

## РОЗРАХУНКОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПЕРЕМІШУВАННЯ РІДКОГО МЕТАЛУ В ГАРНІСАЖНОМУ ТИГЛІ ПРИ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІЙ ПЛАВЦІ

Ю.М. Гориславець<sup>1\*</sup>, докт.техн.наук, С.В. Ладохін<sup>2</sup>, докт.техн.наук, О.І. Глухенький<sup>1\*\*</sup>, канд.техн.наук, Т.В. Лапшук<sup>2</sup>, О.І. Бондар<sup>1</sup>, Є.О. Дрозд<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: [gai56@ied.org.ua](mailto:gai56@ied.org.ua)

<sup>2</sup> – Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України,  
бул. Вернадського, 34/1, Київ, 03142, Україна,

e-mail: [e\\_luch@ptfima.kiev.ua](mailto:e_luch@ptfima.kiev.ua)

*Представлено особливості технології електронно-променевого гарнісажного плавлення тугоплавких металів та сплавів. Сформульовано її переваги та недоліки. Одним з основних напрямків подальшого розвитку визнано підвищення максимального об'єму розплаву в гарнісажному тиглі. Обґрунтовано необхідність проведення математичного моделювання мультифізичних процесів з метою раціонального вибору конструкції гарнісажного тигля з системою електромагнітного перемішування, що забезпечує одержання до 150 кг розплаву титану за одну плавку. Зокрема, розглянуто питання вибору конструкції та режимів роботи системи електромагнітного перемішування з акцентом на особливостях її роботи на початковому етапі накопичення розплаву. Наведено методику чисельного тривимірного моделювання електромагнітного поля і гідродинаміки в системі "індуктор – гарнісажний тигель". Електромагнітна задача сформульована відносно векторного магнітного та скалярного електричного потенціалів, гідродинамічна – у вигляді рівнянь Нав'є-Стокса з використанням низько-рейнольдсової  $k-\varepsilon$  моделі турбулентності. Серед факторів, що визначають ефективність електромагнітного перемішувача, розглядалися: кількість котушок індуктора, кут зсуву фаз між струмами сусідніх котушок, напрям біжучого магнітного поля, частота живлення. Електромагнітна та гідродинамічна задачі розраховувалися для п'яти положень границі між розплавом та гарнісажем, які відповідають послідовним етапам плавки з поступово збільшенням об'ємом розплаву в тиглі. Розглядалися індуктори з двома, трьома та шістьма котушками. При порівнянні варіантів за критерій ефективності перемішування приймалася середня швидкість руху в об'ємі розплаву. Представлено результати розрахункового дослідження, запропоновано алгоритм роботи системи електромагнітного перемішування. Бібл. 9, рис. 8.*

**Ключові слова:** електронно-променево плавлення, гарнісажний тигель, система електромагнітного перемішування, математичне моделювання електромагнітних та гідродинамічних процесів.

**Вступ.** Електронно-променево гарнісажне плавлення (ЕПП) тугоплавких металів є однією з металургійних технологій, в якій практично неможливо обійтися без електромагнітного перемішування (ЕМП). У цій технології джерелом теплоти для нагрівання та плавлення є кінетична енергія пучка електронів, що емітується електронною гарматою та перетворюється у тепло при гальмуванні електронів у поверхневому шарі металу. При плавленні відбувається накопичення розплаву в гарнісажному тиглі з подальшим його зливанням і заповненням ливарної форми.

За відсутності електромагнітного перемішування відносний об'єм розплаву, що може бути досягнутий у тиглі, є вкрай незначним. При порівняно невеликій теплопровідності нерухомого розплаву він обмежується перегрівом поверхні, що супроводжується значною втратою теплоти за рахунок випромінювання та випаровування металу. Електромагнітне перемішування завдяки масопереносу та високій турбулентній теплопровідності розплаву при русі, яка може перевищувати молекулярну в десятки та сотні разів, дозволяє значно інтенсифікувати теплообмін. Це призводить до зменшення перегрівання поверхні та відповідно втрат із поверхні, сприяє підвищенню об'єму розплаву в тиглі, забезпечує однорідність його хімічного складу та покращує питомі енергетичні показники процесу плавлення.

Слід зазначити, що технологія електронно-променевого гарнісажного плавлення з застосуванням електромагнітного перемішування була започаткована вітчизняними фахівцями Фізико-

технологічного інституту металів та сплавів НАН України (до 1996 р. – Інститут проблем лиття) на початку 70-х років ХХ ст. [5]. Завдяки високому вакууму, великій густині енергії в електронному промені ця технологія дозволяє максимально рафінувати розплав та одержати метал найвищої якості. Намагання отримати подібну якість іншими більш продуктивними та економічними методами спеціальної електromеталургії – електрошлаковим та вакуумно-дуговим переплавлінням, плазмово-дуговим та вакуумно-індукційним плавлінням, поки що не принесли очікуваних результатів.

Вважається [7], що найближчим часом буде зберігатися тенденція збільшення частки литих виробів замість тих, що виробляються шляхом деформації чи механічної обробки. Тому технологія ЕПП з ЕМП, враховуючи високу якість відливок, яку вона забезпечує, буде посідати все більш значне місце в металургії тугоплавких та хімічно активних металів. У той самий час недоліками ЕПП є складність отримання в гарнісажних тиглях достатньо великих об'ємів розплаву, підвищені енергетичні затрати, висока вартість технологічного процесу та обладнання. Зокрема, досягнутий на сьогодні максимальний об'єм розплаву титану в гарнісажному тиглі при електронно-променевої плавці складає близько 50 кг, при тому що потреби ливарного виробництва вимагають підвищення цього показника до 150–250 кг. Отже, усунення зазначених недоліків, що стримують подальше поширення технології, є вкрай актуальною науково-прикладною задачею.

