

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

УДК 621.74:537.84

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2026.73.051>**РОЗРАХУНКОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ФАКТОРІВ НА ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПЕРЕМІШУВАННЯ РОЗПЛАВУ ПРИ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОМУ ПЛАВЛЕННІ В ГАРНІСАЖНОМУ ТИГЛІ**

О.І. Бондар^{*}, канд. техн. наук, **О.І. Глухенький**^{**}, канд. техн. наук, **Ю.М. Гориславець**^{***}, докт. техн. наук, **В.І. Залозний**^{****}, канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: gai56@ied.org.ua

Розглянуто конструктивні схеми гарнісажних тиглів із системами електромагнітного перемішування (СЕМП), що знайшли практичне застосування в технології електронно-променевої гарнісажної плавки. Наведено тривимірну математичну модель та методу чисельного дослідження впливу конструктивних факторів секціонованого гарнісажного тигля та СЕМП на енергетичну та гідродинамічну ефективність перемішування розплаву. Математичну модель електромагнітних процесів сформульовано відносно векторного магнітного та скалярного електричного потенціалів, гідродинамічних процесів у вигляді рівнянь Нав'є-Стокса з використанням $k-\epsilon$ моделі турбулентності. Розрахунки виконувалося методом скінченних елементів у програмному середовищі Comsol Multiphysics. Порівняння ефективності конструктивних факторів здійснювалось на прикладі гарнісажного тигля із загальним завантаженням титанової шихти близько 200 кг. Досліджувався вплив таких факторів, як кількість та розмір наскрізних прорізів у боковій стінці тигля, матеріал та товщина цієї стінки, кількість котушок індуктора перемішувача. Бібл. 10, рис. 7, таблиця.

Ключові слова: електронно-променева плавка, гарнісажний тигель, система електромагнітного перемішування, математичне моделювання електромагнітних та гідродинамічних процесів.

Вступ. Електронно-променева гарнісажна плавка (ЕПП) – це передова сучасна технологія спеціальної електрометалургії, що використовується для виробництва ливарних виробів з особливо чистих тугоплавких і високореактивних у розплавленому стані металів, таких як титан, ніобій, тантал, цирконій, та їхніх сплавів [1]. При ЕПП плавка металу здійснюється в глибокому вакуумі в спеціальному охолоджуваному водою мідному тиглі. Метал плавиться завдяки перетворенню кінетичної енергії створеного електронною гарматою потоку вільних електронів у теплову при їхньому гальмуванні в поверхневому шарі металу. У процесі плавки завантажена в тигель металева шихта перетворюється в розплав, водночас на стінках тигля формується шар твердого металу, що отримав назву гарнісаж. Гарнісаж виконує функцію футеровки, яка захищає розплав від забруднення з боку тиглю. При ЕПП висока локальна температура на поверхні розплаву та глибокий вакуум забезпечують ефективне рафінування металів [2, 3], що є основною перевагою цієї технології відносно таких альтернативних технологій, як індукційна та вакуумно-дугова гарнісажні плавки.

Одним з основних конструктивних елементів, що визначає ефективність технологічного процесу ЕПП, є гарнісажні тиглі. Розробці гарнісажних тиглів присвячені численні переважно експериментальні дослідження [4–6], в яких розглянуті питання як їхнього конструктивного виконання, так і технологічних особливостей проведення плавки різних металів і сплавів. Узагальнення результатів цих досліджень станом на початок поточного століття виконано в роботі [7]. На рис. 1 наведено перші конструктивні схеми гарнісажних тиглів для ЕПП, які знайшли практичне застосування, тобто були виготовлені та реально експлуатувалися у виробничих умовах.



Тигель, схему якого показано на рис. 1 *а*, був першим гарнісажним тиглем, використаним при ЕПГП [4]. Плавильна ємність тигля виконана із профільованої мідної трубки і футерована штабиками тугоплавкого металу (вольфрам або молібден). У такому тиглі можна отримувати невелику кількість розплаву для заливання в ливарну форму. Однак виплавляння досить складного за вмістом сплаву цей тигель не забезпечував. У практичному плані досвід експлуатації розглянутих тиглів цікавий тим, що дав змогу перевірити роботу теплових екранів, без яких плавка в подібних тиглях супроводжувалася дуже високими витратами електроенергії.

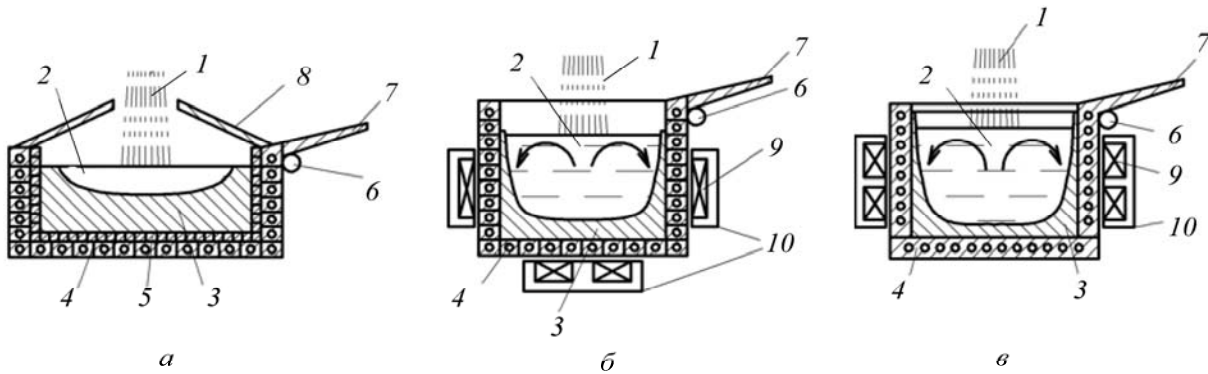


Рис. 1. Перші конструктивні схеми гарнісажних тиглів для ЕПГП:

а – без примусового перемішування розплаву; *б* – з донно-бічною СЕМП; *в* – з бічною двокотушковою СЕМП (1 –електронний промінь, 2 – розплав, 3 – гарнісаж, 4 –мідна трубка, 5 – штабика тугоплавкого металу, 6 – вісь обертання для зливання тигля, 7 – зливний носик, 8 – тепловий екран, 9 – коаксіальна котушка, 10 – магнітопровід)

На рис. 1 *б* наведена схема тигля, в якому для інтенсифікації перемішування розплаву застосована донно-бічна система електромагнітного перемішування (СЕМП) [5]. Це була перша така розробка, використана при ЕПГП. Згодом переважно почали використовувати тиглі з бічним розташуванням СЕМП (див. рис. 1 *в*), причому спочатку в тиглях з СЕМП також застосовувалися плавильні ємності, виконані з профільованої мідної трубки.

