

## ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МУЛЬТИФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІЙ ГАРНІСАЖНІЙ ПЛАВЦІ ТИТАНУ

**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@ptima.kiev.ua](mailto:e_luch@ptima.kiev.ua)

*З метою удосконалення конструкції гарнісажного тигля з системою електромагнітного перемішування рідкого металу, підвищення енергоефективності та визначення раціональних технологічних режимів електронно-променевої гарнісажної плавки розроблено тривимірну математичну модель для розрахункового дослідження електромагнітних, гідродинамічних і теплових процесів при плавці. Для спрощення зазначені процеси розглядалися для сталого стану. Досліджено вплив співвідношення основних розмірів тигля та напрямку руху розплаву при електромагнітному перемішуванні на ефективність процесу плавки. Бібл. 3, рис. 3.*

**Ключові слова:** електронно-променева гарнісажна плавка, гарнісажний тигель, система електромагнітного перемішування, математичне моделювання, електромагнітні, гідродинамічні та теплові процеси.

У електронно-променевих ливарних установках використовуються гарнісажні тиглі з системою електромагнітного перемішування (СЕМП) рідкого металу, застосування яких дає змогу отримувати литі заготовки і вироби з тугоплавких металів і сплавів, у тому числі з титану. Технологічна схема електронно-променевої гарнісажної плавки (ЕППП) із зливанням розплаву в ливарну форму через отвір у дні тигля показана на рис. 1. Конструктивно тигель представляє собою відлиту з міді циліндричну ємність, у стінках якої виконано канали для охолоджуючої води і зроблено поздовжні розрізи навпроти місць розміщення котушок СЕМП. Така конструкція забезпечує формування гарнісажу, який захищає розплав від забруднення зі сторони тигля, і є майже прозорою для проникнення електромагнітного поля в розплав. СЕМП живиться від промислової мережі, створюючи біжуче магнітне поле, та конструктивно складається з двох або трьох коаксіальних котушок, розміщених в пазах магнітопроводів, що охоплюють тигель зі сторони бокових стінок. Нагрівання та плавлення металевих шихти в тиглі відбувається за рахунок кінетичної енергії електронів, які розганяються в електронно-променевої гарматі (ЕПГ) електростатичним полем. Досягнута на сьогодні максимальна маса відливок з титану сягає 50 кг, при тому що потреби ливарного виробництва вимагають підвищення цього показника до 150–250 кг.

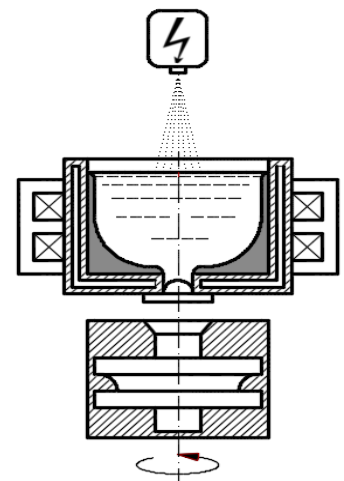


Рис. 1

**Метою** цієї роботи є розрахункове обґрунтування вибору оптимальних геометричних співвідношень гарнісажного тигля підвищеної ємності та визначення раціональних технологічних режимів плавлення.

**Математична модель для дослідження фізичних процесів при ЕППП.** Дослідження мультифізичних процесів у зазначених установках може бути здійснено шляхом спільного чисельного рішення електромагнітної, гідродинамічної і теплової задач. На сьогодні розрахунок нестационарних задач з рухомим фронтом кристалізації досі залишається складною і не завжди вирішуваною задачею. Тому з метою спрощення, незважаючи на суто нестационарний характер ЕППП, зазначені процеси запропоновано розглядати для сталого стану. Як відомо, у сталому тепловому режимі потужність на нагрівання і плавлення не витрачається, і енергетичний баланс встановлюється за рахунок рівності потужності, що надходить у метал від ЕПГ та СЕМП, і потужності, що відводиться випаровуванням і випромінюванням із дзеркала металу, та тепловіддачею до води в секціях тигля. При цьому заданій вхідній потужності відповідає цілком певне положення границі між рідкою і твердою фазами титану в тиглі. Отже, розрахунок стаціонарних задач при плавці дозволяє обійтися без складного і громіздкого розгляду процесів фазового переходу з рухомим фронтом кристалізації і в той же час безпосередньо вийти при заданому режимі роботи СЕМП на відповідність між положенням границі гарнісажу і мінімальним значенням потужності ЕПГ, необхідної для досягнення такого положення. Отриманий результат є досить важливою інформацією при оцінці ефективності тієї чи іншої конструкції тигля та перемішувача.

