

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3\(41\)-390-400](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-390-400)

УДК 669.117.56.002.6

Володимир Георгійович Соловйов¹, Ірина Юрївна Романова²¹кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу імпульсних процесів і технологій дугового зварювання
Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (Київ, Україна)E-mail: hsova@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1454-7520>. Scopus Autor ID: 58740647500²кандидат технічних наук, заступник завідувача відділу імпульсних процесів і технологій дугового зварювання
Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (Київ, Україна)E-mail: romanova@paton.kiev.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7154-1830>. Scopus Autor ID: 57222474743

ПРИЧИНИ ДЕСТАБІЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ У СТАЦІОНАРНОМУ СТРУМОПІДВІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ

Розглянуто процес електрошлакового наплавлення у струмопідвідному кристалізаторі стаціонарного типу зі схемою під'єднання до джерела живлення, за якої клема живлення струмопідвідної секції кристалізатора з'єднана з клемою піддона. Таке під'єднання кристалізатора до джерела живлення забезпечує високу продуктивність процесу наплавлення. Однак навіть за підтримки постійної швидкості подачі електрода у шлакову ванну спостерігаються значні коливання струму електрода. Амплітуда цих коливань досягає майже 50 % максимального значення струму з періодичністю 10...25 с. Це свідчить про суттєві коливання температури шлакової ванни у процесі наплавлення. Такі коливання можуть призвести до небажаних змін фізико-механічних і структурних властивостей наплавленого металу. Проаналізовано причини виникнення подібних коливань. Наводяться способи їх зменшення та підвищення стабільності процесу наплавлення.

Ключові слова: стаціонарний струмопідвідний кристалізатор; механізм саморегулювання; мультифізичне моделювання; електрошлакове наплавлення; стабілізація електрошлакового процесу.

Рис.: 7. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. Електрошлакове наплавлення (ЕШН) залишається актуальною технологією для відновлення та зміцнення металевих деталей, особливо з використанням струмопідвідних кристалізаторів (СПК). Його значення обумовлене потребами промисловості у підвищенні експлуатаційних характеристик обладнання та зниженні витрат на ремонт. Попри обмеження (висока енергоємність, складність підготовки), ЕШН у СПК залишається ключовим методом для машинобудування та металургії через унікальну комбінацію продуктивності, якості та вартісної ефективності. Використання СПК дозволяє керувати структурою металу шляхом регулювання електромагнітних процесів у шлаковій ванні, розширює технологічні можливості, наприклад, наплавлення шару завтовшки до десятків сантиметрів за один прохід, виробництва біметалевих труб з корозійно-стійким покриттям, наплавлення прокатних валків та штамсів тощо.

Постановка проблеми. Процес ЕШН у стаціонарному СПК вимагає стабільності для забезпечення високої якості наплавленого металу. Стабільність такого процесу визначається рівновагою ключових параметрів: температурою шлакової ванни, швидкістю подачі електрода та силою струму. Однак на практиці величини цих параметрів часто коливаються через теплову інерцію системи або нестабільність джерела живлення. Такі відхилення призводять до неоднорідності структури металу, зниження твердості та утворення мікротріщин. Саме тому виявлення причин дестабілізації та розробка алгоритмів їх компенсації (наприклад, за допомогою адаптивних систем управління) є критично важливими для масового застосування технології у машинобудуванні.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У [1] розглянуто процес стабілізації температури шлакової ванни (ШВ) за незмінної форми міжелектродного простору, а також питання стабілізації у випадках швидкої та повільної зміни цього простору. Аналізу стабільності роботи кристалізатора присвячено низку робіт, у яких використовуються математичні моделі [2-8]. Наприклад, у [2] наведено тривимірну модель для дослідження профілю та глибини занурення витратного електрода в нестабільних умовах. Електрод змінював форму від плоскостонного до конусоподібного. Глибина його занурення спочатку

дещо збільшувалася, а потім постійно зменшувалася через нестійке співвідношення між швидкостями плавлення та опускання. У [3] шляхом розв'язання математичної моделі отримано розподіл температурного поля та встановлено зв'язок між часом локального затвердіння та міждендритною відстанню в процесі затвердіння зливка. Цей зв'язок розглядається як критерій оцінки якості кристалізації. Модель пропонується використовувати для прогнозування стабільності переплаву та якості зливків. У [4] проведено моделювання безперервного зростання зливка при електрошлаковому переплаві (ЕШП). Зокрема, для верифікації моделі досліджувалися глибина та форма ванни розплаву. Таким чином, запропоновано спосіб аналізу впливу робочих параметрів на перебіг процесу. У [5] показано, що загальний джоулевий нагрів шлаку збільшується зі збільшенням його кількості, тоді як середня густина цього нагріву знижується. Менша глибина занурення електрода є кращим вибором для процесу ЕШП, оскільки забезпечує більшу стабільність процесу. У [6] результати моделювання демонструють, що електричний струм тече до бічної стінки кристалізатора, особливо в шарі шлаку. Розподіл джоулевого тепла навколо краплі металу динамічно змінюється у процесі її падіння. Найгарячіша область формується під зовнішнім радіусом кінчика електрода, поруч із границею розділу шлак/метал, а не на самому кінчику електрода. У [7] було оптимізовано швидкість плавлення та показано, що 98 кг/год є відповідною швидкістю плавлення для процесу безперервного спрямованого затвердіння ЕШП з формою діаметром 160 мм. У [8] розглянуто різні техніки та технології наплавлення. Електричний режим наплавлення обирався з урахуванням отримання стабільного електрошлакового процесу. Автори [9] досліджували вплив струмопідводу в СПК на електромагнітні процеси у кристалізаторі для електрошлакового наплавлення металу шляхом математичного моделювання обертання шлакової ванни. Показано, що переміщення по азимуту верхньої клеми кристалізатора, яка приєднана до струмопідвідної секції, відносно її вертикального розрізу суттєво впливає на електромагнітні сили у шлаковій ванні, але не змінює потужність тепловиділення в системі.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. У згаданих вище роботах, окрім [8; 9], проблеми стабілізації процесу розглядалися переважно для кристалізаторів канонічного типу. Однак для СПК найважливішим дестабілізаційним фактором є зміна міжелектродних відстаней, що не враховувалось в більшості досліджень. Ця зміна виникає при збільшенні висоти наплавленого шару металу та наближенні рівня металевої ванни до графітового футерування струмопідвідної секції кристалізатора (СПСК). На відміну від попередніх робіт, наше дослідження зосереджено на аналізі саме цього аспекту, що дозволяє точніше визначити причини нестабільності та розробити ефективні методи їх усунення для стаціонарних струмопідвідних кристалізаторів.