Проте надалі більш доцільним виявилось використання плавильних ємностей у вигляді циліндричних литих виробів, у стінках яких виконувались отвори для охолоджувальної води та розрізи в місцях розміщення котушок СЕМП. На рис. 2 відображено конструктивні схеми двох гарнісажних тиглів із бічною трикотушковою СЕМП, в яких зливання розплаву виконується через зливний носик (рис. 2 *а*) та через отвір у днищі ємності (рис. 2 *б*). Бічне розташування СЕМП на відміну від донно-бічного дає змогу реалізувати обидва варіанти зливання розплаву. Мінімізація екранування магнітних полів у таких тиглях досягається зав-

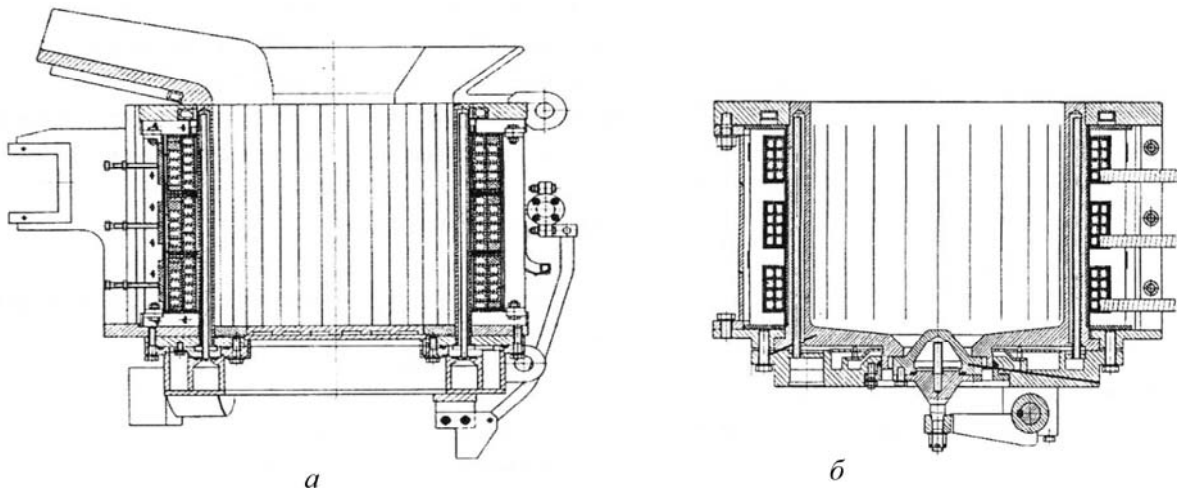


Рис. 2. Конструктивні схеми гарнісажних тиглів зі зливанням розплаву через зливний носик (*а*) та отвір в днищі ємності (*б*)

дяки виконанню розрізів у зоні розміщення індуктора СЕМП. Кількість розрізів n повинна бути якомога більшою, щоб забезпечити достатню прозорість для проникнення електромагнітного поля СЕМП у розплав.

Для зменшення впливу електромагнітного поля на електронний промінь частина тигля, що розташована вище рівня металу, може виконуватися без розрізів, тобто у вигляді короткозамкненого витка. Крім того, для зменшення збурення електронного променя, який під дією магнітного поля може відхилитися на стінки та за межі тигля, над СЕМП, як це показано на рис. 2, зазвичай встановлюється додатковий короткозамкнений виток у вигляді мідного водоохолоджуваного фланця.

При плавленні тугоплавких металів тиглі виконуються з міді, для металів з меншим тепловим навантаженням на стінки тигля (наприклад, для сплавів на основі нікелю, заліза) вони можуть виконуватися з нержавіючої сталі X18H10T [6].

Стосовно конструктивного виконання СЕМП ці системи зазвичай являють собою індуктори, що складаються з двох або трьох коаксіальних, розподілених за висотою тигля котушок, які розміщені навколо нього в пазах шихтованого магнітопроводу. Котушки виконано з мідної профільованої водоохолоджуваної трубки. Електроживлення котушок переважно здійснюється струмами промислової частоти за зниженої напругі (~ 20 В) та високої сили струму (~ 1000 А). Для наведення біжучого магнітного поля, яке призводить до виникнення руху розплаву в тиглі, суміжні котушки живляться напругами, що мають зсув за фазою. У випадку двох котушок кут зсуву фаз між електричними напругами зазвичай складає 90 ел. град., трьох котушок – 60 або 120 ел. град. Наведені значення кутів зсуву фаз між напругами відносно просто можуть бути забезпечені від трифазної промислової мережі електроживлення. Експериментально визначено, що використання при електроживленні СЕМП струмів зниженої або підвищеної частоти не дає суттєвих переваг при перемішуванні розплаву.

Зважаючи на високу енерго- та матеріалоємність проведення експериментальних досліджень, найбільш раціональним підходом щодо удосконалення конструкції гарнісажного тигля та системи електромагнітного перемішування наразі є використання методів математичного моделювання [8]. Проведення варіантних розрахунків дає змогу визначити вплив тих чи інших конструктивних факторів гарнісажного тигля та СЕМП на ефективність електромагнітного перемішування розплаву, що буде сприяти як знаходженню оптимальних конструктивних рішень, так і вибору раціональних технологічних режимів їхньої експлуатації.