Відповідно до розробленого розрахункового алгоритму границю рідкої і твердої фаз титану в тиглі запропоновано визначати шляхом послідовного наближення. Спочатку під фокусною плямою електронного про-

меню задається вихідний незначний об'єм рідкого металу. Далі послідовно вирішуються стаціонарні електромагнітна, гідродинамічна та теплова задачі. В результаті розрахунку визначається нова границя твердої і рідкої фаз, якою вважається ізотермічна поверхня з температурою плавлення титану  $T_{пл}$ . Далі задається нова отримана область розплаву, і процес перерахунку повторюється доти, поки положення фронту кристалізації (задане і отримане) не почнуть співпадати. Запропонований алгоритм був успішно апробований на тестовій задачі визначення положення фронту кристалізації за наявності термогравітаційної течії [1].

Живлення перемішувача на промисловій частоті (50 Гц), за якої ЕРС електромагнітної індукції значно перевищують ЕРС, що виникають за рахунок руху розплаву, дає змогу при розрахунках нехтувати останніми та розглядати електромагнітні та гідродинамічні процеси незалежно один від одного.

**Моделювання електромагнітних процесів.** Незважаючи на осесиметричну форму електромагнітного перемішувача і тигля, наявність у боковій стінці останнього з прорізів зумовлює суто тривимірний характер розтікання вихрових струмів у секціях тигля і відповідно потребує тривимірного моделювання електромагнітних процесів. Система рівнянь для розрахунку електромагнітного поля формулюється в квазістаціонарному наближенні (без врахування струмів зміщення)

$$\operatorname{rot}(\mu^{-1}\operatorname{rot}\mathbf{A}) + j\omega\sigma\mathbf{A} + \sigma\operatorname{grad}\phi = \mathbf{J}_e; \quad (1)$$

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

де  $\mu$  – магнітна проникність,  $\sigma$  – питома електропровідність,  $\omega$  – кутова частота,  $\mathbf{J}$ ,  $\mathbf{J}_e$ ,  $\mathbf{A}$  і  $\phi$  – відповідно комплексні амплітуди густини струму провідності, зовнішнього струму, векторного магнітного та скалярного електричного потенціалів.

Гарнісаж та тигель, незважаючи на наявність поодиноких електричних контактів, при розрахунках вважалися електроізолюваними один від одного. Задача розрахунку електромагнітного поля вирішувалася в лінійній постановці при заданих ампер-витках котушок перемішувача.

**Моделювання гідродинамічних процесів.** Гідродинамічна задача розраховувалася для стаціонарної турбулентної течії з використанням k-ε моделі турбулентності. Швидкість  $\mathbf{u}$  рідкого металу визначалася шляхом чисельного рішення рівнянь Нав'є-Стокса

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

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

де  $\rho_m$  – густина рідкого металу,  $p$  – тиск,  $\eta_{ef}$  – коефіцієнт ефективної динамічної в'язкості металу,  $\mathbf{f}$  – 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 приймалася умова ковзання, меніск на ній не враховувався. Рух металу на поверхні в напрямку від центра до периферії отримав умовну назву прямого, а від периферії до центра – зворотного.

**Моделювання теплових процесів.** Для моделювання теплових процесів використовувалося стаціонарне рівняння теплопровідності з врахуванням теплопереносу за рахунок руху розплаву

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda_{ef}\nabla T) + q, \quad (6)$$

де  $C_p$  – питома теплоємність,  $T$  – абсолютна температура,  $\lambda_{ef}$  – коефіцієнт ефективної теплопровідності,  $q$  – внутрішні джерела теплоти.

