

**ВИКОРИСТАННЯ МЕХАНІЗМІВ САМОРЕГУЛЮВАННЯ ПІД ЧАС
ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ У СТАЦІОНАРНОМУ
СТРУМОПІДВІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ**

В.Г. Соловйов *, канд. техн. наук, **І.Ю. Романова** **, канд. техн. наук
Інститут електростварювання ім. Є.О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича, 11, Київ, 03150, Україна.
E-mail: hsova@gmail.com; romanova@paton.kiev.ua.

В умовах, коли відсутня система автоматичного управління для електрошлакового наплавлення у стаціонарному струмопідвідному кристалізаторі з використанням плавкого електрода, запропоновано метод механізованого наплавлення із заданими технологічними характеристиками виробу з використанням механізмів саморегулювання. Метод базується на механізованому наплавленні, яке передбачає використання спеціалізованого обладнання для автоматизації контролю процесу наплавлення, у той час як низка підготовчих технологічних операцій виконується в ручному режимі. Цей метод поєднує переваги автоматизації контролю з гнучкістю ручного наплавлення, що сприяє підвищенню продуктивності та якості наплавленого шару. Часткова автоматизація передбачає обов'язковий автоматичний контроль основних технологічних параметрів наплавлення, таких як струм, потужність, електропровідність і напруга, яка подається до стаціонарного струмопідвідного кристалізатора. Бібл. 12, рис. 6.

Ключові слова: стаціонарний струмопідвідний кристалізатор, механізм саморегулювання, параметри металеві ванни, мультифізичне моделювання, електрошлакове наплавлення.

Вступ. Процеси, що відбуваються в стаціонарному струмопідвідному кристалізаторі (СПК) під час електрошлакового наплавлення з використанням плавкого електрода, залежать від багатьох факторів, які не завжди контролюються оператором за допомогою апаратури та часто оцінюються ним інтуїтивно. При цьому точність такої оцінки залежить від досвіду оператора. У разі відсутності системи автоматичного регулювання завдання зі зміни напруги та швидкості подачі електрода виконуються вручну. Це збільшує ймовірність помилок у процесі наплавлення або переплаву. На сьогодні широко застосовується метод механізованого наплавлення [1–5], який базується на використанні спеціалізованого обладнання для автоматизації процесу наплавлення, тоді як ряд операцій виконується в ручному режимі. Цей метод поєднує переваги часткової автоматизації з гнучкістю ручного наплавлення, що сприяє підвищенню продуктивності та у деяких випадках якості наплавленого шару. Часткова автоматизація передбачає обов'язковий автоматичний контроль основних технологічних параметрів наплавлення, таких як струм, потужність, електропровідність і напруга, яка подається до СПК. Електрошлаковий процес відрізняється високою енергоємністю, через що струм у з'єднувальних кабелях може досягати 3 кА, а довжина кабелів іноді перевищує 10 м. Тому вибір топології прокладання кабелів, схеми підключення джерел живлення до СПК, а також урахування втрат потужності у коротких мережах [6–8] стає важливим фактором для підготовки та правильного проведення процесу наплавлення, забезпечуючи повторюваність умов і сприяючи підвищенню професійного рівня наплавника.

Враховуючи, що стаціонарні СПК застосовуються для наплавлення відносно тонких шарів, регулювання рівня металеві ванни не передбачене. Відсутність можливості прямого вимірювання глибини занурення плавкого електрода (ПЕ) за умов наявності кільцевого електрода (КЕ) робить неможливим якісне автоматичне керування швидкістю подачі ПЕ. Крім того, через малий об'єм наплавних робіт у СПК із зовнішнім діаметром до 300 мм використання складних автоматизованих

© Соловйов В.Г., Романова І.Ю., 2025

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0002-1454-7520>; ** <https://orcid.org/0000-0001-7154-1830>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2025



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

систем управління вважається невиправданим. Тому регулювання швидкості подачі плавкого електрода та перемикання напруги на джерелі живлення здійснюються вручну.

У стаціонарних СПК зростання наплавленого шару призводить до зміни міжелектродних відстаней як між піддоном і кільцевим електродом, так і між піддоном і плавким електродом. Ця зміна призводить до підвищення рівня шлакової ванни (ШВ) відносно нижнього краю графітової футеровки (ГФ), збільшуючи площу футеровки, омивану рідким шлаком. Таке підвищення рівня ШВ викликає переміщення вгору нижнього краю плавкого електрода відносно КЕ, що додатково впливає на його тепловий стан. Тому для ефективного управління процесом наплавлення недостатньо стабілізувати лише напругу на СПК або струм джерела живлення. Необхідно регулювати процес відповідно до певного закону, що враховує динамічну зміну напруги, струму та швидкості подачі плавкого електрода.

У зв'язку зі складністю створення систем автоматичного керування напругою на клемах стаціонарних СПК і швидкістю подачі плавкого електрода у шлакову ванну під час наплавлення виникає необхідність глибшого вивчення та використання процесів саморегулювання, характерних для електрошлакового наплавлення (ЕШН). Застосування процесу саморегулювання для заданої швидкості подачі електрода, який забезпечує стабільність швидкості його плавлення, а також процесу саморегулювання напруги на клемах СПК у разі контрольованої електропровідності кристалізатора, дасть змогу мінімізувати помилки, що виникають за ручного керування процесом наплавлення.