Мета цієї роботи – визначити вплив на ефективність електромагнітного перемішування розплаву конструктивних факторів гарнісажного тигля та системи електромагнітного перемішування для технології електронно-променевого гарнісажного плавлення шляхом тривимірного математичного моделювання взаємопов'язаних електромагнітних і гідродинамічних процесів. Зокрема задачі цього дослідження полягають у визначенні впливу таких факторів, як кількість та розмір наскрізних прорізів у боковій стінці тигля, матеріал та товщина цієї стінки, кількість котушок індуктора перемішувача.

Математична модель та методика досліджень. Розрахункове дослідження впливу конструктивних факторів на енергетичну та гідродинамічну ефективність перемішування розплаву виконувалося методом скінченних елементів у програмному середовищі Comsol Multiphysics [9]. Індуктор електромагнітного перемішувача разом із гарнісажним тиглем та його навантаженням утворюють складну електромагнітну систему. Незважаючи на її осесиметричну конструкцію, присутність в боковій стінці гарнісажного тигля прорізів у зоні розміщення СЕМП призводить до суто тривимірного характеру розтікання вихрових струмів у секціях тигля і, відповідно, потребує тривимірного моделювання електромагнітних та гідродинамічних процесів [10].

Рівномірне виконання прорізів на бічній поверхні тигля забезпечує регулярність структури електромагнітних і гідродинамічних процесів в азимутальному напрямі, що дає змогу при чисельному моделюванні з метою зниження розрахункового часу обмежитися розглядом сектора, що становить $1/n$ об'єму системи. На рис. 3 проілюстровано фрагмент розрахункової області зазначеного сектора для випадку індуктора електромагнітного перемішувача із трьома котушками. Площини, що формують розрахункову область, проходять через вісь тигля та

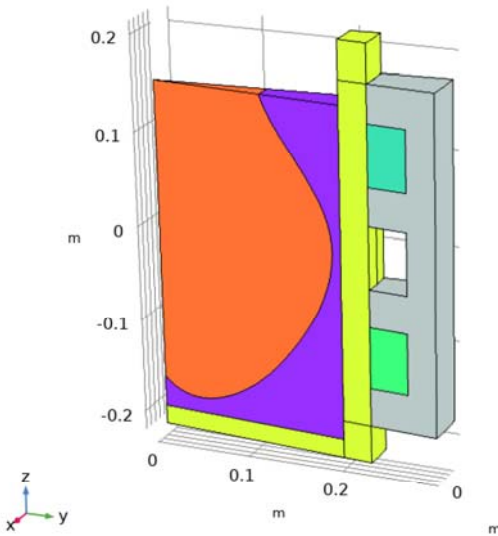


Рис. 3. Фрагмент розрахункової області електромагнітної задачі

середини його суміжних секцій. Для візуалізації наявності розрізів бічної стінки тигля середня котушка на рисунку не показана. Титанове завантаження всередині тигля частково перебуває в рідкому (металевий розплав) та твердому (гарнісаж) станах.

При моделюванні розглядався усталений режим роботи СЕМП. Порівняння ефективності конструктивних факторів здійснювалось шляхом виконання варіантних розрахунків та аналізу їхніх результатів за збереження сталих значень ампер-витків індуктора СЕМП та фіксованого об'єму розплаву титану в гарнісажному тиглі.

Для моделювання електромагнітних процесів використовувався інтерфейс "Магнітні та електричні поля" (The Magnetic and Electric Fields interface). У зазначеному інтерфейсі система рівнянь для розрахунку електромагнітного поля, яка формулюється відносно комплексних амплітуд векторного магніт-

ного $\dot{\mathbf{A}}$ та скалярного електричного $\dot{\phi}$ потенціалів, у загальному випадку з урахуванням швидкості руху \mathbf{u} рідкого металу має вигляд:

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) + (j\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r) \dot{\mathbf{A}} + (\sigma + j\omega\varepsilon_0 \varepsilon_r) \nabla \dot{\phi} - \sigma \mathbf{u} \times \nabla \times \dot{\mathbf{A}} = \dot{\mathbf{J}}_e, \quad (1)$$

$$\operatorname{div} \dot{\mathbf{J}} = 0, \quad \operatorname{div} \dot{\mathbf{A}} = 0, \quad (2)$$

де μ_0 і ε_0 – магнітна та діелектрична проникність вакууму, μ_r і ε_r – відносні магнітні й діелектричні проникності, σ – питома електропровідність, ω – кутова частота, $\dot{\mathbf{J}}$ і $\dot{\mathbf{J}}_e$ – відповідно комплексні амплітуди густини повного струму та зовнішнього (заданого) струму.

Вибір зазначеного інтерфейсу для розрахунку електромагнітного поля обумовлений доступністю в ньому граничної умови $\mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{J}} = 0$ (Magnetic Continuity / Electric Insulation), яка дає змогу моделювати відсутність на внутрішніх границях розрахункової області нормальної складової електричного струму. Застосування цієї граничної умови дає змогу відмовитися від безпосереднього врахування в моделі ізолюючих проміжків як між секціями гарнісажного тигля, так і між тиглем та гарнісажем. Урахування тонких проміжків призвело б до суттєвого загушення розрахункової сітки та збільшення тривалості розрахунку електромагнітної задачі, що значно ускладнило б проведення варіантних розрахунків. Зазначимо, що в альтернативному інтерфейсі Comsol Multiphysics для розрахунку електромагнітного поля "Магнітні поля" (The Magnetic Fields interface) ця гранична умова відсутня.

Як параметр, що визначає продуктивність електромагнітного перемішувача, розглядалися сумарні ампер-витки Iw (амплітудне значення), які рівномірно розподілялися котушками індуктора $Iw_i = Iw/n_c$, де n_c – кількість котушок. При заданні ампер-витків електромагнітного перемішувача його котушки моделювалися непровідними підобластями з рівномірно розподіленою заданою густиною струму

$$\dot{\mathbf{J}}_{ei} = \dot{I}w_i / s, \quad (3)$$

де $\dot{I}w_i$ – комплексна амплітуда (з урахуванням кута фазового зсуву) ампер-витків в i -котушці, s – площа поперечного перерізу підобласті котушки.