При розрахунках основне джерело нагрівання при електронно-променевої плавці задавалося у вигляді теплового потоку на поверхні рідкого металу по центру тигля з Гаусівським розподілом його густини

$$\Theta_{(r)} = \theta e^{-r^2/r_f^2} \quad \text{при інтегральному балансі} \quad P_{нагр} = \int_0^\infty \Theta_{(r)} 2\pi r dr, \quad (7, 8)$$

де  $P_{нагр} = 0,75 P_{ЕПГ}$  – частина потужності ЕПГ, що йде на нагрівання і плавлення титану,  $r_f$  – радіус фокальної плями променя, який при ввімкненій СЕМП приймався рівним 10 % від внутрішнього радіуса тигля. Додатково в тиглі, гарнісажі та розплаві як внутрішні джерела тепла  $q$  враховувалися тепловиділення від вихрових струмів, наведених в них індуктором перемішувача.

Питомий тепловий потік з поверхні дзеркала розплаву за рахунок випромінювання враховувався відповідно до загальновідомого виразу

$$P_{випр} = \xi \sigma_{SB}(T^4 - T_0^4), \quad (9)$$

де  $\xi = 0,3$  – приведена ступінь чорноти поверхні розплаву титану,  $\sigma_{SB} = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>) – постійна Стефана-Больцмана,  $T_0 = 300$  К – температура навколишнього середовища.

Відомі (в табличній формі) експериментальні дані втрат на випаровування титану в залежності від температури апроксимувалися функцією

$$P_{випар} = 72,396 \cdot 10^{-46} \cdot T^{14,7979}. \quad (10)$$

Питомий тепловий потік до води в каналах тигля визначався відповідно до виразу

$$P_{\text{еііа}} = h_{\text{еф}} (T - T_0), \quad (11)$$

де  $h_{\text{еф}}$  – ефективний коефіцієнт тепловіддачі (КТВ), який інтегрально враховує тепловіддачу до води в каналах тигля, тепловий опір його мідних стінок, теплопередачу теплопровідністю і випромінюванням в контактному проміжку між тиглем і гарнісажем. Його значення за наявності гарнісажу приймається рівним  $150 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ , а при його промиванні ( $T > T_{\text{пл}}$ ) задавалося виразом [2]

$$h_{\text{еф}} = 150 + 200(T - T_{\text{пл}}), \quad (12)$$

відповідно до якого значення КТВ залежать від температури розплаву титану на границі з тиглем і можуть сягати величин порядку  $1500 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$  і більше (тобто збільшуватися більш ніж на порядок).

Врахування інтенсифікації теплообміну завдяки турбулентному характеру руху розплаву при електромагнітному перемішуванні проводилося шляхом введення ефективного коефіцієнта теплопровідності  $\lambda_{\text{еф}}$ , що має молекулярну  $\lambda$  і турбулентну  $\lambda_t$  складові, тобто  $\lambda_{\text{еф}} = \lambda + \lambda_t$ . Локальні значення  $\lambda_t$  визначалися за результатами гідродинамічного розрахунку відповідно до виразу

$$\lambda_t = \eta_t C_p / \text{Pr}_t, \quad (13)$$

де  $\eta_t$  – турбулентна динамічна в'язкість розплаву титану,  $C_p$  – його теплоємність,  $\text{Pr}_t$  – турбулентне число Прандтля, розподіл якого визначається або відповідно до моделей Кейса-Крауфорда (Kays-Crawford) [3], або задається константою. Значення числа Прандтля для рідких металів знаходиться у діапазоні  $1 \leq \text{Pr}_t \leq 10$ .

**Результати моделювання.** Аналіз умов тепловіддачі в процесі ЕППП засвідчив, що сумарні значення КТВ з поверхні рідкого титану за рахунок випромінювання та випаровування практично співпадають за величиною зі значенням ефективного КТВ до води в каналах тигля за наявності гарнісажу і будуть меншими за нього на порядок за відсутності останнього.

