

УДК 621.74 : 537.84

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ СИСТЕМИ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ РІДКОГО МЕТАЛУ ДЛЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНИХ УСТАНОВОК

А.К.Шидловський, академік НАН України, **Ю.М.Гориславець**, докт.техн.наук, **О.І.Глухенький**, канд.техн.наук,
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

Наведено результати досліджень електромагнітних систем для створення обертального руху рідкого металу в електротехнологічних установках, отримані при виконанні науково-дослідної роботи "Аспект". Принцип дії зазначених систем заснований на використанні власного магнітного поля або електричного струму, які функціонально присутні в таких установках. Розглянуто два підходи до створення обертального руху металу: за рахунок обертового магнітного поля і на основі взаємодії перехресних електричного і магнітного полів. Перший підхід реалізовано в індукційних каналних печах, другий – в електродугових установках. Описано математичні моделі для дослідження фізичних процесів в таких системах. Наведено результати комп'ютерного моделювання електромагнітних сил і течій рідкого металу в каналі індукційної печі і у ванні вакуумно-дугової печі. Визначено електромагнітні, гідродинамічні і електродинамічні параметри цих систем, зокрема, питомий електромагнітний момент і усереднена кутова швидкість рідкого металу. Крім того, для індукційної каналної печі з обертальним рухом металу проведено аналіз сил, що діють на неметалеві включення (частинки), які знаходяться в розплаві, а для установки рафінування розплаву досліджено поведінку бульбашок рафінуючого газу в обертальному потоці рідкого металу, що підлягає очищенню. Бібл. 14, рис. 11.

Ключові слова: рідкий метал, обертальний рух, електромагнітна система, індукційна канална піч, електродугова установка, установка для рафінування розплаву, комп'ютерне моделювання, фізична модель, електромагнітний момент, кутова швидкість, неметалеві включення, рафінуючий газ.

Вступ. Обертальний рух розплавленого металу використовують в різноманітних технологічних процесах. Хоча основне призначення такого руху – це перемішування металу з метою отримання однорідних властивостей розплаву за температурою та хімічним складом, він необхідний також і для інших цілей. Так, наприклад, в індукційних каналних печах, що виплавляють алюміній, створення обертального руху металу в каналах дозволяє суттєво зменшити “заростання” каналів окислами, реалізувати очищення розплаву безпосередньо в печі в процесі плавлення металу, а також інтенсифікувати тепломасообмін між каналною частиною печі, де виділяється тепло, і ванною, в якій знаходиться метал (шихта), що підлягає плавленню. Обертальний рух металу необхідний в гарнісажних печах для підтримання необхідної товщини гарнісажу в процесі плавлення металу. Окрім цього, такий рух може бути використаний в системах рафінування металевих розплавів та в інших технологіях.

Здавалось би, якщо потрібно обертати рідкий метал, досить взяти традиційну, відому з електромеханіки електромагнітну систему, наприклад, систему обертового магнітного поля, і використати її для цього. Так, власне, і роблять в багатьох випадках. Але коли мова йде про металургійне або ливарне виробництво з досить складними умовами для функціонування електрообладнання (висока температура, наявність розплавленого металу, загазованість і запиленість атмосфери), такі системи не є ефективними і надійними. Більше того, в деяких випадках розмістити їх на діючому обладнанні просто не має можливості.

Ідея та шляхи створення обертального руху рідкого металу в електротехнологічних установках. Обертальний рух рідкого металу в електротехнологічних установках пропонується створити за допомогою нетрадиційних з точки зору класичної електромеханіки електромагнітних систем, які використовують власне магнітне поле або власний електричний струм установок. Реалізація таких систем можлива на основі одного з двох підходів: або шляхом створення обертового магнітного поля, яке пропонується отримати, додавши до існуючого в установці власного магнітного поля допоміжне поле додаткової котушки, або за рахунок взаємодії перехресних електричного і магнітного полів з використанням власного електричного струму установки, додавши до нього, знову ж таки, магнітне поле однієї або декількох додаткових котушок.

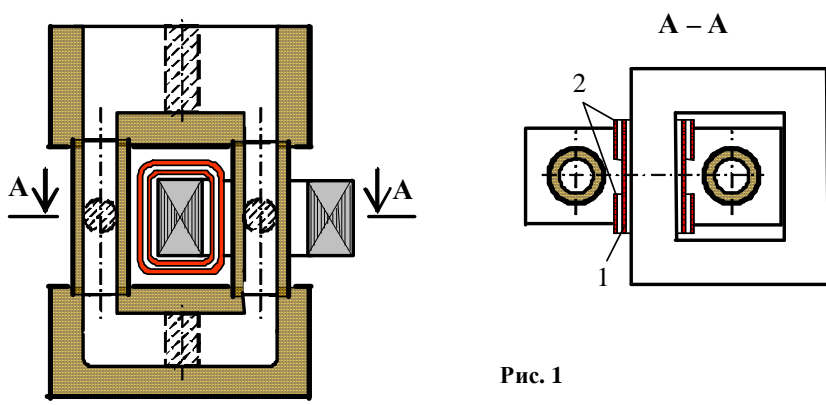


Рис. 1

Перший підхід реалізовано нами в індукційних каналних печах. Як відомо, індукційна канална піч, точніше її нагрівач, що має назву "індукційна одиниця", яка стикується з ванною печі, в електромагнітному відношенні нагадує електричний трансформатор, вторинною обмоткою якого є короткозамкнений виток рідкого металу (рис. 1). Якщо метал у цьому витку привести в оберта-