За суміщення осі тигля з віссю z декартової системи координат та симетричного положення розрахункової області (сектора) відносно осі y , як це показано на рис. 3, просторові складові густини струму в області котушок визначалися таким чином:

$$\dot{J}_{eix} = -\dot{J}_{ei} \cos \theta, \quad \dot{J}_{eiy} = \dot{J}_{ei} \sin \theta, \quad (4)$$

де $\theta = \arctan(x/y)$ – кутова координата точок (x, y) відносно осі y .

Як гранична умова на бічних поверхнях сектора задавалась умова періодичності, яка забезпечує однаковість розподілу на них значень векторного магнітного та скалярного елек-

тричного потенціалів. На інших зовнішніх поверхнях розрахункової області задавалась умова магнітної ізоляції $\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0$.

За результатами розрахунків електромагнітної задачі визначалися об'ємні електромагнітні сили \mathbf{f} в рідкому металі

$$\mathbf{f} = 0,5 \operatorname{Re}(\mathbf{J} \times \mathbf{B}^*), \quad (5)$$

де $\mathbf{J} = \sigma(-\nabla\phi - j\omega\mathbf{A})$ – густина струму провідності в рідкому металі, \mathbf{B}^* – спряжений комплекс індукції магнітного поля, $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$.

Джоулеві втрати від вихрових струмів у стінках тигля та рідкому металі визначалися шляхом інтегрування локальних тепловиділень відповідними підобластями з урахуванням кількості розрізів у стінці тигля

$$P_i = 0,5n \int_{V_i} \frac{\mathbf{J} \mathbf{J}^*}{\sigma_i} dV. \quad (6)$$

Гідродинамічна задача розраховувалась (див. рис. 3) тільки для підобласті рідкого металу. Розподіл швидкості розплаву в гарнісажному тиглі визначався за допомогою чисельного розв'язання диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса для турбулентної течії

$$\rho_m (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot (\eta_{eff} \nabla \mathbf{u}) + \mathbf{f}; \quad \nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (7, 8)$$

де \mathbf{u} – швидкість руху рідкого металу, ρ_m – густина металу, p – тиск, η_{eff} – коефіцієнт ефективно динамічної в'язкості металу, що визначається за допомогою k - ε моделі турбулентності, \mathbf{f} – об'ємна електромагнітна сила в рідкому металі, обчислена за результатами розрахунку електромагнітної задачі.

Граничні умови на границі гарнісажу задавалися у вигляді логарифмічного профілю швидкості для приграничного шару. На верхній (вільній) поверхні рідкого металу та на бічних поверхнях сектора відповідно приймалися умова ковзання та умова періодичності. Меніск на вільній поверхні не враховувався.

Розрахунки електромагнітної та гідродинамічної задач виконувались у безіндукційному наближенні, тобто без урахування електрорушійних сил, що наводяться в рідкому металі завдяки його руху. Прийнятність безіндукційного наближення обумовлена відносно незначною величиною цих сил при роботі СЕМП на промисловій частоті.

Гідродинамічна ефективність конструктивних варіантів оцінювалася за допомогою усередненої за об'ємом сектора рідкого металу V_m швидкості руху розплаву

$$u_{av} = \frac{1}{V_m} \int_{V_m} \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} dV, \quad (9)$$

де u_x , u_y , u_z – просторові складові швидкості руху розплаву в декартовій системі координат.

За узагальнений критерій ефективності, що враховує як гідродинамічну продуктивність, так і потужність перемішувача, приймалося співвідношення

$$u_s = u_{av} / \sqrt{S} \quad (10)$$

де S – сумарна електромагнітна потужність котушок індуктора СЕМП. Електромагнітна потужність кожної котушки визначалась за результатами розрахунку електромагнітного поля відповідно до виразу

$$S_i = 0,5n \cdot \operatorname{Abs}(j\omega \int_{V_i} \mathbf{A}_i \mathbf{J}_i^* dV), \quad (11)$$

де V_i – об'єм сектора i -тої котушки індуктора СЕМП.

Для кожного конструктивного варіанту обраний критерій ефективності u_s на відміну, наприклад, від відношення u_{av}/S , враховуючи турбулентний характер руху розплаву в тиглі при електромагнітному перемішуванні, залишається постійним за будь-яких значень ампер-витків, що дає змогу розглядати співвідношення u_s як універсальну питому характеристику системи.

Зазначимо, що за прийнятого в моделі підходу задання струмів в індукторі при визначенні його електромагнітної потужності не враховуються джоулеві втрати в котушках, які в індукторах СЕМП для можливості реалізації водяного охолодження намотуються ізольованою мідною трубкою. За умови рівних значень струмів у котушках I у першому наближенні, вважаючи однаковою середню довжину витка l_w для всіх котушок незалежно від їхньої кількості в індукторі, втрати в ньому визначаються відповідно до виразу

$$P_{ind} = I^2 \frac{w \cdot l_w}{\sigma_{Cu} s_{Cu}} = \left(\frac{Iw}{w} \right)^2 \frac{w \cdot l_w}{\sigma_{Cu} s_{Cu}}, \quad (12)$$

де w – загальна кількість витків індуктора, σ_{Cu} та s_{Cu} – відповідно питома електропровідність та площа поперечного перетину міді. Тобто, при сталих сумарних ампер-витках втрати в індукторі обернено пропорційні загальній кількості витків і не залежать від кількості котушок в індукторі.

Вихідні дані для розрахунків. Одним із основних напрямів розвитку технології ЕПГП є підвищення максимального об'єму розплаву в гарнісажному тиглі, що може бути досягнуто завдяки створенню відповідного плавильного обладнання (електронно-променева гармата, гарнісажний тигель, електромагнітний перемішувач) та вибору раціонального режиму його роботи. Досягнута на сьогодні максимальна маса відливок з титану сягає 50 кг, водночас потреби ливарного виробництва вимагають підвищення цього показника до 100-150 кг. Саме тому дослідження впливу конструктивних факторів гарнісажного тигля та СЕМП на енергетичну та гідродинамічну ефективність електромагнітного перемішування розплаву виконувалось на прикладі гарнісажного тигля із загальним завантаженням титанової шихти близько 200 кг.