Мета роботи полягає у розробці методу використання механізмів саморегулювання під час ЕШН у стаціонарному СПК, що дасть можливість скоротити кількість ручних операцій. Це може значно покращити ефективність процесу наплавлення, особливо під час роботи зі стаціонарними СПК, де точність і повторюваність умов є ключовими факторами.

Виходячи з відсутності автоматичної системи управління, на самому початку процесу наплавлення необхідно створити три умови підготовки до проведення процесу.

1. Вибрати та встановити певний ступінь напруги джерела живлення та не змінювати його до кінця процесу.
2. Визначити та встановити швидкість подачі плавкого електрода та не змінювати її.
3. Встановити затравку на певному початковому значенні її рівня відносно нижньої кромки графітової футеровки.

Експериментальні дослідження. Якщо активна складова електропровідності короткої мережі, яка є частиною електричного ланцюга, що подає струм від джерела живлення до електродів стаціонарного СПК і шлакової ванни, становить приблизно < 200 См, то з'являється можливість використання механізму саморегулювання напруги на СПК. Це означає, що у разі збільшення струму джерела, викликаному скороченням міжелектродного проміжку між піддоном і кільцевим електродом, а також піддоном і плавким електродом, напруга на електродах СПК зменшується за рахунок збільшення падіння напруги в короткій мережі. Це частково запобігає можливому збільшенню виділеної потужності та ризику перегріву ШВ за стабілізованої напруги.

Отриманий авторами досвід під час проведення експериментів показав наступне: на кабелі живлення довжиною ~ 10 м зафіксовано спад напруги на рівні 15...25 В. Перемичка між плавким і неплавким електродами кристалізатора повинна мати мінімальний опір і під'єднуватися безпосередньо до клем кристалізатора. З'єднання перемички з клемою джерела живлення слід здійснювати з використанням кабелю мінімально можливої довжини. Навіть на мідній перемичці, що з'єднує клеми кристалізатора, було помічено спад напруги на рівні 20...25 мВ, що створювало труднощі у разі використання струмових вимірювальних шунтів з вихідним сигналом 0...75 мВ. Вимірювання напруги на кристалізаторі необхідно проводити безпосередньо на його клемах. Для передачі сигналів змінного струму в обчислювальній пристрій використовувалися, залежно від ситуації, вимірювальні трансформатори струму та шунти, що дають змогу вимірювати струм до 2 кА.

Перетворення аналогових сигналів здійснювалося за допомогою АЦП з USB-виходом Е14-140. Для запису та обробки інформації використовувався ноутбук з програмним забезпеченням *PowerGraph*, за джерело живлення СПК – трансформатор ТШП-10. Показники штатного вольтметра на панелі джерела живлення не відповідали реальній напрузі на клемах кристалізатора, тому їх не застосовували для автоматизації технологічного контролю. Використання джерела змінної напруги вимагало застосування спеціальних алгоритмів фільтрації сигналів струму та напруги. Процес фільтрації значно ускладнювався через наявність вентильного ефекту в шлаковій ванні [9, 10]. Цей ефект полягає в тому, що розплавлений шлак змінює свою електропровідність у залежності від

температури, складу та напрямку протікання струму, що призводить до нелінійності та спотворення форми синусоїди. Задля коректної оцінки ступеня нагріву шлаку за виділеною в шлаковій ванні електричною потужністю необхідно враховувати ці спотворення та використовувати спеціалізовані алгоритми розрахунку активної потужності.

Для усереднення параметрів напруги та струму в часі застосовувався фільтр ковзаючого інтегрального середнього [11] на ковзному інтервалі часу 2 с. Двосекундний інтервал часу усереднення дає можливість не втратити інформацію під час перемикання ступенів джерела живлення.

Математичний опис фільтра: $Y(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=t-n+1}^t |X|(i)$, де $Y(t)$ – вихідний сигнал; n – розмір вікна

фільтра; $X(i)$ – значення вхідного сигналу на момент часу i ; t – час; i – порядковий номер окремого значення в наборі даних вхідного сигналу (дискрети). Вікно фільтра ковзаючого інтегрального середнього для двосекундного інтервалу часу усереднення за частоти дискретизації 1 кГц склало $n = 2000$.

Фільтр ковзаючого інтегрального середнього використовувався як для сигналу напруги, так і для сумарного для КЕ і ПЕ струму. Таким чином, було обчислено ефективні значення струму та напруги, добуток яких визначав потужність, споживану ШВ. Відношення сумарного для КЕ та ПЕ струму до напруги визначало інтегральну активну складову електропровідності ШВ.