льний (навколо поздовжньої осі каналу) рух, то на неелектропровідні частинки оксидів, які зазвичай присутні в розплаві, почнуть діяти доцентрові сили, спрямовані проти електричних сил, що діють на частинки в напрямку стінки каналу. Коли ці сили за величиною перевершать електричні, зазначені частинки почнуть мігрувати не до стінки і осідати на ній, як раніше, а рухатись до осі каналу. Стикаючись між собою в процесі такого руху, вони укрупнюються і, в решті решт, утворюють оксидні конгломерати, які після вимкнення живлення печі виринають на поверхню металу. Таким чином, при наявності обертального руху розплав з одного боку зменшується кількість оксидних частинок, які відкладаються на стінках, спричиняючи "заростання" каналу, а з іншого – відбувається очищення металу, що плавиться, від неметалевих домішок. Крім цього, як показали наші дослідження, якщо в одній половині каналу метал обертати з більшою швидкістю, ніж в іншій, в такому каналі виникає транзитна течія, згідно з якою розплав з ванни поступає в канал через одне гирло, а залишає його через інше [8]. Як відомо, наявність такої течії суттєво інтенсифікує передачу тепла від індукційної одиниці до ванни печі.

Отримати обертальний рух рідкого металу в каналі індукційної каналної печі запропоновано за допомогою однієї або декількох додаткових котушок, магнітне поле яких в області каналу в просторі і за фазою зсунуто відносно поля індуктора (поля розсіювання індуктора) на 90 градусів. Конструктивне виконання цих котушок може бути різним. Котушки можуть бути розміщені на індукторі (як показано на рис. 1, де 1 – індуктор, 2 – додаткова двосекційна котушка), на бокових стрижнях магнітопроводу або виконані у вигляді сідловидних котушок, які пристиковані до циліндричних каналів [3].

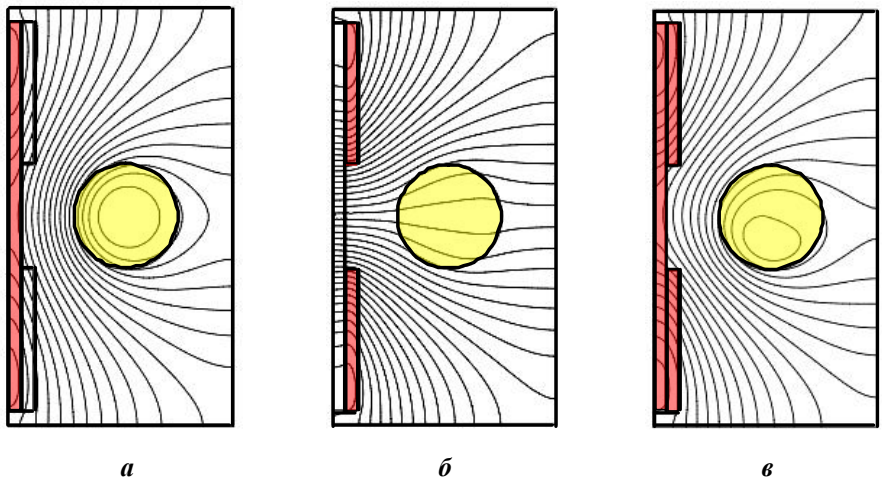


Рис. 2

На рис. 2 показано магнітне поле індукційної одиниці з додатковою котушкою, намотаною поверх індуктора згідно з рис. 1. На рис. 2, а показано магнітне поле індуктора, на рис. 2, б – поле додаткової котушки, а на рис. 2, в – результуюче поле. Із рис. 2, а і б видно, що в області поперечного перерізу циліндричного каналу магнітні поля індуктора і котушки мають ортогональні компоненти. Якщо ці поля будуть зсунуті між собою ще і за фазою, виникне обертове магні-

тне поле, яке і призведе до обертання рідкого металу в каналі.

Другий підхід може бути реалізовано в електродугових установках за рахунок взаємодії струму дуги, що протікає в рідкому металі, і магнітного поля додаткової котушки. В першу чергу його доцільно використати в одноелектродних установках, зокрема в електродугових печах постійного струму, у вакуумно-дугових або плазмово-дугових печах. На рис. 3 на прикладі плазмово-дугової печі показано одну із можливих схем створення обертального руху розплаву на основі такого підходу, яка використовує взаємодію радіальної компоненти електричного струму J в металі і осьової компо-

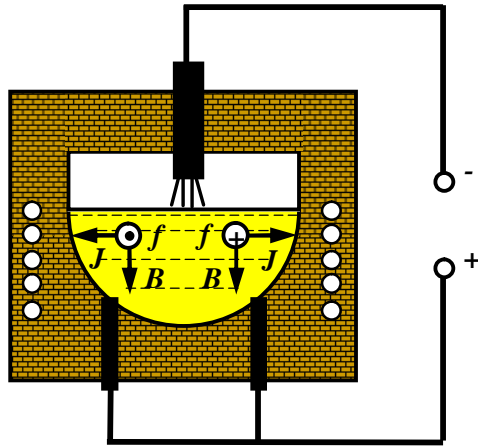


Рис. 3

як відомо, включає в себе рівняння Максвелла і рівняння гідродинаміки.