Зазвичай [7], система електромагнітного перемішування (СЕМП), що використовується при ЕПП, створює біжуче магнітне поле та конструктивно складається з двох або трьох коаксіальних котушок, розміщених у пазах П (Ш)-подібних магнітопроводів, які охоплюють гарнісажний тигель зі сторони бокових стінок. У першому випадку кут зсуву фаз між електричними напругами, що живлять сусідні котушки, складає 90 ел. град., у другому – переважно 60 ел. град. Електроживлення котушок, як правило, здійснюється струмами промислової частоти при зниженій напрузі (~ 20 В) і високій силі струму (~ 1000 А).

Найбільш поширеною конструкцією гарнісажного тигля нині є відлита з міді циліндрична ємність, у стінках якої виконано канали для охолоджуючої води і поздовжні розрізи напроти місць розміщення котушок СЕМП. Така конструкція забезпечує інтенсивне охолодження розплаву, що необхідно для формування гарнісажу, який захищає розплав від забруднення з боку тигля, і є майже прозорою для проникнення електромагнітного поля в розплав, що необхідно для забезпечення його ефективного перемішування.

На даний час не можна вважати остаточно встановленим вплив різних чинників на перемішування в гарнісажному тиглі та його зв'язок з тепловим станом розплаву в тиглі. Високий вакуум, наявність розплавленого (агресивного) металу з високою температурою обмежує можливість використання відомих методів та засобів експериментальних досліджень на натурних об'єктах. Використання фізичного моделювання в багатьох випадках не може дати достовірних результатів через неможливість дотримання і виконання умов подібності. Тому практично єдиним реальним шляхом таких досліджень є математичне моделювання. Виконане раніше [4] чисельне моделювання електромагнітних та гідродинамічних процесів при електронно-променевому гарнісажному плавленні цирконію мало дещо обмежений характер в основному через недостатній на той час рівень розвитку обчислювальної техніки. Зокрема, задачі розглядалися у двовимірній осесиметричній постановці, наявність гарнісажу не враховувалася.

Раніше нами в роботі [2] було запропоновано та апробовано на тестовій задачі математичну модель для розрахункового дослідження електронно-променевого плавлення в гарнісажному тиглі, яка шляхом сумісного розв'язання стаціонарних електромагнітної, гідродинамічної і теплової задач дозволяла вийти при заданому режимі роботи електромагнітного перемішувача на відповідність між потужністю електронно-променевого нагрівання і усталеним положенням границі між розплавом та гарнісажем у тиглі.

У відповідності до розробленої методики у роботі [3] виконано розрахункове обґрунтування раціонального вибору основних розмірів гарнісажного тигля, що забезпечило отримання до 150 кг розплаву титану, в тому числі з донним його зливанням. Показано, що при виборі геометричних розмірів тигля в першу чергу необхідно виключити можливість бокового промивання гарнісажу, оскільки при цьому відбувається різка інтенсифікація локальної тепловіддачі, що призводить до підвищених енергозатрат при плавленні. Виходячи з цього, відношення висоти завантаження розплаву титану в тиглі до його діаметра не повинно перевищувати значень 0,5–0,6, а рух розплаву на поверхні при цьому необхідно спрямовувати від стінок до центру тигля. На рис. 1 показано запропоновану в роботі [3] конструктивну схему гарнісажного тигля для плавки титану з СЕМП, що має дві котушки. Вказані на рисунку

габаритні розміри тигля із співвідношенням висоти завантаження титану до внутрішнього діаметра тигля близько 0,5 у відповідності до виконаних розрахунків забезпечують при ЕППП можливість зливання близько 150 кг розплаву титану через отвір у дні тигля без промивання бічного гарнісажу. Загальна маса завантаження титану при цьому становить 187 кг. На цьому рисунку (зліва) горизонтальними штриховими лініями позначено метал, що знаходиться у рідкому стані (розплавлений метал), а точками – у твердому (гарнісаж). Криві 1–5 представляють границі гарнісажу на різних етапах (стадіях) процесу плавлення.

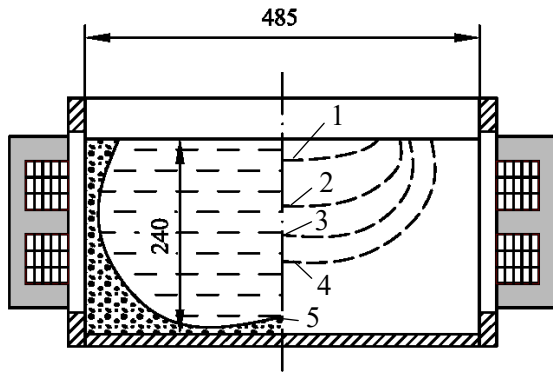


Рис. 1

Мета цієї роботи – дослідження конструкції та визначення режимів роботи системи електромагнітного перемішування рідкого металу для зазначеного тигля з урахуванням особливостей її роботи на початковому етапі накопичення розплаву.

Мультифізичне моделювання системи електромагнітного перемішування. Електромагнітний перемішувач разом із гарнісажним тиглем та його завантаженням утворюють складну електромагнітну систему. Незважаючи на осесиметричну форму електромагнітного перемішувача і гарнісажного тигля, наявність у боковій стінці останнього прорізів зумовлює суто тривимірний характер розтікання вихрових струмів у секціях тигля і відповідно потребує тривимірного моделювання електромагнітних процесів.

Диференційні рівняння для розрахунку електромагнітного поля в такій системі формувалися в квазістационарному наближенні (струм зміщення приймається рівним нулю  $\partial D / \partial t = 0$ ) відносно комплексних амплітуд векторного магнітного  $\dot{\mathbf{A}}$  та скалярного електричного  $\dot{\phi}$  потенціалів. У загальному випадку з урахуванням швидкості руху  $\mathbf{u}$  рідкого металу вони мають вигляд

$$\text{rot}(\mu^{-1}\text{rot}\dot{\mathbf{A}}) + j\omega\sigma\dot{\mathbf{A}} - \sigma\mathbf{u} \times (\text{rot}\dot{\mathbf{A}}) + \sigma \text{grad}\dot{\phi} = \dot{\mathbf{J}}_e \quad (1)$$

$$\text{div}\dot{\mathbf{J}} = 0, \quad \text{div}\dot{\mathbf{A}} = 0, \quad (2, 3)$$

де  $\mu$  – магнітна проникність,  $\sigma$  – питома електропровідність,  $\omega$  – кутова частота,  $\dot{\mathbf{J}}$  і  $\dot{\mathbf{J}}_e$  – відповідно комплексні амплітуди густини струму провідності та зовнішнього струму.