Аналіз експериментальних даних, представлених у [12], дав змогу отримати залежності

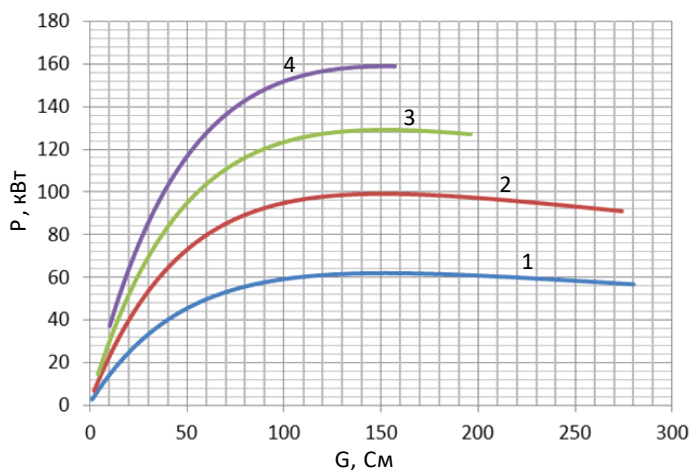


Рис. 1

– ПЕ; 2 – КЕ; 3 – ГФ; 4 – ШВ; 5 – мідна втулка кристалізаційної секції; 6 – затравка; 7 – піддон;

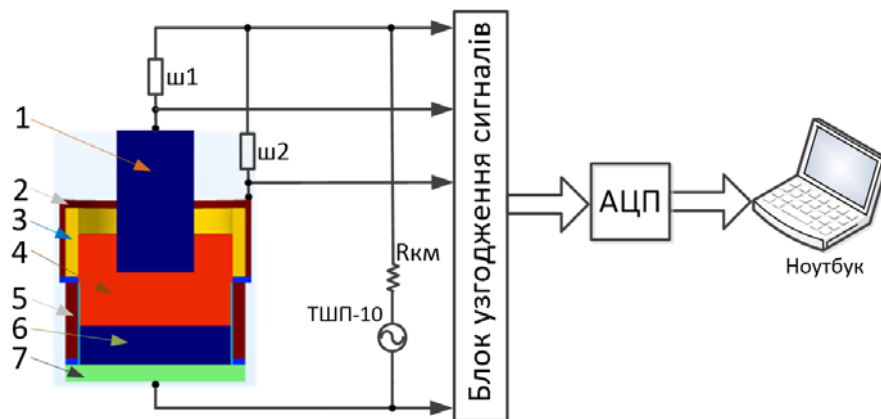


Рис. 2

потужності (P), споживаної стаціонарним СПК, від електропровідності ШВ (G) для чотирьох ступенів роботи джерела живлення ТШП-10 (рис. 1) та для реальних параметрів короткої мережі в проведеному експерименті, де: P – потужність споживання СПК, кВт; G – електропровідність СПК, См; 1 – перший ступінь; 2 – другий ступінь; 3 – третій ступінь; 4 – четвертий ступінь. Ці залежності наочно демонструють вплив характеристики короткої мережі в схемі живлення на споживану потужність і тепловий стан стаціонарного СПК.

Схему під'єднання стаціонарного СПК до джерела живлення та засобів обробки інформації наведено на рис. 2, де: 1 – ПЕ; 2 – КЕ; 3 – ГФ; 4 – ШВ; 5 – мідна втулка кристалізаційної секції; 6 – затравка; 7 – піддон; $R_{км}$ – опір короткої мережі; ТШП-10 – джерело живлення; ш1 – вимірювальний шунт ПЕ; ш2 – вимірювальний шунт КЕ; АЦП – аналого-цифровий перетворювач.

Напруга змінного струму від трансформатора ТШП-10 із синусоїдною формою, що має чотири ступеня зміни напруги, подавалася на клемі плавкового електрода струмовідвідної секції кристалізатора (СПСК) і піддона кристалізатора. Під

час експерименту проводилися вимірювання в часі напруги, прикладеної до клем плавкого електрода, мідної втулки СПСК і піддона, а також струм у ланцюгах плавкий електрод–шлакова ванна–металева ванна–виріб–піддон та СПСК–шлакова ванна–металева ванна–виріб–піддон. Здійснювалося цифрове

перетворення зазначених параметрів за допомогою вимірювальних шунтів ш1 і ш2, блока узгодження сигналів, АЦП. Розрахунок активних складових провідності та споживаної потужності обох вимірюваних електричних ланцюгів проводився на ноутбучі.

Задля досягнення поставленої мети було проведено аналіз можливостей непрямой оцінки параметрів, що визначають електротехнічні та теплофізичні процеси в шлаковій ванні з урахуванням отриманих в експерименті характеристик короткої мережі. Серед вивчених параметрів – температура на кінці ПЕ, температура в центрі поверхні МВ, глибина МВ, напруга на КЕ та ПЕ, а також величини струмів, електропровідностей та виділеної потужності в обох каналах СПК таких, як піддон–КЕ та піддон–ПЕ. Залю аналізу використовувалися методи мультифізичного моделювання.

Мультифізичне моделювання. Отримані експериментальні дані, зокрема наведені в [10], були використані для створення та валідації мультифізичної моделі стаціонарного СПК з ПЕ. Мультифізичне моделювання проводилося на графічній тривимірній моделі з моделюванням джоулевого нагріву [12]. Приклади схеми моделі наведено на рис. 3 (ліворуч – структура СПК; праворуч – розрахункова сітка СПК). Модель містить в собі верхню СПСК, що складається з мідної водоохолоджуваної втулки без вертикального розрізу та графітової футеровки, а також нижню формуючу секцію кристалізатора (ФСК), яка є другою мідною втулкою. Крім того, модель містить плавкий електрод, ШВ ванну, затравку (виріб), піддон, гарнісаж між формуючою секцією та ШВ/виробом, а також азбестову ізоляцію між секціями кристалізатора та піддоном.