Електромагнітні задачі при цьому формулювались в тривимірній осесиметричній постановці (для осесиметричних систем), або в так званій квазітривимірній постановці. Остання використовувалася для розрахунку поля в індукційній каналній печі, точніше в її індукційній одиниці. Згідно з цією постановкою електромагнітне поле цієї одиниці (див. рис. 1) розглядалося в перерізі, що проходить поперек циліндричних каналів (в перерізі А-А), а їх з'єднувальні канали (верхній і нижній) враховувалися шляхом включення в рівняння балансу напруг для рідкометалевого витка повних опорів цих каналів, які розраховувалися на підставі розв'язання додаткових польових задач, що розглядалися у вертикальній площині. Вперше така постановка була використана нами при дослідженні електромагнітних систем для дозування рідких металів [11]. Зазначені електромагнітні задачі в цій роботі розв'язувались як при заданих струмах (ампер-витках) в котушках [4, 5, 10], так і при заданих напругах з врахуванням схеми живлення тієї чи іншої установки [2, 7]. В останньому випадку формулювалась і розв'язувалась зв'язана коло-польова задача, яка включає в себе рівняння для векторного магнітного потенціалу і рівняння балансу напруг і струмів (рівняння Кірхгофа) для установки в цілому і окремих її елементів.

Гідродинамічні задачі для об'єктів, що досліджувалися, розв'язувалися шляхом чисельного розрахунку рівнянь Нав'є-Стокса для турбулентного режиму руху розплаву з $k-\varepsilon$ – моделлю турбулентності в дво- та тривимірних постановках [6, 7, 9].

Моделювання фізичних процесів в системі обертального руху на основі обертового магнітного поля.

Спочатку розглянемо деякі результати, отримані для індукційної каналної печі, точніше для індукційної одиниці, яка, як відомо, використовується не тільки в печах, а і в інших електротехнологічних установках. В результаті проведених чисельних розрахунків такої системи знайдено розподіл поля (векторного магнітного потенціалу), а також визначено його диференціальні параметри (густину струму в рідкому металі, індукцію магнітного поля тощо). Отримані таким чином дані дозволили визначити питомі електромагнітні сили \mathbf{f} , що діють на рідкий метал в каналах індукційної одиниці (рис. 4), а також

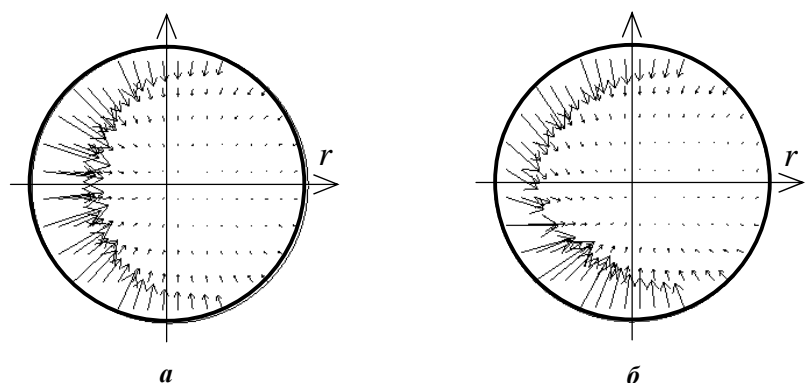


Рис. 4

розрахувати течії металу в поперечних перерізах циліндричних каналів такого нагрівача (рис. 5). Як видно з рис. 4, а, без додаткової котушки сили в каналі в основному мають радіальне спрямування (сили f_r), під дією яких створюється двоконтурна течія, що представлена на рис. 5, а. Наявність котушки призводить до вини-

ненти магнітного поля B додаткової котушки. В результаті такої взаємодії в ванні печі виникає азимутальна електромагнітна сила f , яка і викликає електромагнітне обертання рідкого металу.

Методи дослідження електромагнітних систем. Дослідження зазначених електромагнітних систем проводилися для технологій індукційного плавлення металів, рафінування металевого розплаву, електродугового плавлення тощо. Дослідження виконувалися методами математичного і фізичного моделювань.

Було розроблено математичні моделі для комп'ютерного моделювання електромагнітних і гідродинамічних процесів в таких системах. Особливістю цих моделей є те, що вони дозволяють розраховувати електромагнітне поле і рух металу в магнітогідродинамічній постановці, шляхом чисельного розв'язання системи диференціальних рівнянь магнітної гідродинаміки, яка,

кнення азимутальних сил f_ϕ (рис. 4, б), під дією яких течія металу змінюється і із збільшенням ампер-витків котушки трансформується в одноконтурний (обертальний) рух (рис. 5, б). Слід зазначити, що в зв'язку з несиметричним (неосесиметричним) розподілом сил в поперечному перерізі, обертання рідкого металу в каналі не є строго осесиметричним, тобто вісь його обертання не співпадає з геометричною віссю циліндричного каналу.