При розрахунках з метою спрощення нехтувалося наявністю точкових електричних контактів між тиглем та гарнісажем, тобто гарнісаж та тигель вважалися електроізолюваними один від одного. Як і раніше [3], розглядався тигель із кількістю розрізів бокової стінки  $n = 45$ , питома електропровідність твердого та рідкого титану приймалася відповідно  $6,67 \cdot 10^5$  та  $6 \cdot 10^5$  См/м. Для зменшення розрахункового часу використовувалася гранична умова періодичності, яка дозволяє обмежитися розглядом сектора, що становить  $1/n$  об'єму системи. На рис. 2 показано такий сектор гарнісажного секціонованого тигля з титановим завантаженням та індуктором перемішувача з трьома котушками. Виносками **A** та **B** на рисунку показано отримані в результаті розрахунків структура течії розплавленого титану на початковому етапі плавки (виноска **A**) та розподіл вихрових струмів у стінках тигля (виноска **B**).

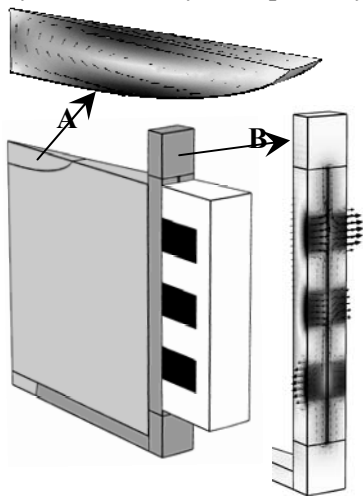


Рис. 2

Швидкість рідкого металу визначалася шляхом чисельного рішення рівнянь Нав'є-Стокса

$$\rho_m(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot (\eta_{\text{ef}} \nabla \mathbf{u}) + \mathbf{f}; \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (5)$$

де  $\rho_m$  – густина рідкого металу,  $p$  – тиск,  $\eta_{\text{ef}}$  – коефіцієнт ефективної динамічної в'язкості металу,  $\mathbf{f}$  – об'ємна електромагнітна сила в рідкому металі, обчислена за результатами розрахунку електромагнітної задачі.

Гідродинамічна задача розраховувалася для стаціонарної турбулентної течії з використанням низькорейнольдсової  $k-\epsilon$  моделі турбулентності (Low Reynolds Number  $k-\epsilon$ ) [8]. На відміну від стандартної  $k-\epsilon$  моделі турбулентності в цій моделі не використовуються наближені пристінкові функції і її застосування розповсюджується

на всю область течії. Обрана модель дає більш точний опис руху рідини в пристінковій зоні, при цьому теплові потоки можуть бути змодельовані з підвищеною точністю в порівнянні зі звичайною  $k-\epsilon$  моделлю турбулентності. Однак для її реалізації необхідна більш густа розрахункова сітка, причому не тільки в пристінковій області.

Граничні умови для розрахункової області турбулентної течії були такими: на верхній відкритій поверхні – умова ковзання, на суміжних границях повторюваної геометрії – умови періодичності, на границі рідкого металу та гарнісажу – нульова швидкість. Меніск на вільній поверхні не враховувався. Рух металу на поверхні в напрямку від центру тигля до периферії отримав умовну назву прямого, а від периферії до центру – зворотного.

Серед факторів (змінних параметрів), що визначають ефективність електромагнітного перемішувача, розглядалися: кількість котушок індуктора, кут зсуву фаз між струмами сусідніх котушок, напрям біжучого магнітного поля. При порівнянні варіантів за критерій ефективності перемішування приймалася середня швидкість руху в об'ємі розплаву, яка визначалася у відповідності до виразу

$$u_c = \frac{1}{V_M V} \int \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} dv, \quad (6)$$

де  $u, v, w$  – просторові складові швидкості рідкого металу по координатам  $x, y, z$  відповідно,  $V_M$  – об'єм рідкого титану.

**Дослідження ефективності електромагнітного перемішувача на початковому етапі його роботи.** Початковий етап роботи перемішувача є одним з найбільш складних та відповідальних у процесі електронно-променевого гарнісажного плавлення. З одного боку магнітне поле індуктора додатково екранується від проникнення в розплав максимальною товщиною гарнісажу, з іншого – мала глибина ванни розплаву не сприяє створенню інтенсивного вихрового руху. Зі збільшенням об'єму гарнісажної плавки, що супроводжується зростанням габаритів тигля, негативний вплив цих обставин на інтенсивність перемішування на початковому етапі буде тільки посилюватися. Тому необхідність вибору для тиглів підвищеної ємності раціональних режимів роботи перемішувача для цього етапу не викликає сумніву.

Як відомо, вмикання СЕМП відбувається після наплавлення невеликого об'єму розплаву, яке зазвичай здійснюється при інтенсивному скануванні електронного променя по поверхні, що нагрівається [6]. Це забезпечує рівномірне нагрівання осесиметричної поверхні з діаметром, який складає приблизно половину внутрішнього діаметра гарнісажного тигля. Безпосередньо перед вмиканням СЕМП електронний промінь гармати фокусується по осі тигля. При цьому, виходячи з досвіду, діаметр фокусної плями на поверхні розплаву не повинен перевищувати 10 % від внутрішнього діаметра тигля. В іншому випадку за рахунок взаємодії периферійних електронів променя з магнітним полем перемішувача можливе їх відхилення на бокову стінку тигля і навіть за його межі. Такий режим електронно-променевого нагрівання зберігається до кінця плавлення. Очевидно, що при слабкій інтенсивності руху рідкого металу сфокусоване підведення теплової енергії неминуче призводить до перегрівання центральної зони розплаву та підвищених втрат металу з поверхні.