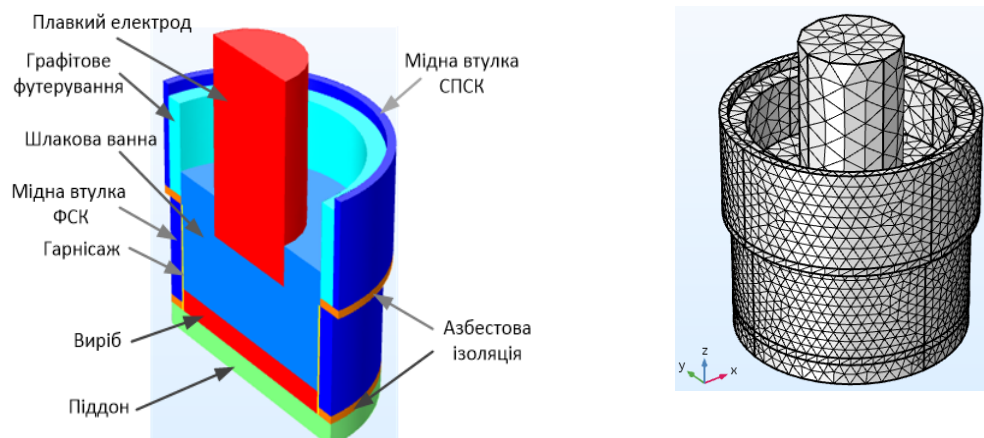


Рис. 3

Під час моделювання СПК автори не застосовували розрізну струмопідвідну секцію, що забезпечує обертання ШВ і МВ у горизонтальній площині, не розв'язували гідродинамічну задачу, а обмежилися електромагнітною і тепловою моделями. Обґрунтування такого рішення наведено в [12]. Обмеження в моделі аналогічні тим, що використовуються в [12].

У моделі використовуються наступні параметри конструкції: внутрішній діаметр кристалізатора $D_k=180$ мм; висота СПСК 90 мм; діаметр електрода $D_e=90$ мм; висота ФСК 88 мм; висота ГФ 80 мм; товщина ГФ 15 мм; висота затравки 15 мм; висота піддона 20 мм; товщина охолоджуваної водою поверхні мідної втулки СПСК 7 мм; товщина охолоджуваної водою поверхні мідної втулки ФСК 15 мм; висота азбестової ізоляційної прокладки 7 мм; відстань від затравки до нижнього краю графітової футеровки $h_{за}=87$ мм; початкова глибина ШВ 92 мм; заглиблення плавкого електрода в шлакову ванну (змінна) $h_{зе}=30\dots 80$ мм; висота виробу (наплавленого шару) $h_{вш}=0\dots 55$ мм.

Розрахункові параметри наступні: глибина металевої ванни в середині дзеркала – $h_{мв}$ (мм); температура торця електрода – $T_{те}$ (°C); загальна активна складова електропровідності СПК – G (См); потужність, споживана СПК – $P_{спк}$ (кВт). Розрахунок цих параметрів проводився для різних поєднань двох вхідних для моделі параметрів таких, як величина заглиблення електрода в шлакову ванну $h_{зе}$ і висота наплавленого шару $h_{вш}$. На рис. 4 наведено розподіл розрахункових параметрів $h_{мв}$ (а), $T_{те}$ (б), G (в) і $P_{спк}$ (г) для різних значень заглиблення електрода $h_{зе}$ і висоти наплавленого шару $h_{вш}$. Зазначені параметри задавалися з дискретністю 5 мм. Спочатку розраховувалося за заданими значеннями вхідних параметрів перше наближення значення G , за яким згодом розраховувалося перше наближення значення напруги $U_{спк}$ відповідно до функції $P(G)$ для другого ступеня джерела живлення ТШП-10. Потім, після введення в модель першого розрахованого значення G , проводилася наступна ітерація розрахунку значення $U_{спк}$. Після двох-трьох ітерацій отримували остаточні

значення, $h_{\text{МВ}}$, $T_{\text{те}}$, G і $P_{\text{СПК}}$, які заносилися в таблицю. Згодом розрахунок повторювався для наступної комбінації параметрів $h_{\text{зе}}$ і $h_{\text{нш}}$.