Ефективність електромагнітних систем, що створюють обертальний рух металу, оцінювалась за допомогою електродинамічних параметрів [7], в якості яких виступали питомий (на одиницю довжини каналу) електромагнітний момент

$$M = \int_{S_{\text{цк}}} f_\phi r ds$$

і усереднена в поперечному перерізі кутова швидкість металу

$$\Omega = \frac{1}{S_{\text{цк}}} \int_{S_{\text{цк}}} \frac{u_\phi}{r} ds,$$

де $S_{\text{цк}}$ – площа поперечного перерізу циліндричного каналу, u_ϕ – азимутальна компонента швидкості руху. Рис. 6 демонструє залежності цих параметрів для індукційної одиниці від ампер-витків додаткової котушки $I_K W_K$ і індуктора $I_I W_I$ ($I - I_I W_I = 50$ кА, $2 - I_I W_I = 60$ кА, $3 - I_I W_I = 70$ кА). Без врахування швидкості руху рідкого металу \mathbf{u} в рівняннях електромагнітного поля залежності моменту мають лінійний характер, а кутова швидкість змінюється як корінь квадратний від ампер-витків індуктора і додаткової котушки (суцільні криві). Якщо ж врахувати цю швидкість, то значення цих параметрів дещо зменшуються (пунктирні криві).

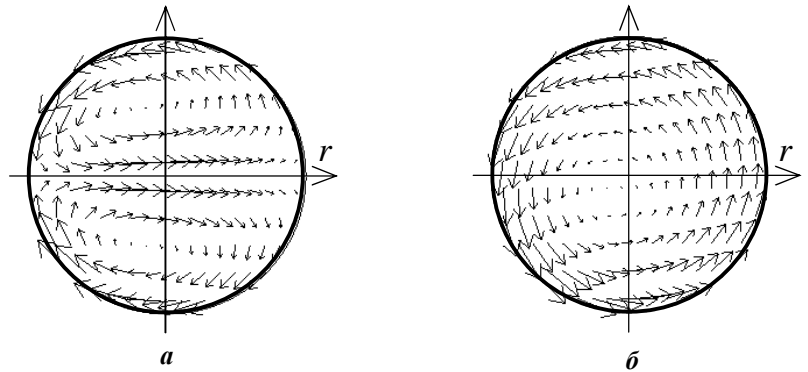


Рис. 5

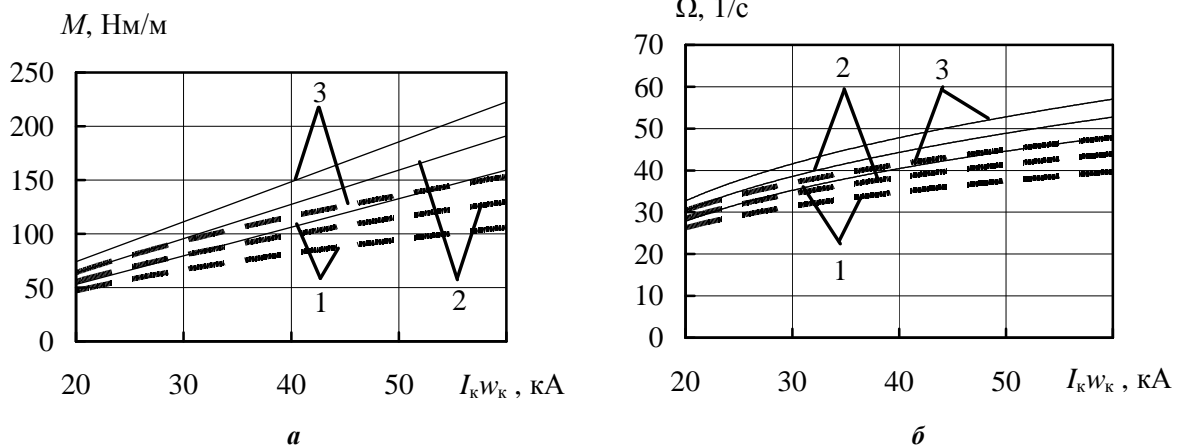


Рис. 6

Оскільки створення обертального руху металу в індукційній каналній печі пропонується з метою зменшення "заростання" каналів, було проведено аналіз сил, що діють на неметалеві частинки в такому каналі [10]. У відсутності додаткової котушки механічні сили \mathbf{F}_M (сума доцентрових і відцентрових сил), що виникають внаслідок криволінійного руху частинок, на порядок менші сил електричного походження \mathbf{F}_e (рис. 7, а), які спрямовані до стінки каналу. А тому під дією останніх неметалеві частинки рухаються в цьому напрямку і осідають на його стінці. Створення обертального руху дозволяє (при певних значеннях ампер-витків індуктора і котушки) механічним силам

$$\mathbf{F}_M = \frac{\pi}{6} d^3 \left(\frac{u_\phi}{r} \right)^2 (\rho_s - \rho) \mathbf{r},$$

що діють на ці частинки, (де d – діаметр умовно сферичної частинки, ρ і ρ_s – густина рідкого металу і неметалевої частинки відповідно, \mathbf{r} – радіус-вектор) компенсувати електричні сили

$$\mathbf{F}_e = \frac{\pi}{4} d^3 \frac{\sigma_s - \sigma}{\sigma_s + 2\sigma} \mathbf{f},$$

де σ і σ_s – питома електропровідність рідкого металу і матеріалу частинки). Тому результуючі сили $\mathbf{F}_s = \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_m$, що діють на частинки в цьому випадку, міняють свій напрямок, змушуючи їх рухатися не до стінки каналу, а до осі. Розрахунки показують, що при даних, характерних для діючої промислової печі для плавлення алюмінію, на значній площі поперечного перерізу циліндричних каналів результуючі сили спрямовані до осі каналу (рис. 7, б). Проте залишаються дві зони в поперечному перерізі, в яких ці сили залишаються направленими до стінки каналу. Із збільшенням ампер-витків додаткової котушки ці зони зменшуються, але повністю ліквідувати їх не вдається. Таким чином, можна стверджувати, що частина неметалевих частинок, що знаходяться в розплаві, при наявності обертального руху буде спрямована до стінки каналу, а інша частина – до осі. Хоча не всі домішки в каналі в цьому випадку прямують до осі, тим не менш, як показують дослідження, за рахунок цього руху можна суттєво зменшити “заростання” каналів окислами.