Електромагнітна та гідродинамічна задачі на початковому етапі плавки розраховувалися для чотирьох положень границі між розплавом та гарнісажем у тиглі, які відповідають послідовним стадіям ЕППП із поступово збільшеним об'ємом розплаву у тиглі. Прийняті при розрахунках границі гарнісажу на цьому етапі показано на правій половині рис. 1 штриховими лініями. Крива 1 визначає об'єм розплаву при початковому вмиканні перемішувача. Діаметр ванни розплаву при цьому становить 250 мм, максимальна глибина складає 26 мм, її об'єм становить близько 2% від загального завантаження титану ( $k_p = 0,02$ ). Крива 2 відповідає 10% розплаву ( $k_p=0,10$ ), крива 3 – 18% ( $k_p=0,18$ ), крива 4 – 30% ( $k_p=0,30$ ). Співвідношення розмірів та форми рідкої ванни задавалися, виходячи з набутого раніше досвіду ведення ЕППП.

Для зазначених стадій накопичення розплаву досліджувався вплив на ефективність перемішувача кута фазового зсуву  $\Delta\phi_i$  між струмами сусідніх котушок. При цьому розглядалися та порівнювалися між собою три типи індукторів біжучого магнітного поля: з двома, трьома та шістьма котушками, між якими сумарні ампер-витки у 30 кА розподілялися рівномірно. Результати цих досліджень у вигляді залежностей середньої швидкості розплаву  $u_c$  від кута  $\Delta\phi_i$  представлено на рис. 3, *a-г*. На рисунках суцільними кривими представлено результати розрахунку для перемішувача з двома котушками, штриховими – з трьома, штрих-пунктирними – з шістьма.

При початковому вмиканні перемішувача (рис. 3, *a*) при  $k_p = 0,02$  незалежно від типу індуктора найбільша інтенсивність вихрового руху зі значенням  $u_c = 25$  мм/с досягається при нульовому куті фазового зсуву  $\Delta\varphi_i$  між котушками, тобто при пульсуючому магнітному полі. Структура цього руху представлена на виносці А рис. 2, його напрям є прямим. Така структура течії переважно зберігається і при ненульових значеннях кута  $\Delta\varphi_i$ , як при додатних, коли створюється пряме біжуче магнітне поле, так і при від'ємних, коли створюється зворотне поле. І лише для індуктора з шістьма котушками при кутах  $\Delta\varphi_i = \pm 90$  ел. град. відбувається зміна руху на зворотний, однак інтенсивність такого руху є вкрай низькою. Зазначимо, що інтенсивність руху при пульсуючому магнітному полі перевищує приблизно на 30 % інтенсивність, що досягається при стандартних кутах фазового зсуву в 90 та 60 ел. град. для індукторів з двома та трьома котушками відповідно.

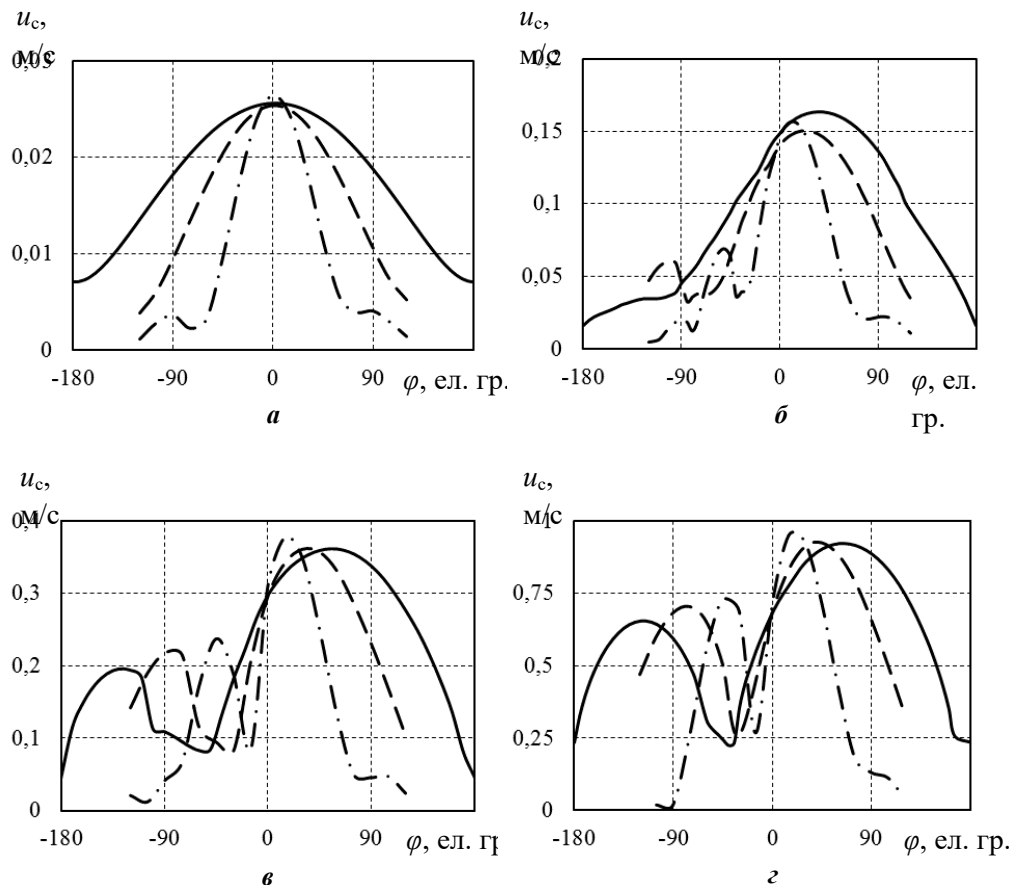


Рис. 3

Слід також зазначити, що прямий вихровий рух на початковому етапі перемішування може суттєво підсилюватися за рахунок тангенціальних сил поверхневого натягу, які виникають при різній температурі поверхні розплаву (ефект Марангоні [9]). У цій роботі цей ефект не враховувався.