Таким чином, при виборі конструкції тигля, СЕМП та режимів роботи останньої необхідно виключити можливість промивання бокового гарнісажу при плавці, оскільки це призводить до різкої інтенсифікації тепловіддачі.

На рис. 2 показано результати розрахунків для двох тиглів з однаковим загальним завантаженням титану, що дає змогу отримувати при зливанні в ливарну форму через отвір у дні тигля близько 150 кг титану. Розрахункові дані отримані при сумарних ампер-витках перемішувача  $Iw = 30 \text{ кА}$ , індуктор якого має дві котушки. Кут зсуву фаз між струмами котушок складає 90 ел. град., напрям чергування фаз є зворотним. На рис. 2, а показано структуру руху розплаву та границю рідкої і твердої фаз для тигля з внутрішнім діаметром  $d = 400 \text{ мм}$  та висотою завантаження титану  $l = 350 \text{ мм}$  ( $l/d = 0,875$ ), на рис. 2, б – для тигля з внутрішнім діаметром  $d = 485 \text{ мм}$  та висотою завантаження титану  $l = 240 \text{ мм}$  ( $l/d \approx 0,5$ ). У першому випадку на відміну від другого промивання донного гарнісажу супроводжується промиванням бокового, що призводить до підвищених втрат теплоти. Так, для досягнення можливості донного зливання титану у "високому" тиглі необхідна мінімальна потужність електронно-променевого нагрівання  $P_{\text{нагр}} = 478 \text{ кВт}$ , а в "низькому" – 140 кВт.

Для ілюстрації впливу напрямку руху розплаву на ефективність ЕППП розглянемо залежність від потужності електронно-променевого нагрівання так званого коефіцієнта зливання  $k_p$ , що представляє собою відношення маси розплаву до загальної маси титану у тиглі.

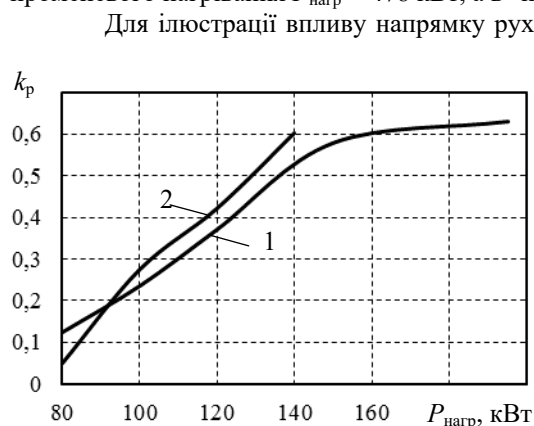


Рис. 3

Для ілюстрації впливу напрямку руху розплаву на ефективність ЕППП розглянемо залежність від потужності електронно-променевого нагрівання так званого коефіцієнта зливання  $k_p$ , що представляє собою відношення маси розплаву до загальної маси титану у тиглі.

На рис. 3 представлено криві, що відображають результати розрахункової оцінки залежності  $k_p$  від  $P_{\text{нагр}}$  при прямому (крива 1) і зворотному (крива 2) чергуванні фаз електророзігрівання котушок індуктора в "низькому" тиглі. Як видно з рисунка, при незначній потужності електронно-променевого нагрівання (80 кВт) у першому випадку досягається значно більший об'єм рідкого металу ( $k_p = 0,124$ ), ніж у другому ( $k_p = 0,051$ ). Однак із зростанням потужності нагрівання після досягнення долі рідкої фази близько 20% ( $k_p = 0,2$ ) зворотний рух по відношенню до прямого починає забезпечувати більш високі значення коефіцієнта зливання при однаковій потужності електронно-променевого нагрівання.