На базі індукційної одиниці каналної печі було запропоновано конструкцію установки для

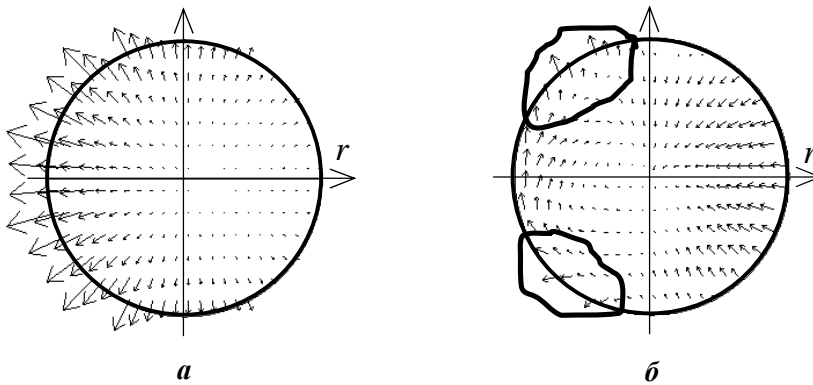


Рис. 7

рафінування металевого розплаву в процесі безперервного лиття алюмінієвих сплавів [2]. Очищення металу в ній здійснюється за рахунок сумісної дії різних фізичних чинників, а саме: пропускання через розплав електричного струму, електромагнітного обертання металу в циліндричному каналі, вдування в розплав рафінуючого газу і фільтрування його за допомогою пінокерамічного фільтру. Комбінована дія наведених факторів дозволяє більш ефектив-

но (порівняно з відомими системами) очищати метал від неметалевих включень, що дає змогу рекомендувати цю установку для технології безперервного лиття заготовок відповідного призначення.

Для такої установки проведено дослідження електромагнітних і гідродинамічних процесів, визначено її електромагнітні параметри, а також досліджено поведінку газових частинок (бульбашок) рафінуючого газу в обертальному потоці рідкого металу [9, 12]. Останнє дослідження виконувалося шляхом розв’язання нестационарного диференціального рівняння руху сферичних газових частинок з врахуванням всіх основних сил, що діють на них (інерційної сили, електричної, механічної, сили тертя і гравітаційної сили). Для різних розмірів (діаметрів) частинок отримано траєкторії руху їх в циліндричному каналі. Було встановлено, що при порівняно невеликих значеннях ампер-витків додаткової котушки всі газові бульбашки незалежно від розміру і місця введення їх у розплав, рухаючись по спіральним орбітам, мігрують до циліндричної стінки каналу. При цьому міграція як відносно малих, так і великих бульбашок відбувається переважно в напрямку індуктора. При збільшенні ампер-витків додаткової котушки поведінка газових бульбашок змінюється (рис. 8). В цьому випадку в поперечному перерізі циліндричного каналу утворюються три характерні зони руху: пристінкова, середня і приосьова (на рисунку вони розділені замкнутими пунктирними лініями). Бульбашки, введені в рідкий метал в пристінковій і приосьовій зонах, прямують в напрямку стінки каналу, а в середній – до осі. При цьому з приосьової і середньої зон бульбашки виходять на замкнуту траєкторію стійкої рівноваги, яка розділяє ці зони. Середню і пристінкову зони, навпаки, розділяє траєкторія нестійкої рівноваги. Із збільшенням ампер-витків додаткової котушки розміри пристін-

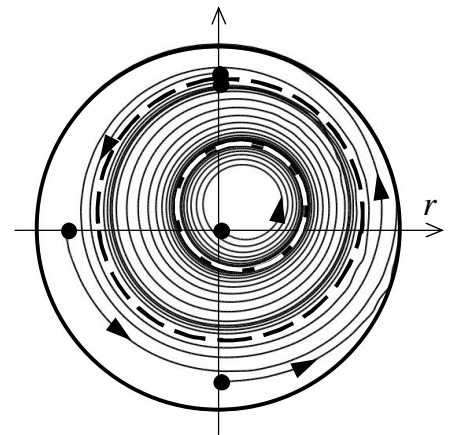


Рис. 8

кової та приосьової зон зменшуються, а середньої – збільшуються.

Установлено, що характер руху газових бульбашок в обертальному потоці металевого розплаву рафінуючої установки головним чином залежить від ампер-витків додаткової котушки, розміру бульбашок та місця їх введення в циліндричний канал. Для збільшення рафінуючої дії газових частинок ампер-витки додаткової котушки повинні забезпечити такий обертальний рух рідкого металу, при якому утворюється зона руху бульбашок газу, в якій вони мігрують в напрямку осі циліндричного каналу (тобто середня зона), переборюючи дію радіальних електричних сил. Розміри газових бульбашок при цьому повинні бути якомога меншими, а вводити їх в метал необхідно в середню зону поперечного перерізу каналу на границі з пристінковою зоною.