Зі збільшенням об'єму накопиченого розплаву до 10 % ( $k_p = 0,10$ , рис. 3, *б*) за рахунок зменшення екрануючого впливу гарнісажу та гідродинамічного опору вихровому руху інтенсивність руху останнього суттєво підвищується. Максимальні значення середньої швидкості  $u_c$  для всіх трьох індукторів становлять близько 0,16 м/с, і ці значення досягаються вже при незначних додатних кутах  $\Delta\varphi_i = 10, 20$  і 30 ел. град. відповідно для індукторів з шістьма, трьома та двома котушками. При пульсуючому магнітному полі індукторів ( $\Delta\varphi_i = 0$ ) інтенсивність руху зменшується незначно – у межах 10 % від максимальних значень. У такому об'ємі розплаву зворотна течія вже може створюватися перемішувачами з трьома та шістьма котушками. Максимальна інтенсивність такого руху досягається при від'ємних кутах  $\Delta\varphi_i = -100$  та  $-50$  ел. град. відповідно. Однак інтенсивність зворотного руху ще відносно мала.

При досягненні частки об'єму розплавленого титану в 20–30 % від його загального завантаження в тиглі (рис. 3, в, з) стає вже можливим створення достатньо інтенсивного зворотного руху, максимальні значення середньої швидкості якого сягають 60–70 % від аналогічних значень прямого руху.

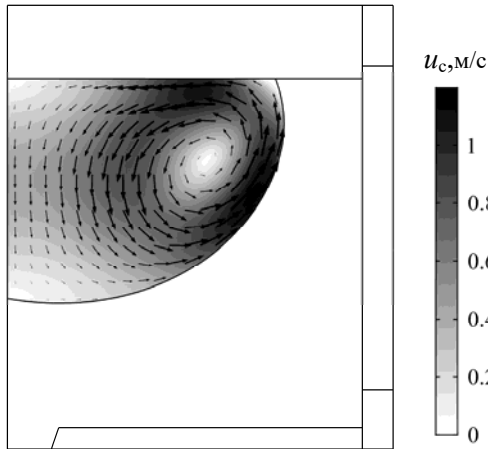


Рис. 4

Зазначимо, що зворотний вихровий рух, типову структуру якого показано на рис. 4, має технологічні переваги по відношенню до прямого при ЕППП, оскільки теплота поверхневого нагрівання відразу переноситься у глибину титанового завантаження, що сприяє, в першу чергу, розмиванню донного гарнісажу. Це особливо важливо для технології ЕППП із зливанням розплаву через отвір у дні гарнісажного тигля. При прямому вихровому русі в цьому випадку будуть мати місце підвищені втрати з перегрітої поверхні розплаву і переважне розмивання бокового гарнісажу, що може призвести до його повного розмивання та високих втрат тепла через місця безпосереднього контакту рідкого металу з водоохолоджуваним мідним тиглем.

Інтенсивність прямого руху при пульсуючому магнітному полі зі збільшенням об'єму рідкої фази завантаження поступово знижується відносно максимальної інтенсивності руху при прямому біжучому полі, але залишається вищою, ніж при зворотному біжучому полі. Загалом у процесі накопичення розплаву спостерігається стрімке зростання інтенсивності руху розплаву.

Залежність максимальних значень  $u_c$  при прямому русі від відносного об'єму розплаву показано на рис. 5.

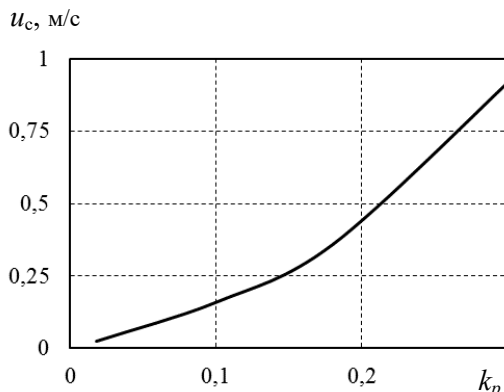


Рис. 5

Значення кутів зсуву фаз  $\Delta\varphi_i$  при прямому русі, за яких досягаються максимальні значення, у випадку  $k_p=0,30$  становлять 15, 45 та 65 ел. град. відповідно для індукторів з шістьма, трьома та двома котушками. Аналогічно, для зворотного руху маємо -45, -75 та -115 ел. град. Тобто в процесі накопичення рідкого металу в гарнісажному тиглі для забезпечення максимальної ефективності прямого та зворотного вихрових рухів необхідно забезпечувати різні за абсолютною величиною значення кута фазового зсуву  $\Delta\varphi_i$ .

Порівнюючи гідродинамічну ефективність перемішувачів у залежності від числа котушок індуктора, можна відзначити незначне її зростання (близько 10 %) зі збільшенням їхньої кількості. Водночас при цьому підвищується вимога щодо точності забезпечення необхідного значення кута  $\Delta\varphi_i$ , оскільки крутизна залежностей швидкості  $u_c$  від кута  $\Delta\varphi_i$  біля екстремумів значно збільшується.

Отже, проведені дослідження для гарнісажного тигля, що забезпечує отримання до 150 кг розплаву титану, дозволяють незалежно від обраного типу індуктора запропонувати наступний алгоритм роботи СЕМП. Плавка металу починається в режимі пульсуючого магнітного поля, яке створюється шляхом однофазного живлення всіх котушок перемішувача, а потім після наплавлення та накопичення близько 20–30 % рідкого металу система перемикається на режим зворотного біжучого магнітного поля.