Метою дослідження є визначення причин нестабільності плавлення електрода в СПК та розробка шляхів їх усунення.

Ця робота є продовженням раніше розпочатих досліджень торцевого ЕШН електродом великого перерізу в струмопідвідному кристалізаторі. У [10] розглядалися та порівнювалися різні технічні рішення з погляду простоти їх реалізації та забезпечення стабільності якості наплавлення. Змінний струм для наплавлення обрано як найпоширеніший при електрошлакових технологіях [11; 12].

Виклад основного матеріалу. Для експериментального дослідження процесу ЕШН було розроблено схему підключення джерела живлення до стаціонарного струмопровідного кристалізатора (рис. 1). Схема під'єднання до джерела живлення типу «Е» (із загальним електродом) передбачає з'єднання клеми живлення струмопідвідної секції кристалізатора з клемою піддона. Сигнали у вигляді напруги, пропорційної струмам у колах джерел, знімалися

за допомогою вимірювальних струмових шунтів R1 та R2. Напруга на електроді U_e та сигнали струмів СПСК ($I_{\text{спск}}$) і піддону (I_p) вводилися через «Блок узгодження сигналів», що виконує роль захисту від перевантажень і фільтра високочастотних завад, в АЦП з частотою дискретизації 1 кГц і потім передавалися для обробки в комп'ютер.

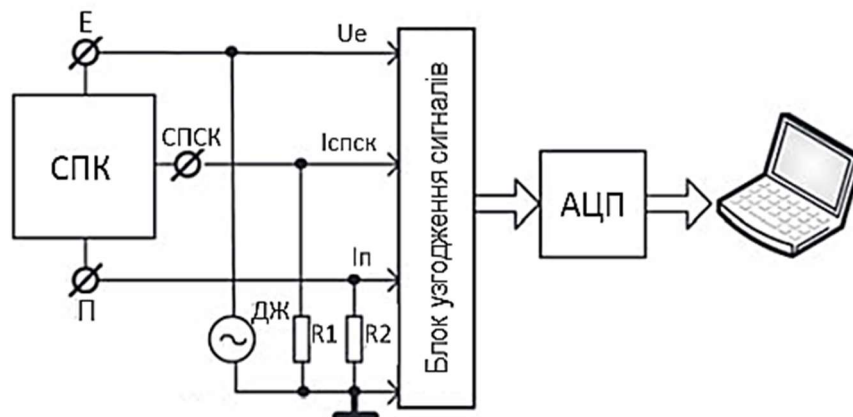


Рис. 1. Схема підключення джерела живлення до стаціонарного струмопровідного кристалізатора

За допомогою програмного забезпечення PowerGraph розраховувалися ефективні (діючі) значення вхідних сигналів змінного струму, які зберігалися в пам'яті комп'ютера. Струм джерела живлення ($I_{\text{дж}}$) обчислювався в комп'ютері шляхом підсумовування струмів СПСК і піддону.

На рис. 2 наведено фрагмент осцилографічного запису зміни струмів та напруги кристалізатора, отриманих у результаті експерименту. Виконувалось наплавлення заготовки з «рідким» стартом із використанням джерела змінного струму ТШП-10 на другому ступені регулювання напруги.

Діаметр СПК становить 180 мм, діаметр електрода – 90 мм. Тривалість наплавлення – 550 с при швидкості подачі електрода 22 мм/хв, що забезпечувало продуктивність 132 кг/год. Середня провідність кристалізатора в першій половині процесу наплавлення становила 33 См, а в другій – 31 См. Середня провідність каналу «електрод–СПСК» у першій половині процесу дорівнювала 27 См, а в другій половині – 24 См. Середня провідність каналу «електрод–піддон» становила 5 См.

Експеримент складався з двох частин. Перша частина тривала 6,17 хв, при цьому швидкість подачі електрода становила 26 мм/хв, а продуктивність – 155 кг/год. Друга частина тривала 3 хв, швидкість подачі електрода в цьому випадку становила 14 мм/хв, а продуктивність наплавлення – 84 кг/год.

На осцилограмах (рис. 2) чітко видно значні періодичні коливання струму джерела живлення, а також напруги на електроді. Процес наплавлення був нестабільним практично з самого початку. Він супроводжувався коливаннями загального струму з частотою 0,01...0,04 Гц. При цьому режим цього експерименту характеризувався набагато меншою провідністю каналу «електрод–піддон», ніж режим експерименту з наплавлення за схемою типу «П» (із загальним піддоном), за якого клема живлення СПСК з'єднана з клемою електрода. У другій половині процесу у зв'язку зі зменшенням швидкості подачі електрода у шлакову ванну до 14 мм/хв, режим став стабільнішим. Коливання струмів СПСК і піддону стали частішими, а їхня амплітуда відносно зменшилася. Аналіз частоти та амплітуди цих коливань дозволив встановити, що вони корелюють зі змінами провід-

ності в міжелектродних проміжках. Зокрема, збільшення амплітуди коливань струму свідчить про нерівномірне плавлення електрода та зміну площі контакту між електродом і шлаковою ванною, що призводить до нестабільності процесу. Тим не менш, за результатами експериментів, режим наплавлення в СПК стаціонарного типу з під'єднанням джерела живлення за схемою «Е» було визнано найпродуктивнішим.