На основі проведеного комп'ютерного моделювання електромагнітного поля індукційної каналної одиниці з обертальним рухом рідкого металу (в результаті розв'язання коло-польової квазі-тривимірної задачі) визначено електромагнітні параметри індукційних одиниць і окремих їх елементів для індукційної каналної печі і установки для рафінування металевого розплаву [1, 2, 5]. Розходження між розрахованими таким чином параметрами і отриманими в результаті вимірювання на діючому промисловому обладнанні даними не перевищують 15%.

Для з'ясування адекватності розроблених математичних моделей було створено фізичну модель індукційної одиниці з обертальним рухом рідкого металу [8]. В результаті проведеного на ній фізичного моделювання електромагнітного поля отримано розподіл індукваного в каналах електричного струму. Співставлення отриманих таким чином даних з даними комп'ютерного моделювання показали достатньо хороший збіг. Розбіжність між ними не перевищила 5%. На цій моделі проведено також фізичне моделювання гідродинамічних процесів. Отримано розподіли швидкості обертального руху по радіусу і довжині охопленого і неохопленого магнітопроводом циліндричних каналів. Доведена можливість створення в індукційній одиниці з електромагнітним обертанням металу транзитної течії, яка дозволяє зменшити перегрівання металу в каналах (відносно ванни), що дає змогу підвищити ККД печі та збільшити ресурс її роботи.

Комп'ютерне моделювання електромагнітних систем, що реалізують взаємодію перехресних електричного і магнітного полів. Дослідження таких систем проводилися для електродугових печей постійного струму, вакуумно-дугових і плазмово-дугових печей. Обертання розплаву у ванні таких печей може забезпечуватися за допомогою однієї або декількох додаткових котушок, точніше за рахунок взаємодії осьової компоненти магнітного поля котушки з радіальною компонентою струму дуги, що розтікається в ванні, або осьового струму дуги з радіальною компонентою поля котушки (котушок).

Розглянемо одну з таких систем на прикладі вакуумно-дугової гарнісажної печі, схематичне зображення якої показано на рис. 9. На цьому рисунку позначено: 1 – камера печі, 2 – тигель, 3 – котушка, 4 – електрод, 5 – ливарна форма. Обертальний рух розплаву у ванні цієї печі створюють азимутальні сили, що виникають в результаті взаємодії поля котушки з радіальною компонентою струму дуги, що розтікається в ванні. Практика показує, що для ефективної роботи такої печі (для підтримання на заданому рівні необхідної товщини гарнісажу) колова швидкість розплаву на поверхні ванни повинна бути на рівні 1 м/с.

Наведемо деякі результати комп'ютерного моделювання печі для плавлення титану ємністю 250 кг. На рис. 10, *а* показано течію рідкого металу в меридіональній площині ванни печі у відсутності додаткової котушки. Це класична електровихрова течія, яка виникає за рахунок взаємодії електричного струму в металі з власним магнітним полем. Якщо додати сюди котушку, виникає обертальний рух (рис. 11). Максимальне значення азимутальної (колової) швидкості $u_{\text{фмак}}$, як показують розрахунки, знаходиться на стінці гарнісажу (трохи нижче верхньої поверхні рідкого металу). Цікаво, що при цьому видозмінюється течія і в меридіональній площині – напрямок руху її міняється на протилежний (рис. 10, *б*). З точки зору перемішування металу така течія є більш доцільною, ніж течія на рис. 10, *а*, оскільки її рух співпадає з термограві-

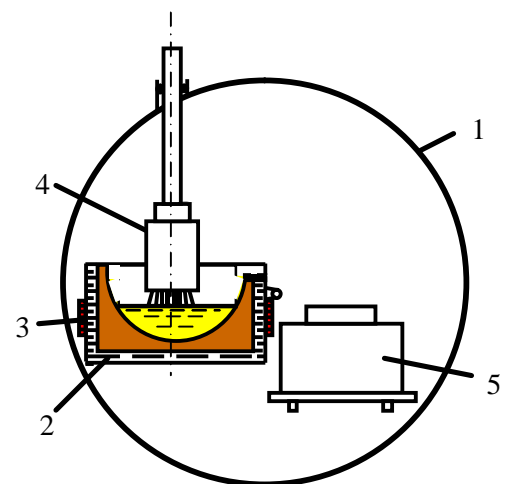


Рис. 9

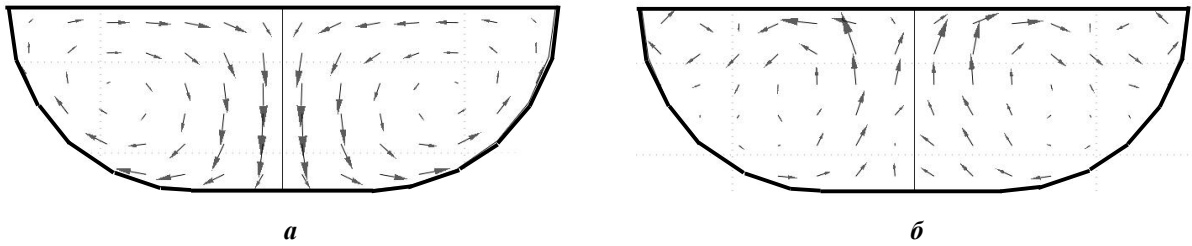


Рис. 10

таційою течією, що виникає в такій установці. Варто зазначити, що швидкість обертального руху металу суттєво перевищує швидкість течії в меридіональній площині. Так, якщо максимальна азимутальна швидкість металу складає, наприклад, $u_{\phi\max} = 1,6$ м/с, то максимальне значення швидкості в меридіональній площині при цьому (при наявності котушки) не перевищує 0,04 м/с.