**Структура руху розплаву наприкінці циклу ЕППП.** Процес плавлення завершується при досягненні об'єму розплаву, який становить 70–80% від повного завантаження тигля. Зливання розплаву здійснюється у відцентрову ливарну форму через зливний носок шляхом нахилу тигля або через отвір у дні тигля після розмивання донного гарнісажу. Гарнісаж, що залишився, повторно використовується в наступних плавках, причому на практиці найбільш доцільно це виявилось у разі плавки сплавів титану і цирконію [1].

На рис. 6 показано структуру руху розплаву в гарнісажному тиглі з  $k_p=0,70$  при роботі електромагнітного перемішувача з двома котушками з кутом зсуву фаз між струмами  $\Delta\varphi_i = -120$  ел. град. Границя гарнісажу для цього випадку позначена кривою 5 на рис. 1. Результати, отримані з використанням низькорейнольдсової  $k-\varepsilon$  моделі турбулентності, представлено на рис. 6, а, а за допомогою

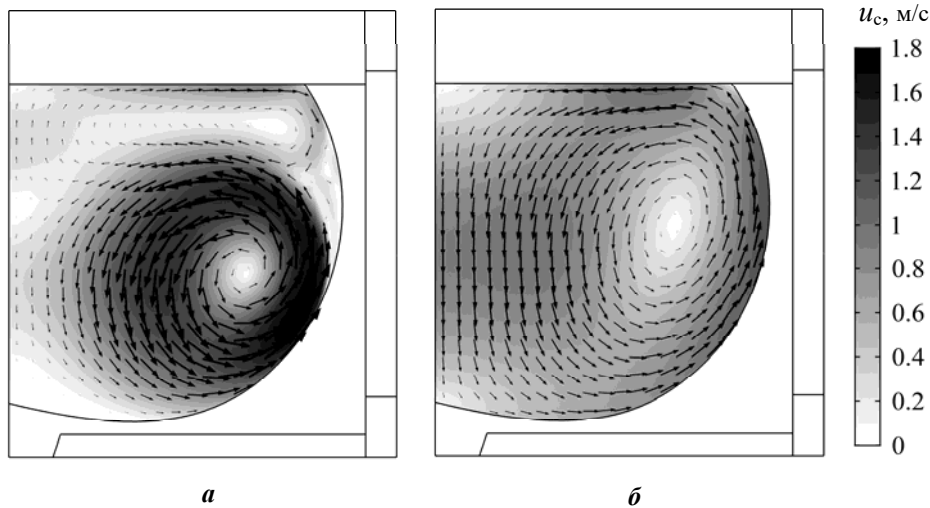


Рис. 6

стандартної  $k-\varepsilon$  моделі турбулентності – на рис. 6, б. Отримані структури руху суттєво відрізняються одна від одної, що начисто демонструє необхідність використання більш точної (за даними [8]) низькорейнольдсової  $k-\varepsilon$  моделі турбулентності при аналізі гідродинамічних процесів у процесі ЕПГП з електромагнітним перемішуванням.

Як видно з рис. 6, а, зі збільшенням об'єму розплаву при зворотному

біжучому полі стає можливим формування окрім основного вихрового руху зворотного напрямку ще й малоінтенсивного вихрового руху прямого напрямку в поверхневому шарі розплаву. І тому на основі якісного аналізу вже не можна однозначно стверджувати про переваги саме зворотного біжучого поля. Це необхідно підтверджувати через залучення теплових розрахунків.

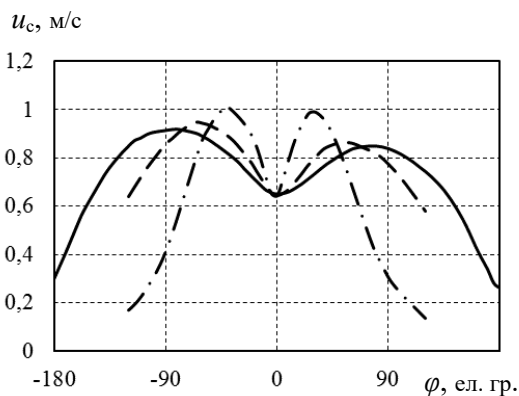


Рис. 7

Залежність середньої швидкості розплаву титану  $u_c$  від кута  $\Delta\varphi_i$  при  $k_p=0,70$  показано на рис. 7. Позначення кривих на ньому таке саме, як і на рис. 3. Загальний рівень середньої швидкості розплаву практично не змінився по відношенню до випадку з  $k_p = 0,30$ , що може бути пояснено зміною структури руху, а саме – формуванням додаткових (вторинних) вихрових потоків (течій). У той саме час інтенсивність руху при зворотному магнітному полі стала більшою, ніж при прямому. Раніше (рис. 3) було навпаки. Значення кутів зсуву фаз між струмами в котушках, за яких досягається максимальна середня швидкість при прямому та зворотному біжучих магнітних полях, практично зрівнялися за абсолютними значеннями. Тобто в процесі накопичення розплаву відбувається поступова зміна кутів  $\Delta\varphi_i$ , за яких досягаються максимальні значення середньої швидкості.

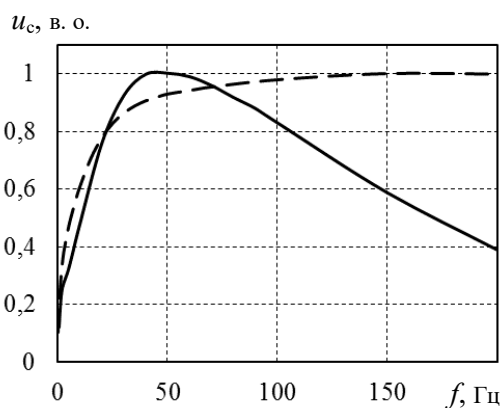


Рис. 8

**Вплив частоти живлення на ефективність електромагнітного перемішування.** Розрахункова оцінка впливу частоти живлення на ефективність електромагнітного перемішування в гарнісажному тиглі виконувалася для двох крайніх розглянутих положень границі гарнісажу, тобто для  $k_p=0,02$  і  $k_p=0,70$ . Розглядався перемішувач з трьома котушками, кут зсуву фаз між струмами котушок  $\Delta\varphi_i$  складав 60 ел. град. (пряме біжуче магнітне поле).