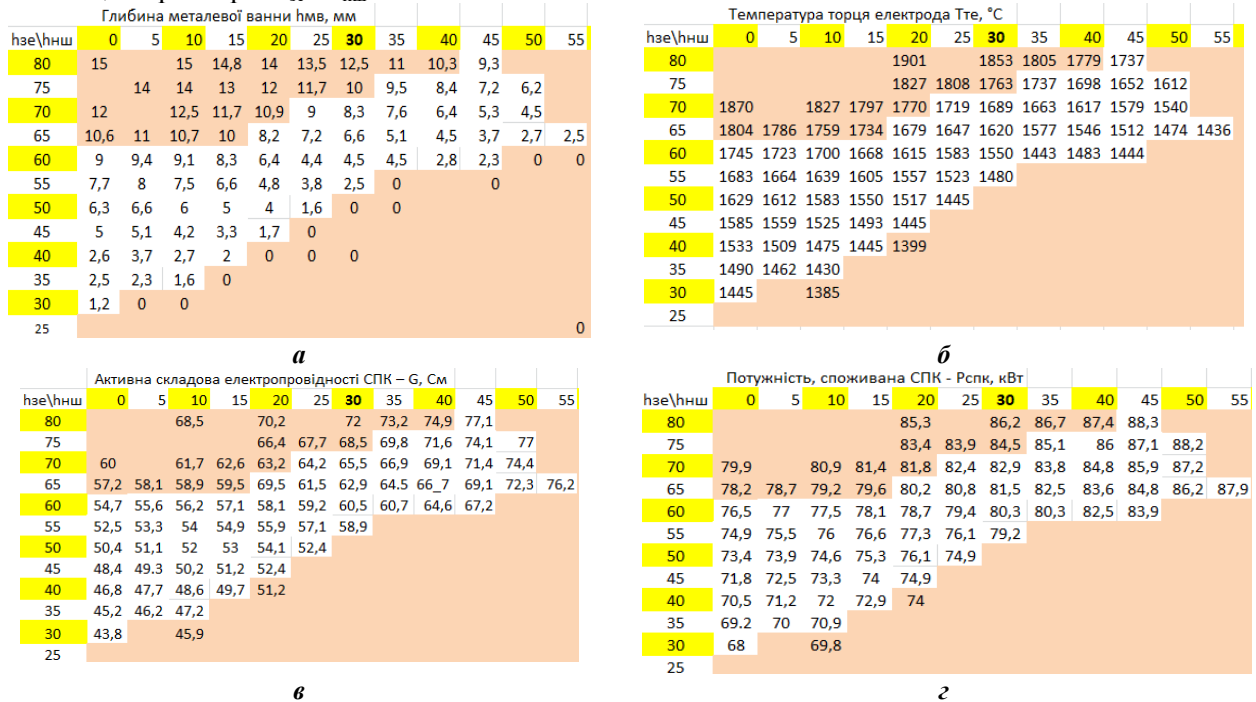


Рис. 4

У білій зоні знаходяться припустимі комбінації значень параметрів $h_{\text{зе}}$ і $h_{\text{нш}}$, за яких розрахункові значення глибини МВ та температури кінця ПЕ відповідають заданим діапазоном: $1,2 < h_{\text{МВ}} < 10$ мм і $1300 < T_{\text{те}} < 1800$ °C.

У розрахунках кінцеве значення $h_{\text{нш}} = 55$ мм відповідає відстані від затравки до нижнього краю ГФ (87 мм) за вирахуванням товщини азбестової ізоляції (7 мм) та прийнятої мінімальної відстані між металеві ванною та верхнім краєм формуючої секції ФСК (25 мм). Результати розрахунків було використано для побудови номограм, що відображають залежності кожного з розрахованих параметрів від вхідних параметрів $h_{\text{зе}}$ і $h_{\text{нш}}$. Залежності апроксимовані багаточленом:

$$z = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2,$$

де z – розрахунковий параметр ($h_{\text{МВ}}$, $T_{\text{те}}$, G або $P_{\text{СПК}}$); x – вхідний параметр $h_{\text{зе}}$; y – вхідний параметр $h_{\text{нш}}$; $a_1 \dots a_6$ – коефіцієнти масштабування.

На рис. 5, а наведено номограму електропровідності G , згідно з якою електропровідність практично прямо пропорційна заглибленню електрода в ШВ $h_{\text{зе}}$ у разі відсутності наплавленого металу. Цю залежність можна використовувати задля оцінки глибини занурення електрода за значенням G , оскільки цей параметр обчислюється автоматично. На рис. 5, б наведено номограму потужності споживання СПК $P_{\text{СПК}}$. За допомогою цих номограм можна оцінити значення G і $P_{\text{СПК}}$ за заданих значень $h_{\text{зе}}$ і $h_{\text{нш}}$, не вдаючись до складних обчислень.

На рис. 6 наведено схему зміни заглиблення ПЕ $h_{\text{зе}}$ і глибини МВ $h_{\text{МВ}}$ у залежності від збільшення висоти виробу (наплавленого шару) $h_{\text{нш}}$ за постійної заданої швидкості подачі електрода для двох варіантів: у точках А1 і Б1. Це є результатом обчислень основних параметрів змодельованого процесу наплавлення, який здійснювався в автономному режимі без участі оператора. Білим кольором позначено зону дозволених налаштувань наплавок для другого ступеня джерела живлення ТШП-10. У процесі були задіяні механізми саморегулювання: один – для контролю швидкості подачі ПЕ, а інший – для регулювання потужності, яка подається до стаціонарного СПК, що дало змогу адаптуватися до змін електропровідності у шлаковій ванні. Таким чином було візуалізовано як змінюються заглиблення ПЕ $h_{\text{зе}}$ і глибина МВ $h_{\text{МВ}}$ у залежності від збільшення висоти виробу (наплавленого шару) $h_{\text{нш}}$. При цьому швидкість подачі електрода залишалася постійною та заданою заздалегідь.

Процес налаштування починається з визначення початкової точки А1, де необхідно встановити температуру кінця ПЕ $T_{\text{те}} = 1452$ °C задля забезпечення оптимальної швидкості його подачі. Ця температура вираховується моделлю та відповідає вимірюваному значенню

електропровідності $G = 43,7$ См. Задля досягнення такої електропровідності швидкість подачі електрода налаштовується вручну, з поступовим збільшенням до заданого значення G . Після досягнення цього значення швидкість подачі електрода фіксується та не змінюється аж до точки А2, де висота наплавленого шару досягає $h_{\text{нш}} = 55$ мм. На графіку чітко видно, що механізм саморегулювання ефективно підтримує температуру кінця електрода протягом всього процесу.