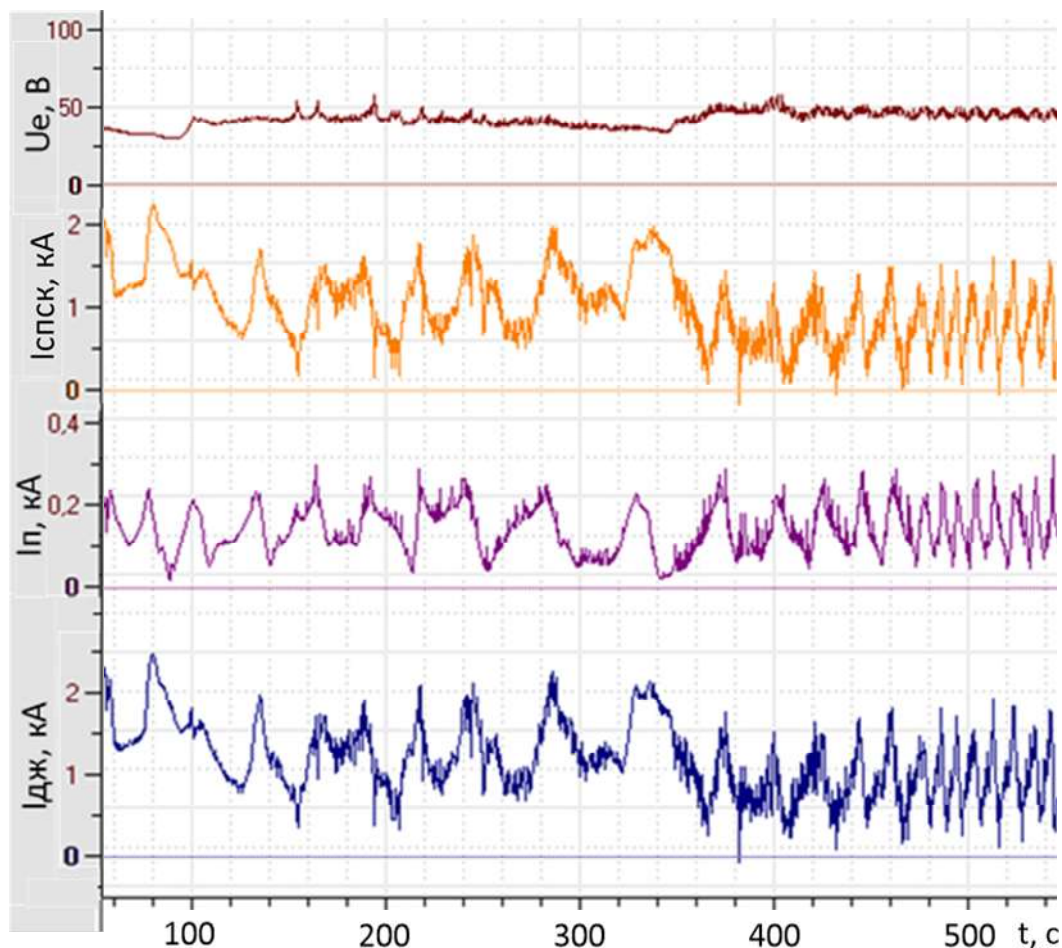


Рис. 2. Осцилограми зміни струмів та напруги кристалізатора, отриманих у результаті експерименту:

U_e – напруга на електроді, В; $I_{спск}$ – струм, що проходить через СПСК, кА; I_p – струм, що проходить через піддон, кА; $I_{дж}$ – струм джерела живлення, кА

Математичне моделювання. На основі експериментальних даних було створено мультифізичну модель СПК для аналізу взаємодії електромагнітних і теплових процесів у шлаковій ванні. Модель враховує конструктивні особливості кристалізатора, включаючи мідну водоохолоджувану втулку, графітове футерування та плавкий електрод. Основною метою моделювання було виявлення зон концентрації теплової енергії та їхнього впливу на стабільність процесу наплавлення.

Мультифізичне моделювання проводилося на графічній тривимірній моделі з урахуванням джоулевого нагріву [13]. Приклади схеми моделі наведено на рис. 3. Модель містить в собі верхню СПСК, що складається з мідної водоохолоджуваної втулки без вертикального розрізу та графітового футерування (ГФ), а також нижню формуючу секцію кристалізатора (ФСК), яка є другою мідною втулкою. Крім того, модель містить плавкий електрод, шлакову ванну, затравку (виріб), піддон, гарнісаж між формуючою секцією та ШВ і виробом, а також азбестову ізоляцію між секціями кристалізатора та піддоном.

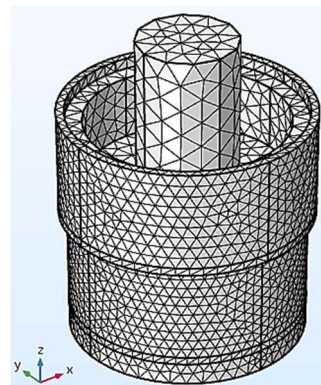
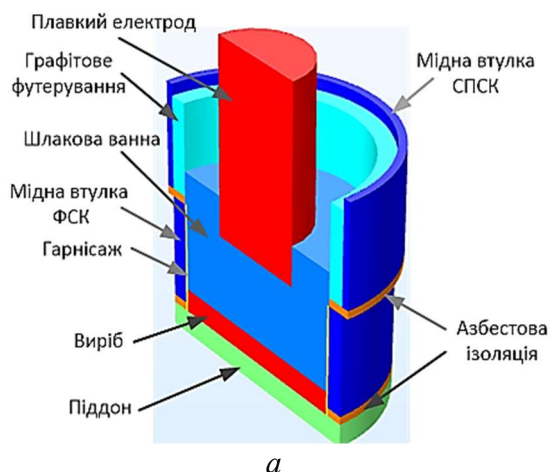


Рис. 3. Мультифізична модель стаціонарного СПК з плавким електродом:
а – структура СПК; б – розрахункова сітка СПК

У [8] було проведено моделювання впливу струмопідводу на електромагнітні процеси у кристалізаторі. Було показано, що конструкція секційного кристалізатора забезпечує обертання шлаку у ШВ, але суттєво не впливає на її загальний тепловий стан.