Розглядався мідний тигель із внутрішнім діаметром $d = 400$ мм та висотою завантаження титану в розплавленому стані $l = 350$ мм ($l/d \approx 0,9$). При розрахунках вважалось, що гарнісаж у тиглі відсутній, а вільна поверхня розплаву знаходиться на рівні середини верхнього зубця магнітопроводу індуктора. Питома електропровідність міді задавалася рівною $5,8 \cdot 10^7$ См/м, рідкого титану $-6 \cdot 10^5$ См/м, значення густини рідкого титану приймалось $4,1 \cdot 10^3$ кг/м³, його динамічна в'язкість – $0,0024$ Па·с.

Розрахунки виконувалось при сталому значенні загальних ампер-витків індуктора $Iw = 30$ кА (діюче значення). У випадку, наприклад, загальної кількості витків індуктора $w = 30$ при намотуванні котушок мідною трубкою діаметром 12 мм та товщиною стінки 1,5 мм (площа поперечного перерізу $s_{Cu} = 49,5$ мм²) із середнім діаметром витка $d_w = 0,5$ м ($l_w = 1,57$ м), втрати в індукторі при зазначених ампер-витках відповідно до виразу (12) становлять $P_{ind} = 16,4$ кВт.

Результати моделювання. Розрахунковий аналіз впливу кількості прорізів та товщини бічної стінки тигля на електромагнітну прозорість стінки гарнісажного тигля виконувався на прикладі індуктора СЕМП із двома котушками, які розміщувалися в пазах Ш-подібного шихтованого магнітопроводу. Кут фазового зсуву між струмами становив 90 ел. град. з напрямом біжучого магнітного поля вверх вздовж бокової стінки тигля.

Аналіз впливу кількості прорізів бічної стінки тигля на ефективність електромагнітного перемішування виконувався при товщині бічної стінки $b = 20$ мм. Структура вихрової течії розплаву, що була отримана в результаті розрахунку при кількості прорізів бічної стінки тигля $n = 40$, показана на рис. 4.

На рис. 5 зображено розрахункові залежності впливу кількості прорізів бічної стінки тигля n на енергетичні (рис. 5 а) та гідродинамічні (рис. 5 б) параметри СЕМП. На рис. 5 а показано, що зі зростанням кількості прорізів у розглянутому діапазоні зміни n практично в 1,5 раза знижуються втрати в стінках мідного тигля P_{cr} та в 2 рази збільшуються тепловиділення в розплаві P_m . Притому сумарні тепловиділення від вихрових струмів P_{Σ} змінюються несуттєво (в межах 10 %). Збільшені тепловиділення в розплаві не відносяться до втрат, оскільки йдуть на його підігрів, тож збільшення кількості прорізів бічної стінки тигля завдяки зменшенню втрат у тиглі сприяє підвищенню енергоефективності роботи СЕМП.

Зі зростанням кількості прорізів бічної стінки гарнісажного тигля також покращується гідродинамічна ефективність СЕМП, про що свідчить показана на рис. 5 б залежність від n усередненої за об'ємом розплаву швидкості u_{av} .

Вплив товщини стінки тигля на ефективність електромагнітного перемішування досліджувався при фіксованому значенні кількості прорізів бічної стінки гарнісажного тигля $n = 40$. На рис. 6 показано аналогічні попереднім залежності параметрів ефективності СЕМП від товщини стінки тигля. Як видно з наведеного рисунка збільшення товщини бокової стінки погіршує як енергетичну, так гідродинамічну ефективність СЕМП.

Характер впливу кількості прорізів та товщини бічної стінки тигля на електромагнітну прозорість стінки гарнісажного тигля, як показали розрахунки, не залежить від кількості котушок індуктора. Виходячи з отриманих результатів, кількість прорізів бокової стінки гарнісажного тигля раціонально робити якомога більшою, а товщину стінки тоншою. Конструктивно мінімальні розміри поперечного перерізу секцій гарнісажного тигля обмежуються діаметром та товщиною стінок каналів водяного охолодження секцій. Експериментально встановлено, що для попередження виходу тиглів з ладу при короткочасному попаданні на нього електронного променя робоча товщина мідної стінки повинна бути не менше 5 мм на сторону. Так, для діаметра каналу водяного охолодження 10 мм товщина бокової стінки гарнісажного тигля повинна бути більше $b = 20$ мм, а кількість прорізів для тигля діаметром $d = 400$ мм не повинна перевищувати $n = \pi \cdot 400 / 20 = 63$.

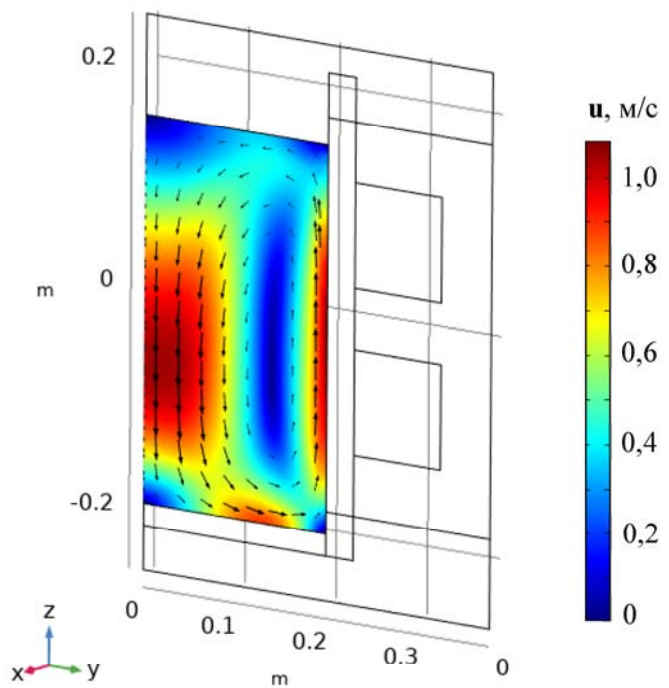


Рис. 4. Структура вихрової течії розплаву в секціонованому тиглі за відсутності гарнісажу