Розроблена математична модель розглянутої системи дозволяє оптимізувати параметри додаткової котушки (її розміри, розташування відносно ванни печі, кількість ампер-витків) з метою отримання максимальної (або необхідної за технологією) швидкості рідкого металу при допустимих значеннях радіальної компоненти магнітного поля котушки в зоні дуги, яка, як відомо, негативно впливає на стабільність її горіння.

Отримані в ході виконання НДР теоретичні і практичні результати послужили основою для формулювання принципів побудови і видачі рекомендацій щодо розроблення та створення промислових зразків металургійного обладнання з новими електромагнітними системами обертального руху рідкого металу [13, 14]. Виконано ескізне опрацювання плавильного обладнання та їхніх систем живлення, яке використовує в якості нагрівача металу індукційну каналну одиницю з обертальним рухом розплаву. Це – індукційна канална піч для плавлення і приготування алюмінієвих сплавів, індукційний міксер для накопичення, зберігання та видачі металу, вакуумний індукційний міксер для дегазації розплаву, установка для рафінування металу в процесі безперервного лиття металевих заготовок відповідального призначення та ін.

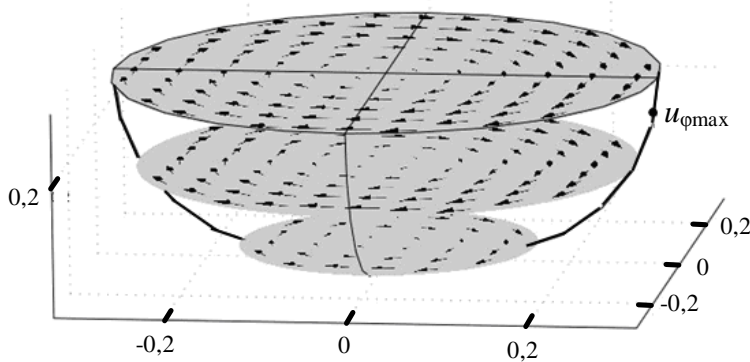


Рис. 11

Висновки. Запропоновано нові електромагнітні системи для обертання рідкого металу в електротехнологічних установках, принцип

дії яких ґрунтується на використанні власного магнітного поля або власного електричного струму таких установок. На основі математичного і фізичного моделювань виконано теоретичні та експериментальні дослідження електромагнітних і гідродинамічних процесів в зазначених системах для технологій індукційного і дугового плавлення металів та безперервного рафінування розплаву. Визначено основні закономірності руху рідкого металу, а також твердих і газових неметалевих частинок в потоці розплаву для установок, що реалізують зазначені технології. Дослідження спрямовані на розробку принципово нового та модернізацію існуючого електрообладнання для електромагнітного оброблення металів в рідкому стані, яке дозволяє суттєво зменшити питомі витрати електроенергії, зменшити втрати металу та підвищити його якість.

1. Гориславец Ю.М. Расчет активного сопротивления индукционных катушек каналных печей // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2009. – Вип.24. – С. 60–66.

2. Гориславец Ю.М. Электромагнитное поле и параметры устройства непрерывного рафинирования жидкого металла // Техн. електродинаміка. – 2008. – №4. – С. 69–74.

3. Гориславец Ю.М. Электромагнитные системы вращательного движения жидкого металла для индукционных канальных печей // Техн. электродинамика. – 1998. – №4. – С. 12–14.
4. Гориславец Ю.М. Комп'ютерне моделювання індукційної каналної печі з обертовим рухом рідкого металу // Техн. электродинамика. Тем. вип. “Проблеми сучасної електротехніки”. – 2008. – Ч.6. – С. 92–95.
5. Гориславец Ю.М. Математичне моделювання електромагнітних процесів в індукційних канальних печах // Вісн. нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2007. – №597. – С. 61–65.
6. Гориславец Ю.М., Глухенький А.И. Определение скорости вращательного движения жидкого металла в устройстве непрерывного рафинирования // Техн. электродинамика. – 2008. – №6. – С. 60–64.
7. Гориславец Ю.М., Глухенький А.И. Электродинамические параметры системы вращательного движения жидкого металла индукционной канальной печи // Техн. электродинамика. – 2009. – №3. – С. 35–40.
8. Гориславец Ю.М., Глухенький О.И. Экспериментальне дослідження обертального руху рідкого металу в індукційній каналній печі // Техн. электродинамика. – 2011. – №4. – С. 64–68.
9. Гориславец Ю.М., Глухенький О.И. Поведінка газових бульбашок в каналі електромагнітної системи рафінування металевих розплавів // Техн. электродинамика. Тем. вип. “Проблеми сучасної електротехніки”. – 2010. – Ч.2. – С. 148–153.
10. Гориславец Ю.М., Глухенький О.И. Силовые характеристики індукційної каналної печі з обертальним рухом рідкого металу // Праці Ін-ту электродинамики НАН України. – 2011. – Вип.30. – С. 117–123.
11. Шидловский А.К., Гориславец Ю.М., Глухенький А.И. Электромагнитные системы для дозирования жидких металлов. – Киев. – ИЕД НАН Украины, 2011. – 208 с.
12. Шидловський А.К., Гориславец Ю.М., Глухенький О.И. Підвищення ефективності систем електромагнітного перемішування та рафінування металевих розплавів // Праці Ін-ту электродинамики НАН України. – 2010. – Вип.26. – С. 13–20.
13. Пат. 63413 Україна, МПК F27D 11/00. Спосіб плавлення алюмінію в індукційній каналній печі / А.К. Шидловський, Ю.М. Гориславец, О.И. Глухенький // Промислова власність. – 2011. – Бюл. № 19.
14. Пат. 63435 Україна, МПК C22B 9/00. Спосіб рафінування металевого розплаву / А.К. Шидловський, Ю.М. Гориславец, О.И. Глухенький // Промислова власність. – 2011. – Бюл. № 19.