У процесі наших досліджень електрошлакового наплавлення металу було проведено експеримент, під час якого спостерігалися значні коливання струму джерела живлення та споживаної потужності шлакової ванни (ШВ). Ці коливання досягали майже 50 % від максимального значення (рис. 2). Подальший аналіз виявив, що такі значні коливання струму в кристалізаторі пов'язані з коливаннями електропровідності обох міжелектродних проміжків (електрод-СПСК і електрод-піддон), які, в свою чергу, залежать від коливань величини заглиблення електрода. Важливо зазначити, що примусова циркуляція шлаку у ШВ, яку забезпечує струмопідвід до СПСК, відіграє важливу роль у теплообміні та розподілі домішок. Однак, як було показано в [8], така циркуляція шлаку не має суттєвого впливу на загальний тепловий стан ванни та не може пояснити значні коливання споживаної потужності в такому випадку. Тому при подальшому моделюванні СПК ми вирішили в моделі не застосовувати розрізну струмопідвідну секцію, що забезпечує обертання ШВ у горизонтальній площині, та не розв'язувати гідродинамічну задачу. Натомість ми зосередилися на електромагнітній та тепловій моделях. Такий підхід дозволив нам детальніше дослідити вплив конструктивних параметрів СПК і режимів наплавлення на розподіл температури в шлаковій ванні.

Детальний опис принципів побудови моделі, а також параметри електро- і теплофізичних властивостей матеріалів аналогічні тим, що використані в [13]. У моделі прийняті 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 гарнісажу на поверхні мідної втулки ФСК 2 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 неплавкого електрода у шлакову ванну (змінна) $h_{зне} = 5 \dots 130$ мм; висота виробу (наплавленого шару) $h_{нш} = 0 \dots 50$ мм.

На зазначеній мультифізичній моделі було проведено математичний експеримент з дослідження впливу утворених у СПК двох зон концентрації теплової енергії (які виникли як результат під'єднання СПК до джерела живлення за схемою типу «Е») на процес плавлення електрода. Зони концентрації теплової енергії визначаються наявністю двох основних каналів проходження струму від електрода до СПСК і від електрода до піддона.

Досліджувалися взаємозалежності ключових параметрів процесу. При цьому споживана потужність, величини струмів і напруги, електрична провідність двох каналів проходження струму джерела (канал «електрод–СПСК» і канал «електрод–піддон»), розподіл тепла у ШВ, її рівень відносно нижнього краю ГФ є залежними змінними, а розташування торця електрода, що плавиться, відносно поверхні наплавлення та висота наплавленого зливка є незалежними змінними. Тому в моделі використовувався неплавкий електрод.

Необхідно зазначити, що модель дозволяє визначати усталені значення досліджуваних параметрів, але не обчислює динаміку їх зміни. Під час аналізу динамічних змін процесу наплавлення використовувалася окрема модель, побудована в пакеті MatLab.

Результати моделювання показали, що зміна глибини занурення торця електрода суттєво впливає на розподіл температури в шлаковій ванні. На рис. 4 наведено розподіл температури у шлаковій ванні для трьох значень заглиблення електрода $h_{\text{зне}} = 60$ (а), 80 (б) і 110 (в) мм при висоті наплавленого зливка $h_{\text{нш}} = 0$ мм.

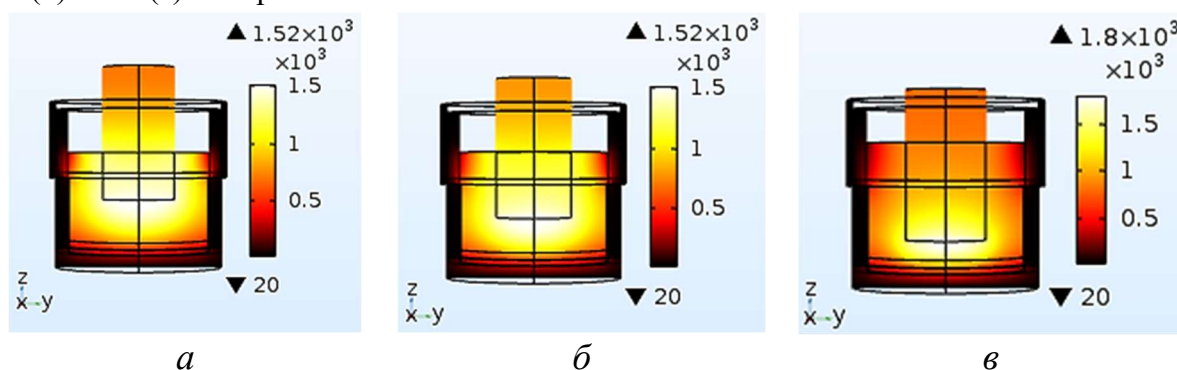


Рис. 4. Розподіл температури у шлаковій ванні для величин заглиблення електрода 60 (а), 80 (б) і 110 (в) мм

Демонструється, як змінюється теплове поле залежно від глибини занурення електрода у шлакову ванну. Розподіл теплового поля набуває форми, близької спочатку до конічної, потім до еліпсоїдної із максимальною температурою поблизу торця електрода. Очевидно, що чим більше заглиблення електрода, тим глибше у шлакову ванну буде зміщуватися область максимальних температур.