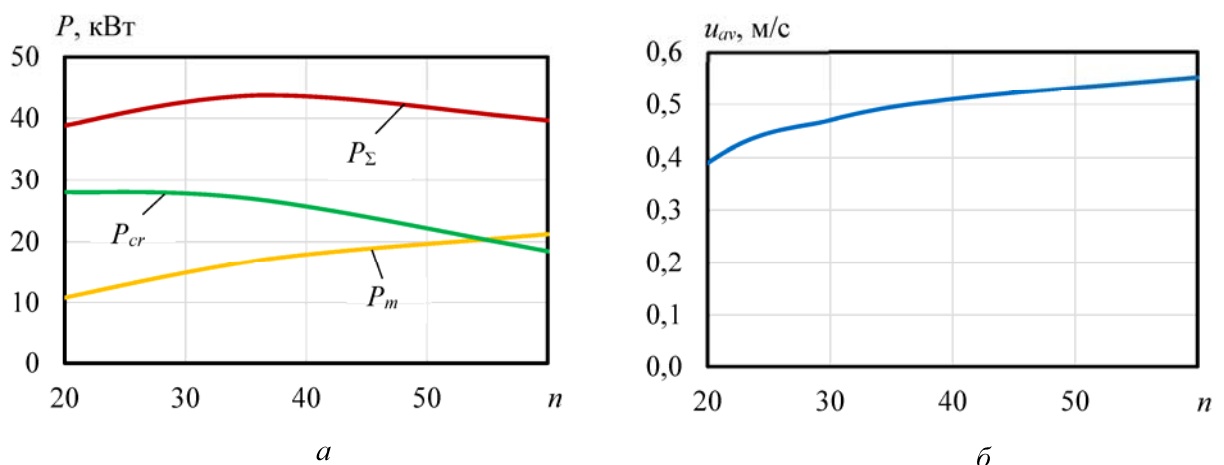


Рис. 5. Вплив кількості прорізів бічної стінки тигля на енергетичні (а) та гідродинамічні (б) параметри СЕМП

Вплив питомої електропровідності σ секціонованого тигля на енергетичні та гідродинамічні параметри СЕМП досліджувався на прикладі індуктора з трьома котушками та кутом фазового зсуву між струмами 60 ел. град. Розглядався діапазон зміни σ від 0 до $6 \cdot 10^7$ См/м, який охоплює практично весь перелік потенційно придатних немагнітних матеріалів

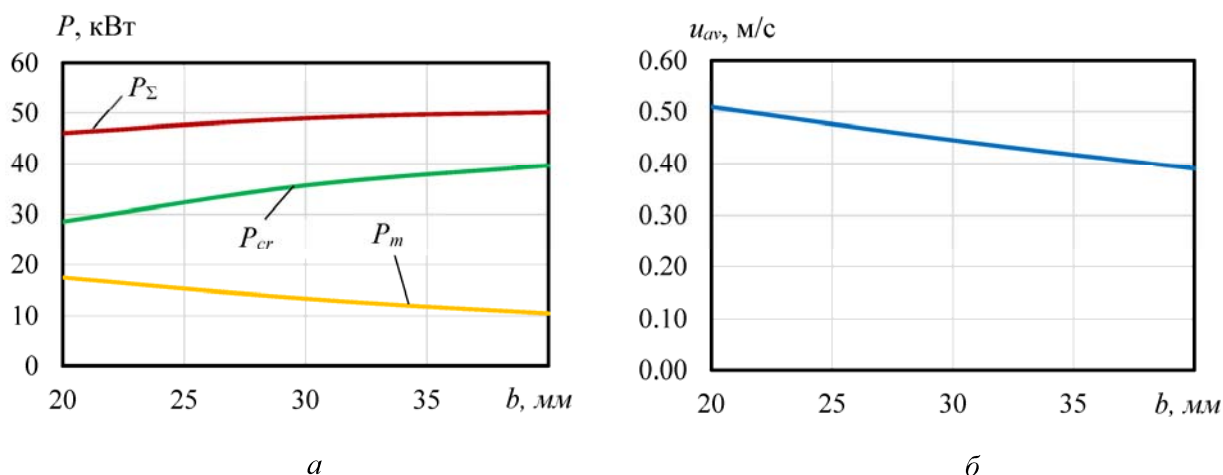


Рис. 6. Вплив товщини бічної стінки тигля на енергетичні (а) та гідродинамічні (б) параметри СЕМП

для виготовлення тигля, починаючи з нержавіючої сталі ($\sigma_{st} = 1,25 \cdot 10^6$ См/м) та завершуючи міддю ($\sigma_{Cu} = 5,8 \cdot 10^7$ См/м).

На рис. 7 показано залежності втрат в стінках тигля P_{cr} та усередненої за об'ємом розплаву швидкості u_{av} , які були отримані при кількості прорізів бічної стінки тигля $n = 40$, товщині бічної стінки $b = 30$ мм. Зі збільшенням питомої електропровідності втрати в секціонованому тиглі P_{cr} спочатку стрімко, а далі все більш повільно зростають, а усереднена за об'ємом розплаву в тиглі швидкість u_{av} монотонно знижується. Слід відмітити, що для частоти 50 Гц секціонований тигель із нержавіючої сталі є практично прозорим для електромагнітного поля індуктора СЕМП. Втрати від вихрових струмів у такому тиглі становлять близько 1 кВт, а усереднена за об'ємом тигля швидкість u_{av} практично не змінюється відносно швидкості в неелектропровідному тиглі. Крім того, навіть мідний секціонований тигель забезпечує достатню електромагнітну прозорість. Швидкість u_{av} у цьому випадку становить близько 75 % відносно неелектропровідного тигля. Недоліком нержавіючої сталі є мала питома теплопровідність $k_{st} = 16$ Вт/(м·К), яка у 25 разів менша, ніж у міді ($k_{Cu} = 398$ Вт/(м·К)). Це ускладнює формування гарнісажу на стінках тигля з нержавіючої сталі при плавленні тугоплавких металів. Недоліком мідного тигля можна вважати його низьку енергоефективність внаслідок значних втрат від вихрових струмів ($P_{cr} = 32$ кВт). Суттєвого підвищення ефективності електромагнітного перемішування можна досягти у разі виготовлення тиглю з латуні або бронзи, які при досить високій теплопровідності (до 120 Вт/(м·К)) мають суттєво менші

