Зварювальне обладнання та апарати
- Зварювальні матеріали
- Роботизація та автоматизація зварювання
- Пристрої для різання
- Технічні гази
- Обладнання для охорони праці та захисту навколишнього середовища
- Термічна обробка

Виставка проходить у сучасному та престижному Міжнародному конгрес-центрі в Катовіце.

Детальніше: <https://www.expowelding.pl/2024>