На рис. 5 наведено розрахунок потужності, що вводиться у шлакову ванну, залежно від величини заглиблення електрода для обох її складових (для каналів «електрод–СПСК» і «електрод–піддон») при трьох значеннях висоти наплавленого зливка $h_{\text{нш}} = 0$ (а), 25 (б) і 50 (в) мм.

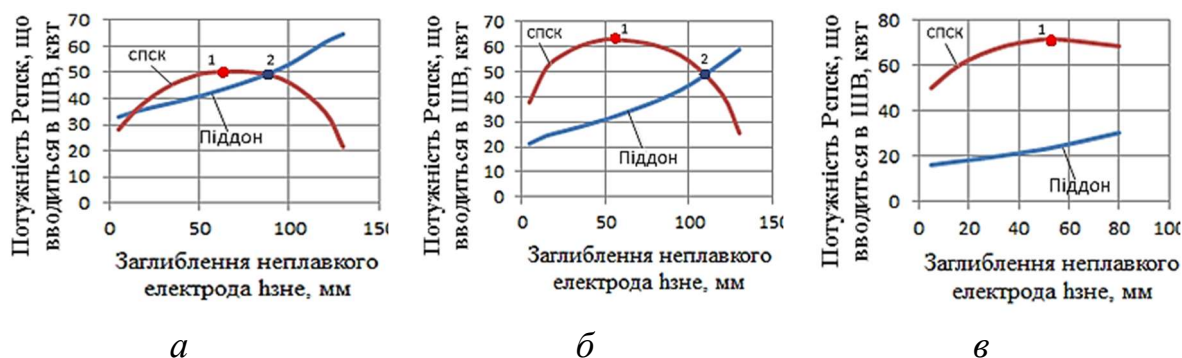


Рис. 5. Залежності зміни потужності, що вводиться у шлакову ванну, від величини заглиблення електрода при висоті наплавленого зливка 0 (а), 25 (б) і 50 (в) мм

На кривій потужності, що виділяється на СПСК, спостерігаємо наявність двох критичних точок 1 і 2. Точка 1 відповідає максимальному значенню потужності, що виділяється на

СПСК, $dP_{\text{спск}}/dh_{\text{зне}} = 0$. Точка 2 відповідає точці перетину кривих потужностей, що виділяються на СПСК і піддоні. Потужність, що виділяється у ШВ при протіканні струму між електродом і СПСК, при швидкості подачі електрода, що відповідає положенню його торця в діапазоні від 0 мм до положення в критичній точці 2, завжди більша за потужність, що виділяється струмом, який протікає між електродом і піддоном. Плавлення електрода, положення якого знаходиться в проміжку до критичної точки 2, відбувається в основному по бічній поверхні електрода. За критичною точкою 2 зростає роль тепла, що утворюється за рахунок виділення потужності в міжелектродному проміжку «електрод–піддон». Зі збільшенням висоти наплавленого зливка точка 1 зміщується ліворуч у бік зменшення величини заглиблення неплавкого електрода, а точка 2 зміщується праворуч у бік збільшення значення заглиблення неплавкого електрода. При $h_{\text{нпш}} = 50$ мм точка 2 виходить за межі конструкційних можливостей СПК, оскільки можливий перелив шлаку. У межах зміни висоти наплавленого шару 30...50 мм необхідно стежити за швидкістю подачі електрода та поступово її зменшувати. При цьому процес входить у коливальний режим через його зміщення ліворуч від критичної точки 2. Коли торець електрода при постійній швидкості подачі опускається у ШВ і досягає рівності швидкості занурення та швидкості плавлення, положення його торця відносно поверхні наплавлення має стабілізуватися. Проте цього не відбувається через відставання в часі зростання температури від зростання потужності, що виділяється на СПСК. Це явище пов'язане з тепловою сталою часу ШВ $\tau_{\text{ТСЧ}}$. Через деякий проміжок часу температура ШВ поблизу торця електрода підвищується, швидкість плавлення збільшується, відстань торця відносно поверхні наплавлення збільшується. Виникає зворотний рух торця електрода до зони концентрації теплової енергії, який є протилежним до напрямку руху самого електрода.

За допомогою мультифізичної моделі проведено аналіз динаміки зміни температури ШВ при зміні положення торця електрода, при цьому визначено теплову сталу часу ШВ $\tau_{\text{ТСЧ}}$. Було отримано відгук температури торця електрода на стрибкоподібну зміну заглиблення неплавкого електрода (рис. 6).

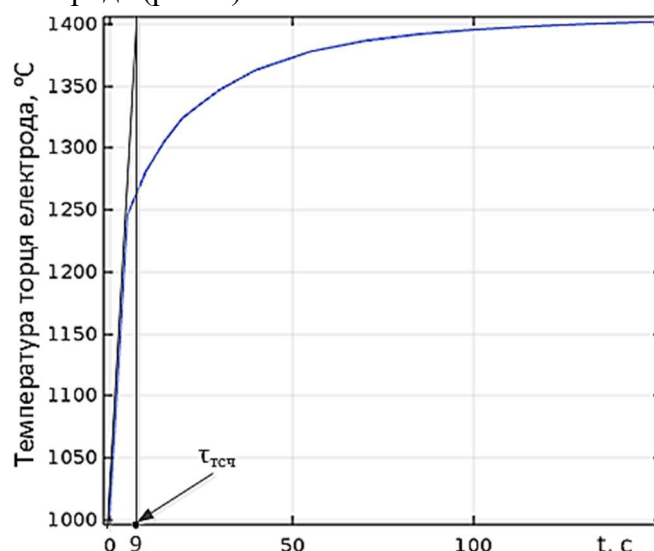


Рис. 6. Відгук температури торця електрода на стрибкоподібну зміну заглиблення неплавкого електрода

Відгук температури торця електрода, тобто інерційного ланцюга першого порядку, що спостерігався в ході математичного експерименту, описується як: $T_{\text{те}}(t) = T_{\text{поч}} + \Delta T(1 - e^{-\tau_{\text{ТСЧ}}/t})$, де $T_{\text{те}}(t)$ – температура торця електрода, °C; $T_{\text{поч}}$ – початкова температура, 1000 °C; ΔT – різниця між температурами усталеного (1400 °C) і $T_{\text{поч}}$. У

результаті обчислень отримано значення $\tau_{\text{тсч}} \approx 9$ с. Ця величина корелює з експериментальними даними про період коливаль зварювального струму з частотою 0,01...0,04 Гц. Зазвичай період для усталеного процесу становить 3...4 значення теплової сталої часу.