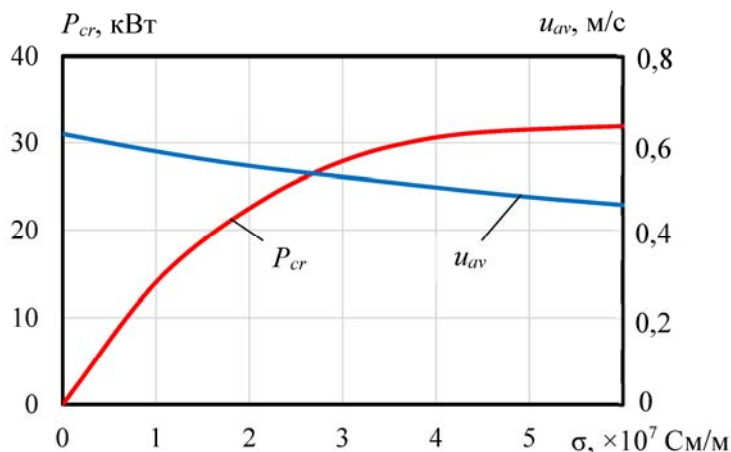


Рис. 7. Втрати в стінках тигля та усереднена по об'єму розплаву швидкість в залежності від питомої електропровідності тигля

відносно міді питомі електропровідності ($\sigma = (0,7-1,5) \cdot 10^7$ См/м). Це дасть змогу як підвищити електромагнітну прозорість тигля, так і зменшити у ньому втрати практично у два рази.

Вибір раціональної конструкції індуктора проводився шляхом порівняння результатів розрахунків конструктивних варіантів СЕМП з двома, трьома та шістьма котушками. Для індуктора з трьома котушками розглядалися випадки живлення з кутом зсуву фаз α між струмами суміжних котушок 60 та 120 ел. град. При розрахунках загальні ампер-витки індуктора порівно розділялися

між котушками. Розрахунки виконувались при фіксованих параметрах конструкції тигля ($b = 20$ мм, $n = 40$). Результати, що характеризують енергетичну та гідродинамічну ефективність розглянутих конструктивних варіантів СЕМП, зведено в таблицю.

n_c	α , ел. град.	P_m , кВт	P_{cr} , кВт	P_{Σ} , кВт	S , кВА	u_{av} , м/с	u_s , м/(с·кВА ^{1/2})
2	90	17,92	25,70	43,54	178,78	0,51	0,038
3	60	16,00	22,70	38,50	115,22	0,54	0,050
3	120	4,72	23,10	27,80	95,44	0,41	0,042
6	60	4,84	19,36	24,20	91,27	0,46	0,048

Аналіз представлених у таблиці результатів дає змогу зробити висновок, що найбільш ефективним серед розглянутих конструктивних варіантів є індуктор із трьома котушками, який живиться струмами з кутом фазового зсуву $\alpha = 60$ ел. град. Такий індуктор при однакових ампер-витках забезпечує не тільки найвищу усереднену швидкість руху розплаву в тиглі u_{av} , а й має найбільше значення питомого критерію u_s , який враховує як гідродинамічну, так і енергетичну ефективність СЕМП.

Висновки. 1. Для технології електронно-променевої гарнісажної плавки сформульовано тривимірну математичну модель для чисельного дослідження впливу конструктивних факторів секціонованого гарнісажного тигля та системи електромагнітного перемішування на енергетичну та гідродинамічну ефективність перемішування розплаву. Для зменшення розрахункового часу в моделі використовуються гранична умова «періодичності», яка дає змогу обмежитися розглядом сектора, що становить $1/n$ об'єму системи, та гранична умова «електрична ізоляція», яка допомагає уникнути загушення розрахункової сітки при моделюванні тонких ізолюючих проміжків між суміжними секціями.

2. На прикладі гарнісажного тигля із загальним завантаженням близько 200 кг титану досліджено вплив кількості наскрізних прорізів та товщини бокової стінки тигля на ефективність електромагнітного перемішування розплаву. Показано, що кількість прорізів бокової стінки гарнісажного тигля раціонально робити якомога більшою, а товщину стінки тоншою. Конструктивно мінімальні розміри поперечного перетину секцій гарнісажного тигля обмежуються діаметром та товщиною міді стінок каналів водяного охолодження секцій.

3. Досліджено вплив питомої електропровідності матеріалу секціонованого тигля на енергетичні та гідродинамічні параметри перемішування розплаву. Суттєвого підвищення ефективності електромагнітного перемішування можна досягти у разі виготовлення тиглю з латуні або бронзи, які при досить високій теплопровідності мають суттєво менші відносно міді питомі електропровідності. Це дасть змогу як підвищити електромагнітну прозорість тигля, так і зменшити втрати практично у два рази.

4. Для гарнісажного тигля розглянуто конструктивні варіанти СЕМП з двома, трьома та шістьма котушками. Установлено, що найбільш ефективним серед розглянутих варіантів є індуктор з трьома котушками, який живиться струмами з кутом фазового зсуву $\alpha = 60$ ел. град. Такий індуктор забезпечує не тільки найвищу усереднену швидкість руху розплаву в тиглі, а й має найбільше значення питомого критерію, який враховує як гідродинамічну, так і енергетичну ефективність СЕМП.