На рис. 8 показано залежності середньої швидкості  $u_c$  від частоти  $f$  для  $k_p=0,02$  (суцільна лінія) та  $k_p=0,70$  (пунктирна лінія). Для зручності графічного сприйняття отриманих результатів значення швидкостей на цьому рисунку представлено у відносних одиницях (відносно максимальних значень  $u_c$  для кожного випадку). Як видно з

представлених на рисунку кривих, промислова частота живлення (50 Гц) є близькою до оптимальної у випадку електромагнітного перемішування титану у гарнісажному тиглі.

Проведені дослідження дозволяють дійти наступних **висновків**.

1. При початковому вмиканні електромагнітного перемішувача при плавленні титану в гарнісажному тиглі електронно-променевої печі найбільша інтенсивність руху розплаву може бути досягнута при однофазному живленні всіх котушок індуктора, тобто при створенні індуктором перемішувача пульсуючого магнітного поля.

2. Зі збільшенням об'єму розплаву в гарнісажному тиглі залежність інтенсивності електромагнітного перемішування від кута фазового зсуву між струмами котушок індуктора має екстремуми при прямому та зворотному напрямках біжучого магнітного поля, при цьому інтенсивність прямого руху є більш високою.

3. Для забезпечення максимальної ефективності прямого та зворотного вихрових рухів необхідно забезпечувати різні за абсолютною величиною значення кута фазового зсуву струмів сусідніх котушок перемішувача. В процесі накопичення розплаву відбувається поступова зміна цих кутів у сторону зближення їхніх абсолютних значень.

4. При досягненні частки об'єму розплавленого титану до 30 % від його загального завантаження в тиглі стає можливим створення достатньо інтенсивного зворотного руху. При цьому максимальні значення середньої швидкості зворотного руху сягають більше 70 % від аналогічних значень прямого руху. Наприкінці циклу плавки максимальна інтенсивність руху при зворотному магнітному полі стає вже більшою, ніж при прямому.

5. Зі збільшенням кількості котушок індуктора з двох до шести гідродинамічна ефективність електромагнітних перемішувачів незначно зростає (в межах 10 %). У той самий час при цьому підвищуються вимоги до точності забезпечення необхідного кута фазового зсуву струмів, оскільки крутизна залежностей швидкості  $u_c$  від кута  $\Delta\varphi_i$  біля екстремумів значно збільшується.

6. Підтверджено, що промислова частота електроживлення перемішувача при електронно-променевої плавці титану в гарнісажному тиглі є достатньо близькою до оптимальної.

1. Гладков А.С., Левицкий Н.И., Чернявский В.Б. Особенности выплавки сложнолегированных сплавов на основе титана и циркония в электронно-лучевых литейных гарнисажных установках. Тр. Междунар. Конф. *Ti-2008 в СНГ*, Санкт-Петербург, 18-21 мая 2008. С. 50-53.

2. 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.

3. Глухенький А.И., Гориславец Ю.М., Бондар А.И., Ладохин С.В., Лапшук Т.В., Дрозд Е.А. Выбор конструкции гарнисажных тиглей повышенной емкости для электронно-лучевой плавки титана. *Процессы литья*. 2017. № 4. С. 58-65.

4. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Ладохин С.В. Анализ МГД-процессов при электромагнитном перемешивании расплавленного металла в секционном токопроводящем кристаллизаторе. Proc. 3<sup>rd</sup> Intern. Conf. *Inconventional Electromechanical and Electrical System*, Alushta, the Crimea, Ukraine, September 19-21, 1997. Pp. 1193-1200.

5. Ульянов В.Л. Электронно-лучевая гарнисажная плавка при получении фасонных отливок. *Литейное производство*. 1972. № 10. С. 13-15.

6. Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З. Электронно-лучевая технология. М.: Энергия, 1980. 528 с.

7. Электронно-лучевая плавка в литейном производстве. К.: Сталь, 2007. 626 с.

8. Frei W. Which Turbulence Model Should I Choose for My CFD Application? URL: <https://www.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application> (Accessed at 28.09.2017)

9. Westerberg K.W., Meier T.C., McClelland M.A. Analysis of the E-Beam Evaporation of Titanium and Ti-6Al-4V. Proc. Conf. *Electron Beam Melting and Refining – State of the Art 1997*, Bakish Materials Corp., Englewood, NJ. Pp. 208-221.

УДК 621.74:537.84

## РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ГАРНИСАЖНОМ ТИГЛЕ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКЕ

Ю.М. Гориславец<sup>1</sup>, докт.техн.наук, С.В. Ладохин<sup>2</sup>, докт.техн.наук, А.И. Глухенький<sup>1</sup>, канд.техн.наук, Т.В. Лапшук<sup>2</sup>, А.И. Бондар<sup>1</sup>, Е.А. Дрозд<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина,

e-mail: [gai56@ied.org.ua](mailto:gai56@ied.org.ua)

<sup>2</sup> – Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины,  
бул. Вернадского, 34/1, Киев, 03142, Украина,

e-mail: [e\\_luch@ptima.kiev.ua](mailto:e_luch@ptima.kiev.ua)

Приведена краткая информация по истории и особенностям технологии электронно-лучевой гарнисажной плавки тугоплавких металлов и сплавов. Сформулированы ее преимущества и недостатки. Одним из основных направлений дальнейшего развития признано повышение максимального объема расплава в гарнисажном тигле. Обоснована необходимость проведения математического моделирования мультифизических процессов с целью рационального выбора конструкции гарнисажного тигля с системой электромагнитного перемешивания, которая обеспечивает получение до