Початковий провал значень  $k_p$  при зворотному чергуванні фаз обумовлений відносно низькою інтенсивністю руху. При цьому в малому об'ємі розплаву рух має прямий напрям. По мірі накопичення рідкої фази

відбувається поступова перебудова структури течії з прямого напрямку на зворотний, а інтенсивність руху незалежно від напрямку чергування фаз стає приблизно однаковою. Надалі починають позначатися переваги зворотного руху, які полягають у перенесенні тепла з поверхні вглиб завантаження і переважному розмиванні донного гарнісажу. Відповідно недоліками прямого руху будуть підвищені втрати з перегрітої поверхні розплаву і переважний розмив бокового гарнісажу.

На рис. 3 крива 2 закінчується значеннями  $P_{\text{нагр}} = 140$  кВт і  $k_p = 0,6$ , після яких вже відбувається промивання донного гарнісажу і зливання розплаву. Різкий перегин кривої 1 приблизно біля значень  $k_p = 0,57$  свідчить про промивання бокового гарнісажу при прямому перемішуванні розплаву та вказує на енергетичну нерациональність ведення ЕППП після такого промивання.

**Висновки.** Шляхом мультифізичного чисельного моделювання показано, що при виборі геометричних розмірів тигля при ЕППП з електромагнітним перемішуванням рідкого металу в першу чергу необхідно виключити можливість бокового промивання гарнісажу, оскільки при цьому відбувається різка інтенсифікація локальної тепловіддачі, що призводить до підвищених енергозатрат при плавці. 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 необхідно спрямовувати від стінок до центра тигля.

1. 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.

2. Kays W.M. Turbulent Prandtl number—where are we? *ASME Journal of Heat Transfer*. 1994. Vol. 116(2). Pp. 284-295.

3. Bojarevics V., Harding R.A., Pericleous K. and Wickins M. The Development and Experimental Validation of a Numerical Model of an Induction Skull Melting Furnace. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2004. Vol. 35 B. Pp. 785-803.

УДК 621.74:537.84

#### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ГАРНИСАЖНОЙ ПЛАВКЕ ТИТАНА

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>, О.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)

С целью усовершенствования конструкции гарнисажного тигля с системой электромагнитного перемешивания жидкого металла, повышения энергоэффективности и определения рациональных технологических режимов электронно-лучевой гарнисажной плавки разработана трехмерная математическая модель для расчетного исследования электромагнитных, гидродинамических и тепловых процессов при плавке. Для упрощения указанные процессы рассматривались для установившегося состояния. Исследовано влияние соотношения основных размеров тигля и направления движения расплава при электромагнитном перемешивании на эффективность процесса плавки. Библ. 3, рис. 3.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая гарнисажная плавка, гарнисажный тигель, система электромагнитного перемешивания, математическое моделирование, электромагнитные, гидродинамические и тепловые процессы.

#### NUMERICAL MODELING OF MULTIPHYSICAL PROCESSES FOR ELECTRON-BEAM SKULL MELTING OF TITANIUM

Y.M. Goryslavets<sup>1</sup>, S.V. Ladokhin<sup>2</sup>, O.I. Glykhenkyi<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 Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 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,

Vernadsky Blvd., 34/1, Kyiv, 03142, Ukraine,

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

With the aim of improving of skull crucible design with system of electromagnetic stirring of liquid metal, increasing of energy efficiency and determining of rational technological regimes of electron-beam skull melting three dimensional mathematical model for numerical investigation of electromagnetic, hydrodynamic and heat processes during melting has been developed. For simplicity, mentioned processes was considered as stationary. The influence of basic crucible sizes ratio and direction of metal flow during electromagnetic stirring on efficiency of melting process was investigated. References 3, figures 3.

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

1. 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. *Protsessy litia*. 2017. No 2. Pp. 30-38. (Rus)

2. Kays W.M. Turbulent Prandtl number—where are we? *ASME Journal of Heat Transfer*. 1994. Vol. 116(2). Pp. 284-295.

3. Bojarevics V., Harding R.A., Pericleous K. and Wickins M. The Development and Experimental Validation of a Numerical Model of an Induction Skull Melting Furnace. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2004. Vol. 35 B. Pp. 785-803.

Надійшла 02.03.2018  
Остаточний варіант 19.03.2018