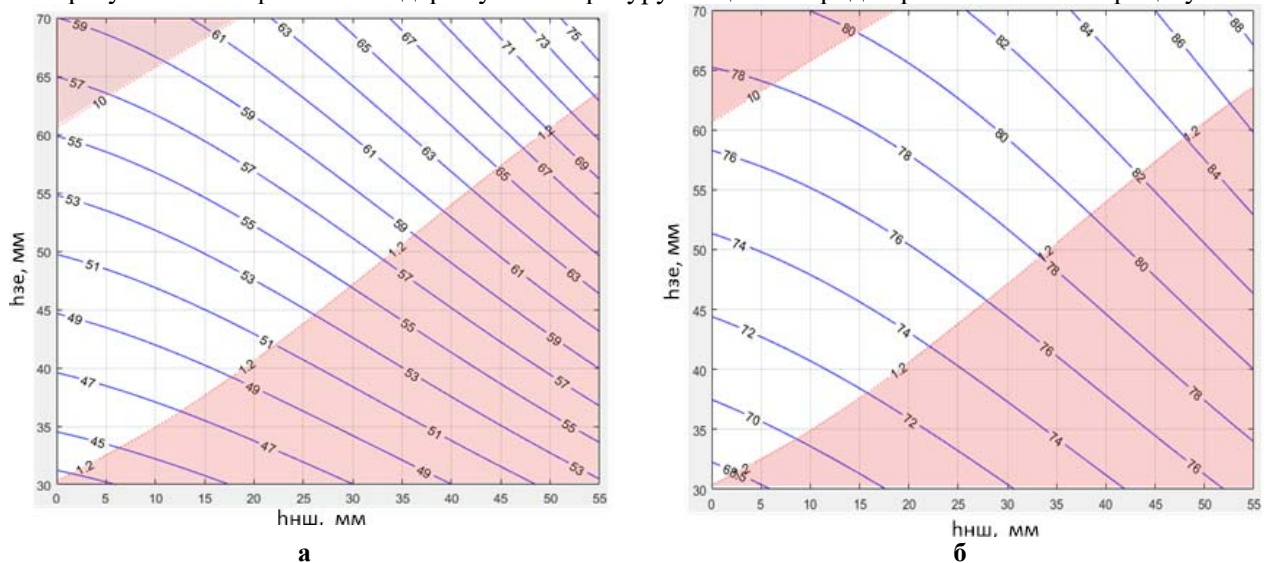


Рис. 5

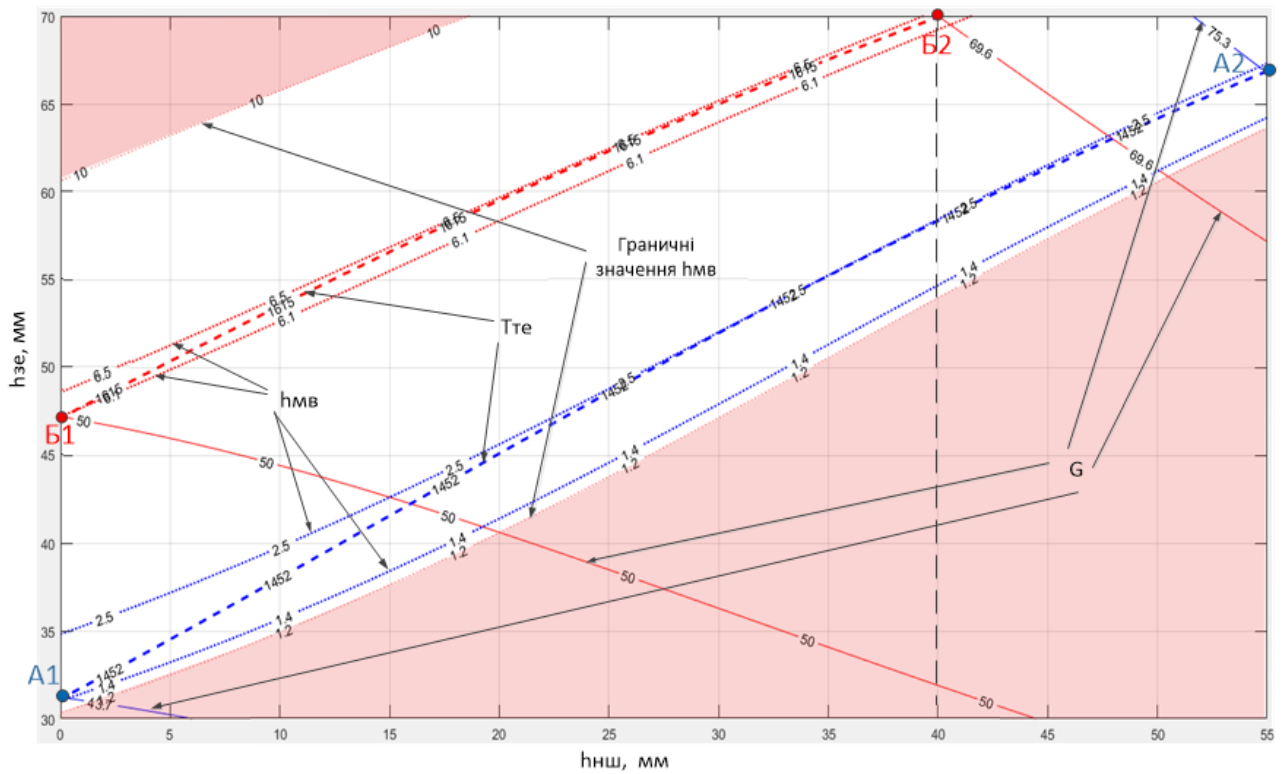


Рис. 6

Вирахуване початкове значення електропровідності $G=43,7$ См було обрано як найприйнятніше з точки зору мінімізації глибини МВ і досягнення максимальної висоти виробу, що наплавляється. У міру зростання наплавленого шару $h_{\text{мв}}$ змінюється від 1,4 мм, підвищується до 2,5 мм ($h_{\text{нш}}=30$ мм), а потім зменшується до 2,4 мм. Важливо завершити процес наплавлення у разі досягнення електропровідності $G=75,3$ См у точці А2, щоб уникнути порушення стабільності процесу.

Процес, який починається з точки В1 і доходить до точки В2, характеризується тим, що відбувається за вищої швидкості подачі електрода з температурою його кінця, яка дорівнює 1615 °С, і з більшою продуктивністю. У точці В1 електропровідність $G = 50$ См. У міру зростання наплавленого шару глибина МВ $h_{\text{мв}}$ змінюється від 6,1 мм, підвищується до 6,5 мм ($h_{\text{нш}} = 20$ мм), потім

зменшується до 6,6 мм ($h_{\text{нш}} = 40$ мм). У даному випадку процес необхідно завершити у разі досягнення електропровідності $G = 69,6$ См у точці Б2, щоб уникнути порушення стабільності процесу. Висота наплавленого шару не повинна перевищувати 40 мм.

Запропонований метод наплавлення передбачає виконання наступних основних операцій.

1. Підключення СПК і джерела живлення ТШП-10 згідно зі схемою (рис. 2).
2. Вимірювання параметрів. Визначення активного опору короткого ланцюга ($R_{\text{км}}$), а також теплоелектрофізичні властивості матеріалу флюсу та ПЕ.
3. Налаштування затравки. Обчислення за допомогою моделі та встановлення положення затравки ($h_{\text{за}}$), враховуючи діаметр електрода, ступінь напруги джерела живлення, об'єм ШВ, вимоги до висоти наплавленого шару та зміну висоти ШВ під час заглиблення електрода.
4. Розрахунок електропровідності. Використання запропонованої моделі для розрахунку початкового та кінцевого значень електропровідності (G).
5. Встановлення швидкості подачі електрода відповідно до початкового значення (G) і дотримання її незмінною до завершення процесу наплавлення.
6. Завершення процесу наплавлення, коли буде досягнуто кінцеве значення електропровідності (G).

Висновки.

Мультифізичне моделювання, яке дає змогу моделювати процеси джоулевого нагріву для СПК з ПЕ, є важливим інструментом у розробці нових технологій наплавлення.