150 кг расплава титана за одну плавку. В частности, рассмотрены вопросы выбора конструкции и режимов работы системы электромагнитного перемешивания с акцентом на особенностях ее работы на начальном этапе накопления расплава. Приведена методика численного трехмерного моделирования электромагнитного поля и гидродинамики в системе "индуктор - гарнисажный тигель". Электромагнитная задача сформулирована относительно векторного магнитного и скалярного электрического потенциалов, гидродинамическая – в виде уравнений Навье-Стокса с использованием низкорейнольдской  $k-\epsilon$  модели турбулентности. Среди факторов, определяющих эффективность электромагнитного перемешивателя, рассматривались: количество катушек индуктора, угол сдвига фаз между токами соседних катушек, направление бегущего магнитного поля, частота питания. Электромагнитная и гидродинамическая задачи рассчитывались для пяти положений границы между расплавом и гарнисажем, которые соответствуют последовательным этапам плавки с постепенно увеличенным объемом расплава в тигле. Рассматривались индукторы с двумя, тремя и шестью катушками. При сравнении вариантов в качестве критерия эффективности перемешивания принималась средняя скорость движения в объеме расплава. Представлены результаты расчетного исследования, предложен алгоритм работы системы электромагнитного перемешивания. Библ. 9, рис. 8.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая плавка, гарнисажный тигель, система электромагнитного перемешивания, математическое моделирование электромагнитных и гидродинамических процессов.

## NUMERICAL INVESTIGATION OF THE ELECTROMAGNETIC STIRRING SYSTEM OF LIQUID METAL IN SKULL CRUCIBLE WITH ELECTRON-BEAM MELTING

Y.M. Goryslavets<sup>1</sup>, S.V. Ladokhin<sup>2</sup>, O.I. Glukhenkyi<sup>1</sup>, T.V. Lapshuk<sup>2</sup>, O.I. Bondar<sup>1</sup>, E.O. Drozd<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Institute of Elektrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy av., 56, Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: [gai56@ied.org.ua](mailto:gai56@ied.org.ua)

<sup>2</sup> – Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Vernadskyi blvd., 34/1, Kyiv, 03142, Ukraine,

e-mail: [e\\_luch@ptima.kiev.ua](mailto:e_luch@ptima.kiev.ua)

The brief information on the history and peculiarities of electron-beam skull melting technology of refractory metals and alloys is given. Its advantages and disadvantages are formulated. One of the main directions of further development is the maximum amount of melt in the skull crucible increasing. The necessity of mathematical modeling of multifunctional processes for the rational choice of the design of a skull crucible with electromagnetic stirring system, which provides obtaining up to 150 kg of titanium melt in one melting process, is substantiated. In particular, the question of choosing the design and operating modes of the electromagnetic stirring system with an emphasis on the peculiarities of its work at the initial stage of the accumulation of the melt are considered. The methodology of numerical three-dimensional modeling of the electromagnetic field and hydrodynamics in the system "inductor – skull crucible" is given. An electromagnetic problem is formulated relative to the vector magnetic and scalar electric potentials, hydrodynamic – in the form of Navier-Stokes equations using the Low Reynolds  $k-\epsilon$  turbulence model. Among the factors that determine the effectiveness of an electromagnetic stirrer we considered: the number of coils of the inductor, the angle of phase shift between the currents of the coils, the direction of the travelling magnetic field, the frequency of the power supply. The electromagnetic and hydrodynamic problems were calculated for the five positions of the interface between melt and skull which correspond to the sequential stages of the melting process with the gradually increased melt volume in the crucible. The inductors with two, three, and six coils were considered. When comparing variants, the average speed of motion in the melt volume was taken as the criterion for the stirring efficiency. The results of computational research are presented, the algorithm of electromagnetic stirring system operation is proposed. References 9, figures 8.

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

1. Gladkov A.S., Levitsky N.I., Chernyavsky V.B. Features of melting of complex alloys on the basis of titanium and zirconium in electron-beam casting skull installations. Proc. Intern. Conf. *Ti-2008 in the CIS*, St. Petersburg, May 18-21, 2008. Pp. 50-53. (Rus)

2. Glukhenkyi A.I., Goryslavets Y.M., Bondar A.I., Ladokhin S.V., Lapshuk T.V., Drozd E.A. The modeling of electron-beam melting of titanium in skull crucible. *Protsesy littia*. 2017. No 2. Pp. 30-38. (Rus)

3. Glukhenkyi A.I., Goryslavets Y.M., Bondar A.I., Ladokhin S.V., Lapshuk T.V., Drozd E.A. Design of skull crucibles of high-capacity for electron-beam melting of titanium. *Protsesy littia*. 2017. No 4. Pp. 58-65. (Rus)

4. Podoltsev A.D., Kucheriava I.N., Ladokhin S.V. Analysis of MHD processes during electromagnetic stirring of molten metal in a sectional conductive crystallizer. Proc. 3<sup>rd</sup> Intern. Conf. *Inconventional Electromechanical and Electrical System*, Alushta, the Crimea, Ukraine, September 19-21, 1997. Pp. 1193-1200. (Rus)

5. Ulianov V.L. Electron-beam skull melting upon receiving of shaped castings. *Liteinoe proizvodstvo*. 1972. No 10. Pp. 13-15. (Rus)

6. Schiller Z., Gaizig W., Panzer Z. Electron-beam technology. Moskva: Enerhiia, 1980. 528 p. (Rus)

7. Electron-beam melting in foundry. Kiev: Stal, 2007. 626 p. (Rus)

8. Frei W. Which Turbulence Model Should I Choose for My CFD Application? URL: <https://www.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application> (Accessed at 28.09.2017)

9. Westerberg K.W., Meier T.C., McClelland M.A. Analysis of the E-Beam Evaporation of Titanium and Ti-6Al-4V. Proc. Conf. *Electron Beam Melting and Refining – State of the Art 1997*, Bakish Materials Corp., Englewood, NJ. P. 208-221.

Надійшла 01.11.2017

Остаточний варіант 04.12.2017