Значення $\tau_{\text{тсч}}$ було використано для аналізу в пакеті MatLab динамічних змін процесу наплавлення. Введення в модель процесу значення теплової сталої часу дозволило отримати зміни в часі струму електрода $I_e(t)$, температури торця електрода $T_{\text{те}}(t)$ і величини заглиблення плавкого електрода $h_{\text{зе}}(t)$ (рис. 7). З графіка (рис. 7) видно, що в момент часу 20,251 с у позиції 1 струм $I_e(t)$ досягає максимуму при температурі торця $T_{\text{те}}(t) = 2254$ °С, що відповідає приблизно половині її максимального значення. У зв'язку з подальшим зростанням температури швидкість плавлення електрода збільшується, заглиблення плавкого електрода зменшується і струм $I_e(t)$ зменшується через зниження електропровідності каналів. Після досягнення температури торця 2179 °С (позиція 2), тобто при практично тій же температурі, що й у позиції 1, коли швидкість плавлення електрода та швидкість його подачі вирівнюються, починається зворотний процес. При цьому температура торця зменшується, $h_{\text{зе}}$ збільшується і струм $I_e(t)$ також збільшується. Виникає своєрідна «гойдалка» із незатухаючою амплітудою коливаль.

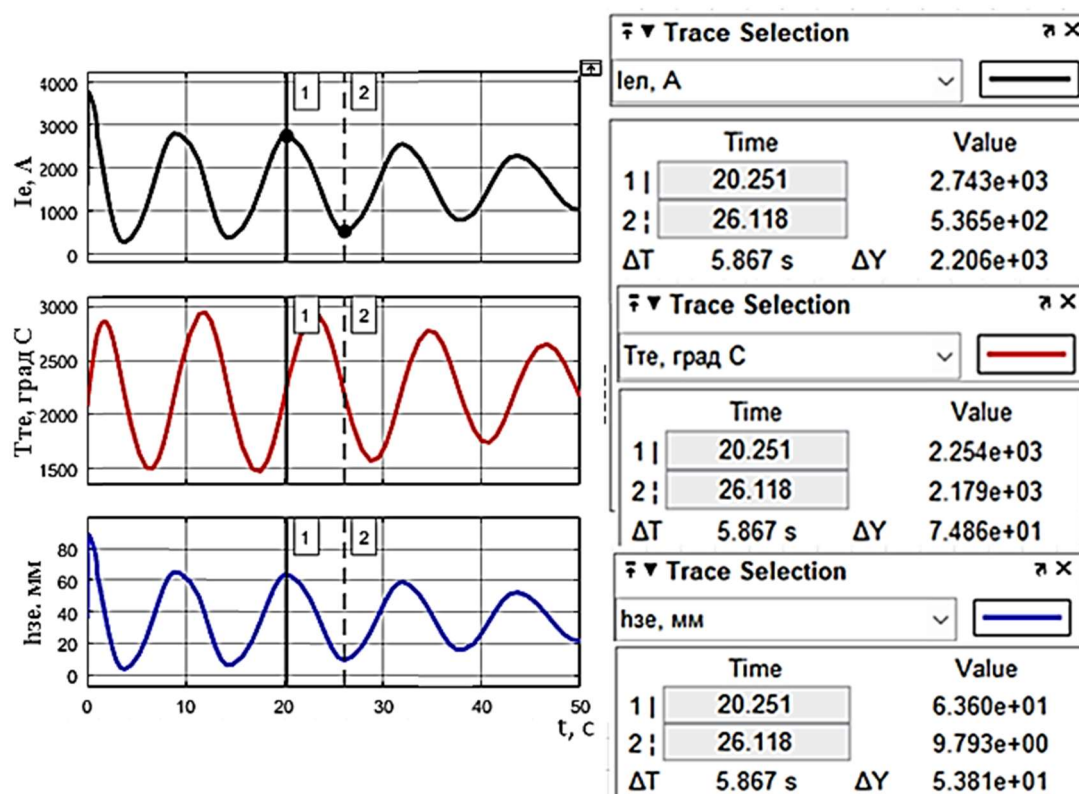


Рис. 7. Зміни в часі функцій $I_e(t)$, $T_{\text{те}}$ та $h_{\text{зе}}$ з таблицею поясень

Таким чином, можна стверджувати, що амплітуда коливаль струму та електропровідності пов'язана з під'єднанням СПК до джерела струму за схемою із загальним електродом типу «Е» та утворенням двох зон концентрації теплової енергії. Зі збільшенням швидкості подачі електрода (в межах допустимого діапазону) зростає амплітуда коливаль заглиблення торця електрода у шлакову ванну. Це пояснюється зменшенням міжелектродного проміжку, що призводить до посилення впливу електропровідності між піддоном і електродом на загальну електропровідність кристалізатора. Водночас вплив електропровідності між струмопідвідною секцією та електродом зменшується. Цей ефект зумовлений наявністю теплової сталої часу шлакової ванни та зворотним впливом зони концентрації теплової енергії, утвореної СПКС, на торець електрода, що рухається до піддона. Зміна глибини

занурення торця електрода змінює розподіл теплового поля та потужність, що виділяється в каналах «електрод–СПКС» і «електрод–піддон». Для стабілізації процесу необхідно враховувати ці особливості та регулювати швидкість подачі електрода залежно від висоти наплавленого шару.