Роботу виконано за держбюджетною темою «Розвиток теорії електротехнологічних процесів та розроблення ефективних електроплавильних та електрозарядних систем з керованим електромагнітним впливом» (шифр «ЕЛТЕХ»), № державної реєстрації 0122U000839, відомчого цільового замовлення НАН України та фінансовано з коштів державного бюджету (КПКВК 6541030).

1. Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З. Електронно-лучевая технология. Пер. с нем. М.: Энергия. 1980. 528 с.
2. Ульянов В.Л. Электронно-лучевая гарнисажная плавка при получении фасонных отливок. *Литейное производство*. 1972. № 10. С. 13–15.
3. Мовчан Б.А., Тихоновский А.Л., Курапов Ю.А. Электронно-лучевая плавка и рафинирование металлов и сплавов. Киев: Наук. думка. 1973. 239 с.

4. Довбня В.Д. Исследование физико-химических процессов электронно-лучевой гарнисажной плавки тугоплавких металлов. *Автореф. дис. ... канд. техн. наук.* Киев. 1970. 21 с.
5. Панасюк Л.С., Ульянов В.Л., Явич В.Е. Электромагнитное перемешивание металла в гарнисаже при электронно-лучевой плавке. *Сб. Литье тугоплавких металлов.* Киев: ИПЛ АН УССР. 1970. С. 76–87.
6. Анікін Ю.П. Удосконалення технології та устаткування для електронно-променевої плавки та лиття жароміцних нікелевих сплавів. *Автореф. дис. ... канд. техн. наук.* Київ. 1998. 19 с.
7. Электронно-лучевая плавка в литейном производстве. Под ред. С.В. Ладохина. Киев: Сталь. 2007. 626 с.
8. Глухенький А.И., Гориславец Ю.М., Бондар А.И., Ладохин С.В., Лапшук Т.В., Дрозд Е.А. Моделирование электронно-лучевой плавки титана в гарнисажных тиглях. *Процессы литья.* 2017. № 2. С. 30–38.
9. Comsol Multiphysics. URL: <https://www.comsol.com/> (дата звернення 10.01.2026).
10. Гориславец Ю.М., Ладохин С.В., Глухенький О.І., Лапшук Т.В., Бондар О.І., Дрозд Е.О. Розрахункове дослідження системи електромагнітного перемішування рідкого металу в гарнісажному тиглі при електронно-променевої плавці. *Технічна електродинаміка.* 2018. № 4. С. 52–59. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.118>

NUMERICAL STUDY OF THE INFLUENCE OF DESIGN FACTORS ON ELECTROMAGNETIC STIRRING OF MOLTEN METAL DURING ELECTRON-BEAM MELTING IN A SKULL CRUCIBLE

O.I. Bondar, O.I. Hlukhenkyi, Yu.M. Goryslavets, V.I. Zaloznyi

Institute of electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteiskiy ave., 56., Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: gai56@ied.org.ua

The structural schemes of skull crucibles with electromagnetic stirring systems (EMSS) that have found practical application in electron-beam skull melting technology are considered. A three-dimensional mathematical model and a methodology for numerical study of the influence of design factors of a sectioned skull crucible and EMSS on the energy and hydrodynamic efficiency of melt stirring has been presented. The mathematical model of electromagnetic processes is formulated in terms of vector magnetic and scalar electric potentials, and hydrodynamic processes are formulated in the form of Navier-Stokes equations using the k-ε turbulence model. The calculations were performed using the finite element method in the Comsol Multiphysics software environment. The comparison of the effectiveness of design factors was carried out using the example of a skull crucible with a total load of titanium charge of about 200 kg. The influence of such factors as the number and size of through-holes in the side wall of the crucible, the material and thickness of this wall, and the number of coils of the stirrer inductor has been investigated. Ref. 10, fig. 7, table.

Keywords: electron-beam melting, skull crucible, electromagnetic stirring system, mathematical modeling of electromagnetic and hydrodynamic processes.

1. Schiller Z., Gaizig W, Panzer Z. Electron-beam technology. M.: Enerhiya. 1980. 528 p. (Rus)
2. Ul'janov V.L. Electron-beam skull melting upon receiving of shaped castings. *Litejnoe proizvodstvo.* 1972. No 10. Pp. 13–15. (Rus)
3. Movchan B.A., Tikhonovskiy A.L., Kurapov Yu.A. Electron beam melting and refining of metals and alloys. Kiev: Naukova Dumka. 1973. 239 p. (Rus)
4. Dovbnya V.D. Study of the physicochemical processes of electron beam skull melting of refractory metals. *Автореф. дис. ... канд. техн. наук.* Киев. 1970. 21 p. (Rus)
5. Panasyuk L.S., Ulyanov V.L., Yavich V.E. Electromagnetic stirring of metal in the skull in electron-beam melting. *Sbornik Lit'e tugoplavkih metallov.* Kiev: IPL AN USSR. 1970. Pp. 76–87. (Rus)
6. Anikin Yu.P. Improvement of technology and equipment for electron beam melting and casting of heat-resistant nickel alloys. *Автореф. дис. ... канд. техн. наук.* Kyiv. 1998. 19 p. (Ukr)
7. Electron beam melting in foundry production. Edited by S.V. Ladokhin. Kiev: Stal'. 2007. 626 pp. (Rus)
8. Glukhenkyi A.I., Goryslavets Yu.M., Bondar A.I., Ladokhin S.V., Lapshuk T.V., Drozd E.A. Modeling of electron beam melting of titanium in skull crucible. *Processy lit'ya.* 2017. No. 2. Pp. 30–38. (Rus)
9. Comsol Multiphysics. URL: Access mode: <https://www.comsol.com/> (access date 10.01.2026).
10. Goryslavets Yu.M., Ladokhin S.V., Glukhenkyi O.I., Lapshuk T.V., Bondar O.I., Drozd E.O. Numerical investigation of the electromagnetic stirring system of liquid metal in skull crucible with electron-beam melting. *Tekhnichna Elektrodynamika.* 2018. No 4. Pp. 52–59. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.118>

Надійшла: 20.01.2026

Прийнята: 17.02.2026

Submitted: 20.01.2026

Accepted: 17.02.2026