Запропонований метод механізованого наплавлення із заданими технологічними характеристиками виробу та використанням механізмів саморегулювання за відсутності системи автоматичного управління швидкістю подачі ПЕ та напруги може бути ефективним рішенням. Цей метод може забезпечити стабільність процесу наплавлення, навіть коли змінюється склад матеріалів або умови експлуатації.

Щоб визначити, чи можна реалізувати цей метод на практиці, необхідно провести ряд аналізів, включаючи експериментальну перевірку (проведення тестів на реальному обладнанні для перевірки робочих характеристик і стабільності процесу), технічний аналіз (перевірку можливості інтеграції нового методу у вже існуючі виробничі лінії), аналіз безпеки (чи не створює нова технологія додаткових ризиків для операторів або обладнання).

Роботу виконано за темою «Дослідити фізико-металургійні особливості утворення зварного з'єднання високолегованих інструментальних сталей і сплавів з вуглецевими конструкційними сталями і розробити методи підвищення ефективності технологій їх наплавлення» відомчого цільового замовлення НАН України та фінансовано з коштів державного бюджету (КПКВК 6541030).

1. ДСТУ-Н Б А.3.1-11:2008 Управління, організація і технологія. Настанова з візуального і вимірювального контролю зварних з'єднань та наплавок металевих конструкцій. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=24844 (дата звернення 05.06.2024).

2. Медовар Б.И., Цыкуленко Л.К., Шевцов В.Л. Металлургия электрошлакового процесса. К.: Наукова думка, 1986. 248 с.

3. Казачков Е.А., Чепурной А.Д., Медовар Л.Б., Саенко В.Я. Современная электрошлаковая технология в специальной электрометаллургии. *Вісник Приазовського ДТУ: збірник наукових праць*. 2003. Вип. 13. С. 31–36.

4. Томиленко С.В., Кусков Ю.М. Регулирование и стабилизация глубины проплавления основного металла при электрошлаковой наплавке в токоподводящем кристаллизаторе. *Сварочное производство*. 2000. № 9. С. 32–35.

5. Кусков Ю.М., Грищенко Т.И. Формирование металлической ванны при электрошлаковом процессе в токоподводящем кристаллизаторе. *Автоматическая сварка*. 2019. № 4. С. 42–45. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2019.04.07>.

6. Данцис Я.Б., Капевич Л.С., Жилов Г.М. Короткие сети и электрические параметры дуговых электродов: Справочник. М.: Металлургия, 1987. 320 с.