Виявлено, що при збільшенні заглиблення електрода до критичної точки 1 спостерігаються наступні явища:

- зростає амплітуда коливань заглиблення електрода у ШВ при одночасному зменшенні їх частоти;
- посилюється вплив міжелектродної провідності («електрод–СПКС») на плавлення електрода.

З'ясовано, що при подальшому збільшенні заглиблення електрода від критичної точки 1 до критичної точки 2 відбувається наступне:

- зменшується амплітуда коливань заглиблення електрода у ШВ при одночасному збільшенні їх частоти;
- відбувається поступове збільшення міжелектродної провідності («електрод–піддон») з одночасним зменшенням міжелектродної провідності («електрод–СПКС»).

Виявлено, що при досягненні заглиблення електрода критичної точки 2 і подальшому його заглибленні відбувається наступне:

- зменшується міжелектродний проміжок між піддоном і електродом, і, як наслідок, посилюється вплив електропровідності між піддоном і електродом на загальну електропровідність СПК;
- знижується вплив електропровідності між СПКС і електродом на загальну електропровідність СПК;
- зменшується площа бічного плавлення електрода;
- припиняється процес коливань заглиблення електрода у ШВ;
- підвищується ризик перегріву ШВ і закипання шлаку, що потребує корекції швидкості подачі електрода в бік зменшення.

Висновки. 1. Розглянуто причини значної нестабільності заглиблення торця електрода у шлакову ванну. Встановлено, що це явище характерне для схеми під'єднання СПК до джерела струму із загальним електродом для СПКС і піддону (схема типу «Е»).

2. Результати моделювання підтвердили існування двох зон концентрації теплової енергії у шлаковій ванні, які формуються через різницю в потужності струмових каналів «електрод–СПКС» і «електрод–піддон». Ці зони впливають на локальні температурні градієнти та провідність міжелектродних проміжків, що є ключовими факторами нестабільності процесу наплавлення. Для забезпечення стабільності необхідно враховувати ці особливості при проектуванні режимів ЕШН.

3. Вивчено вплив висоти наплавленого зливка та розташування торця плавкого електрода відносно поверхні наплавлення на ці параметри. На основі проведеного дослідження надано рекомендації щодо ведення процесу наплавлення у зазначених умовах.

4. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку автоматизованої системи керування процесом ЕШН на основі отриманих результатів.

Експерименти з наплавлення проводилися під керівництвом та за участю д.т.н. Ю. М. Кускова (Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України).

Список використаних джерел

1. Волошкевич, Г.З. (1962). Стабилизация электрошлакового процесса. *Автоматическая сварка*, 4, 1-5.
2. Zhang, L., Wen, T., Chen, W. et al. (2021). Mathematical modeling on the initial melting of the consumable electrode during electroslog remelting process. *Metall. Mater. Trans.*, 52, 4033-4045. <https://doi.org/10.1007/s11663-021-02318-z>.

3. Dong, Yw., Jiang, Zh., & Li, Zb. (2007). Mathematical model for electros slag remelting process. *Journal Iron Steel Res. Int.*, 14, 7-12. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(08\)60042-4](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(08)60042-4).
4. Weber, V., Jardy, A., Dussoubs, B. et al. (2009). A comprehensive model of the electros slag remelting process: description and validation. *Metall. Mater. Trans.*, 40, 271-280. <https://doi.org/10.1007/s11663-008-9208-9>.
5. Wang, Q., Qi, F., Wang, F. et al. (2015). Numerical investigation on electromagnetism and heat transfer in electros slag remelting process with triple-electrode. *Int. Journal Precis. Eng. Manuf.*, 16, 2467-2474. <https://doi.org/10.1007/s12541-015-0317-5>.
6. Wang, Q., He, Z., Li, B. et al. (2014). A general coupled mathematical model of electromagnetic phenomena, two-phase flow, and heat transfer in electros slag remelting process including conducting in the mold. *Metall. Mater. Trans.*, 45, 2425-2441. <https://doi.org/10.1007/s11663-014-0158-0>.
7. Zhang, J., Li, J., & Shi, Cb. (2021). Numerical analysis of role of melting rate on electros slag remelting continuous directional solidification of a die steel. *Journal Iron Steel Res. Int.*, 28, 1617-1624. <https://doi.org/10.1007/s42243-021-00720-0>.
8. Кусков, Ю.М., Грищенко, Т.И. (2019). Формирование металлической ванны при электрошлаковом процессе в токоподводящем кристаллизаторе. *Автоматическая сварка*, 4, 42-45. <http://dx.doi.org/10.15407/as2019.04.07>.
9. Гориславец, Ю.М., Бондар, О.І., Проскудін, В.М., Кусков, Ю.М., Римар, С.В., & Нетяга А.В. (2022). Вплив струмопідводу на електромагнітні процеси в кристалізаторі для електрошлакового наплавлення металу. *Праці ІЕД НАН України*, 62, 19-24. <https://doi.org/10.15407/publishing2022.62.019>.
10. Кусков, Ю.М., Соловьев, В.Г., & Жданов, В.А. (2017). Торцевая электрошлаковая наплавка электродом большого сечения в токоподводящем кристаллизаторе. *Автоматическая сварка*, 12, 40-45. <https://doi.org/10.15407/as2017.12.05>.
11. Медовар, Б. И. (ред.) (1976). *Электрошлаковые печи*. Наукова думка.
12. Патон, Б. Е. (Ред.). (1980). *Электрошлаковая сварка и наплавка*. Машиностроение.
13. Соловійов, В.Г., Кусков, Ю.М., & Романова, І.Ю. (2024). Оптимізація форми металевої ванни при електрошлаковому наплавленні в стаціонарному струмопідвідному кристалізаторі для отримання біметалевих виробів. *Автоматичне зварювання*, 3, 49-58. <https://doi.org/10.37434/as2024.03.07>.

References

1. Voloshkevych, G. Z. (1962). Stabilizatsiya elektroshlakovogo protsesssa [Stabilization of the electros slag process]. *Avtomatycheskaia swarka – Automatic welding*, 4, 1-5.
2. Zhang, L., Wen, T., Chen, W. et al. (2021). Mathematical modeling on the initial melting of the consumable electrode during electros slag remelting process. *Metall. Mater. Trans.*, 52, 4033-4045. <https://doi.org/10.1007/s11663-021-02318-z>.
3. Dong, Yw., Jiang, Zh., & Li, Zb. (2007). Mathematical model for electros slag remelting process. *Journal Iron Steel Res. Int.*, 14, 7-12. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(08\)60042-4](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(08)60042-4).
4. Weber, V., Jardy, A., Dussoubs, B. et al. (2009). A comprehensive model of the electros slag remelting process: description and validation. *Metall. Mater. Trans.*, 40, 271-280. <https://doi.org/10.1007/s11663-008-9208-9>.
5. Wang, Q., Qi, F., Wang, F. et al. (2015). Numerical investigation on electromagnetism and heat transfer in electros slag remelting process with triple-electrode. *Int. Journal Precis. Eng. Manuf.*, 16, 2467-2474. <https://doi.org/10.1007/s12541-015-0317-5>.
6. Wang, Q., He, Z., Li, B. et al. (2014). A general coupled mathematical model of electromagnetic phenomena, two-phase flow, and heat transfer in electros slag remelting process including conducting in the mold. *Metall. Mater. Trans.*, 45, 2425-2441. <https://doi.org/10.1007/s11663-014-0158-0>.
7. Zhang, J., Li, J., & Shi, Cb. (2021). Numerical analysis of role of melting rate on electros slag remelting continuous directional solidification of a die steel. *Journal Iron Steel Res. Int.*, 28, 1617-1624. <https://doi.org/10.1007/s42243-021-00720-0>.
8. Kuskov, Yu. M., Gryshchenko, T. I. (2019). Formyrovanye metallicheskoj ванны pry elektroshlakovom protsesse v tokopodvodiashchem krystallyzatore [Formation of metal pool in current-supplying mould at electros slag process]. *The Paton Welding Journal*, 4, 33-36. <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.04.07>.

9. Goryslavets, Y.M., Bondar, O.I., Proskudin, V.M., Kuskov, Yu.M., Rymar, S.V., & Netyaha, A.V. (2022). Vpliv strumopidvodu na elektromagnitni protsesi v kristalizatori dlya elektroshlakovogo naplavlennya metalu [Influence of electrical current terminals on electromagnetic processes in a mould for electroslag melting of metal]. *Pratsi IED NAN Ukrayini – Proceedings of the IED of the NAS of Ukraine*, 62, 19-24. <https://doi.org/10.15407/publishing2022.62.019>.
10. Kuskov, Yu.M., Soloviov, V.G., & Zhdanov V.A. (2017). Tortsevaia elektroshlakovaia naplavka elektrodom bolshoho secheniya v tokopodvodiashchem krystallyzatore. [Electroslag surfacing of end faces with large-section electrode in current-supplying mould]. *The Paton Welding Journal*, 12, 29-32. <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.12.05>.
11. Medovar, B. I. (Ed.). (1976). *Elektroshlakovyye pechi [Electroslag furnaces]*. Naukova Dumka.
12. Paton, B. E. (Ed.). (1980). *Elektroshlakovaya svarka i naplavka [Electroslag welding and melting]*. *Machine-building*.
13. Solovyov, V. G., Kuskov, Yu.M., & Romanova, I.Yu. (2024). Optyimizatsiia formy metalevoi vanny pry elektroshlakovomu naplavlenni v statsionarnomu strumopidvidnomu krystalizatori dlia otrymannia bimetallevykh vyrobiv [Optimization of the metal pool shape during electroslag melting in a stationary current-carrying mould for manufacturing of bimetallic products]. *The Paton Welding Journal*, 5, 28-36. <https://doi.org/10.37434/tpwj2024.05.04>.

Отримано 07.04.2025

UDC 669.117.56.002.6

Volodymyr Solovyov¹, Iryna Romanova²

¹PhD in Technical Sciences, Senior Researcher of Department of Pulsed Processes and Technology of Arc Welding
E. O. Paton Electric Welding Institute of National Academy of Science of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: hhsova@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1454-7520>. **Scopus Autor ID:** 58740647500

²PhD in Technical Sciences, Deputy Head of Department of Pulsed Processes and Technology of Arc Welding
E. O. Paton Electric Welding Institute of National Academy of Science of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: romanova@paton.kiev.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7154-1830>. **Scopus Autor ID:** 57222474743

REASONS OF DESTABILIZATION OF THE ELECTROSLAG MELTING PROCESS IN THE STATIONARY CURRENT-BASED CRYSTALLISER

The paper considers the process of electroslag melting in the stationary type current-carrying crystallizer with a power supply connection scheme in which the power supply terminal of the current-carrying section of the crystallizer is connected to the terminal of the pallet. This connection of the crystallizer to the power source ensures high productivity of the melting process. However, even if the electrode feed rate into the slag pool is maintained at the constant rate, significant fluctuations in the electrode current are observed. The amplitude of these fluctuations reaches almost 50% of the maximum current value with a frequency of 10-25 s. This indicates significant fluctuations in the temperature of the slag bath during the melting process. These fluctuations can lead to undesirable changes in the physical, mechanical, and structural properties of the deposited metal. The causes of these fluctuations are analyzed. The ways to reduce them and increase the stability of the melting process are presented.

Keywords: stationary current-driven crystallizer; self-regulating mechanism; multiphysics modeling; electroslag melting; stabilization of the electroslag process.

Fig.: 7. References: 12.