7. Ярымбаш Д.С. Применение адаптированных схемных моделей для расчета токов короткой сети мощных электротехнических комплексов. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2012. № 2(96). С. 59–65.

8. Ярымбаш Д.С., Килимник И.М., Ярымбаш С.Т. Динамическая адаптация схемных моделей короткой сети. *Електротехніка та електроенергетика*. 2015. № 2. С. 65–70. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2015-2-9>.

9. Дудко Д.А., Рублевский И.Н. К вопросу о природе вентильного эффекта при электрошлаковом процессе. *Автоматическая сварка*. 1962. № 3. С. 40–48.

10. Кусков Ю.М., Соловьев В.Г., Осечков П.П., Осин В.В. Электрошлаковая наплавка электродом большого сечения на постоянном токе в токоподводящем кристаллизаторе. *Автоматическая сварка*. 2018. № 3. С. 38–42. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2018.03.07>.

11. Богнер Р., Константи́нидис А. Введение в цифровую фильтрацию. М.: Мир, 1976. 213 с.

12. Соловйов В.Г., Кусков Ю.М., Романова І.Ю. Оптимізація форми металеві ванни при електрошлаковому наплавленні в стаціонарному струмопідвідному кристалізаторі для отримання біметалевих виробів. *Автоматичне зварювання*. 2024. № 3. С. 49–58. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2024.03.07>.

USE OF SELF-REGULATION MECHANISMS IN ELECTROSLAG MELTING IN A STATIONARY CURRENT-SUPPLYING MOULD

V.G. Solovyov, I.Yu. Romanova

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

E-mail: hsova@gmail.com; romanova@paton.kiev.ua.

In a situation where there is no automatic control system for electroslag melting in a stationary current-supplying mould using a consumable electrode, a method of mechanized melting with specified technological characteristics of the product has been proposed, utilizing self-regulation mechanisms. The method is based on mechanized melting, which involves the use of specialized equipment to automation control of the melting process, while a number of preparatory technological operations are performed manually. This method combines the advantages of automatic control with the flexibility of manual melting, which helps to increase the productivity and quality of the deposited layer. Partial automation involves mandatory automatic control of key technological parameters during melting, such as current, power, electrical conductivity, and voltage supplied to the stationary current-supplying mould. References 12, figures 6.

Key words: stationary current-supplying mould, self-regulation mechanisms, parameters of metal bath, multiphysics modeling, electroslag melting.

1. State Standard of Ukraine N B A.3.1-11:2008 Management, organization and technology. Manual on visual and measurement control of welded joints and surfacing of metal structures. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=24844 (accessed at 05/06/2024). (Ukr)

2. Medovar B.Y., Tsykulyenko L.K., Shevtsov V.L. Metallurgy of the electroslag process. Kiev: Naukova dumka, 1986. 248 p. (Rus)

3. Kazachkov E.A., Chepurnoy A.D., Medovar L.B., Saenko V.Ya. Modern electroslag technology in special electrometallurgy. *Visnyk Pryazovskoho derzhavnogo tekhnichnogo univertsitetu: zbirka naukovykh prats*. 2003. Vyp. 13. Pp. 31–36. (Rus)

4. Tomilenko S.V., Kuskov Yu.M. Regulation and stabilization of the depth of penetration of the base metal during electroslag surfacing in a current-supplying mould. *Svarochnoe Proizvodstvo*. 2000. No 9. Pp. 32–35. (Rus)

5. Kuskov Yu.M., Grishchenko T.I. Formation of metal pool in current-supplying mould at electroslag process. *Avtomaticheskaya svarka*. 2019. No 4. Pp. 42–45. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2019.04.07>.

6. Dantsis Ya.B., Katsevich L.S., Zhilov G.M. Short networks and electrical parameters of electric arc furnaces: Directory. Moskva: Metallurgiya, 1987. 320 p. (Rus)

7. Yarymbash D.S. Application of adapted circuit models for calculating currents of a short network of powerful electrical complexes. *Energoberezenie. Energetika. Energoaudit*. 2012. No 2(96). Pp. 59–65. (Rus)

8. Yarymbash D.S., Kilimnik I.M., Yarymbash S.T. Dynamic adaptation of short network circuit models. *Elektrotehnika ta elektroenerhetyka*. 2015. No 2. Pp. 65–70. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2015-2-9>. (Rus)

9. Dudko D.A., Rublevsky I.N. On the question of the nature of the valve effect in the electroslag process. *Avtomaticheskaya Svarka*. 1962. No 3. Pp. 40–48. (Rus)

10. Kuskov Yu.M., Soloviov V.G., Osechkov P.P., Osin V.V. Electroslag surfacing with large-section electrode at direct current in current-supplying mould. *Avtomaticheskaya Svarka*. 2018. No 3. Pp. 38–42. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwg2018.03.07>. (Rus)

11. Bogner R., Konstantinidis A. Introduction to digital filtering. Moskva, Mir, 1976. 213 p. (Rus)

12. Solovyov V.G., Kuskov Yu.M., Romanova I.Yu. Optimization of the metal pool shape during electroslag melting in a stationary current-supplying mould for manufacturing of bimetallic products. *Avtomatichne Zvarivannia*. 2024. No 3. Pp. 49–58. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2024.03.07>. (Ukr)

Надійшла 13.06.2024

Остаточний варіант 15.07.2024