УДК 621.74: 537.84

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

А.К.Шидловский, академик НАН Украины, **Ю.М.Гориславец**, докт.техн.наук, **А.И.Глухенький**, канд.техн.наук,
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

Приведены результаты исследований электромагнитных систем для создания вращательного движения жидкого металла в электротехнологических установках, полученные при выполнении научно-исследовательской работы “Аспект”. Принцип действия указанных систем основан на использовании собственного магнитного поля или электрического тока, которые функционально присутствуют в таких установках. Рассмотрены два подхода по созданию вращательного движения металла: за счет вращающегося магнитного поля и на основе взаимодействия перекрестных электрического и магнитного полей. Первый подход реализован в индукционных канальных печах, второй – в электродуговых установках. Описаны математические модели для исследования физических процессов в таких системах. Приведены результаты компьютерного моделирования электромагнитных сил и течений жидкого металла в канале индукционной печи и в ванне вакуумно-дуговой печи. Определены электромагнитные, гидродинамические и электродинамические параметры этих систем. В качестве последних выступали удельный электромагнитный момент и усредненная угловая скорость жидкого металла. Кроме того, для индукционной канальной печи с вращательным движением металла проведен анализ сил, действующих на немагнитные включения (частицы), находящиеся в расплаве, а для установки рафинирования расплава исследовано поведение пузырьков рафинирующего газа во вращательном потоке жидкого металла, подлежащего очистке. Библ. 14, рис. 11.

Ключевые слова: жидкий металл, вращательное движение, электромагнитная система, индукционная канальная печь, электродуговая установка, установка для рафинирования расплава, компьютерное моделирование, физическая модель, электромагнитный момент, угловая скорость, немагнитные включения, рафинирующий газ.

ELECTROMAGNETIC SYSTEMS OF ROTATIONAL MOTION OF LIQUID METAL FOR ELECTRO-TECHNOLOGICAL INSTALLATIONS

A.K.Shydlovskiy, Yu.M.Goryslavets, O.I.Glykhenkiy,
Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

The results of researches of electromagnetic systems for creation rotational motion of liquid metal in electro-technological installations, obtained in the performance of research work "Aspect", are given. The principle of operation of these systems is based on the use of the own magnetic field or electric current, that functionally are in such installations. Two approaches to create the motion of metal were used: at the expense of rotating magnetic field and on the basis of interaction crossstab electric and magnetic fields. The first approach is implemented in the induction channel furnaces, the second – in arc electric installations. Mathematical models for the study of physical processes in such systems are described. The results of computer simulation of electromagnetic forces and flow of molten metal in induction channel furnace and bath of vacuum-arc furnaces are given. The electromagnetic, hydrodynamic and electrodynamic parameters of these systems are determined. The specific electromagnetic torque and the average angular velocity of liquid metal were accepted as electrodynamic parameters. In addition, for the induction channel furnace with rotational movement of metal the analysis of forces acting on non-metallic inclusions (particles) that are in melt is carried out, and also for installation for refining of melt the behaviour of bubbles of refining gas in the rotational flow of liquid metal is studied. References 14, figures 11.

Key words: liquid metal, rotational motion, electromagnetic system, induction channel furnace, electric arc installation, installation for refining of melt, computer simulation, physical model, electromagnetic torque, angular velocity, non-metallic inclusions, gas refining.

1. *Goryslavets Yu.M.* Calculation of the resistance induction coils of channel furnaces. // Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2009. – Vol.24. – Pp. 60–66. (Rus)
2. *Goryslavets Yu.M.* Electromagnetic field and parameters of the device of continuous refining of liquid metal // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2008. – No.4. – Pp. 69–74. (Rus)
3. *Goryslavets Yu.M.* Electromagnetic system of rotational motion of liquid metal for induction channel furnaces. // Tekhnichna Elektrodynamika. – 1998. – No.4. – Pp. 12–14. (Rus)
4. *Goryslavets Yu.M.* Computer simulation of induction channel furnaces with rotational motion of liquid metal. // Tekhnichna Elektrodynamika. Tematychnyi vypusk “Problemy suchasnoi elektrotekhniki”. No.6. – 2008. – Pp. 92–95. (Ukr)
5. *Goryslavets Yu.M.* Mathematical modeling of electromagnetic processes in induction channel furnaces // Visnyk Natsionalnogo universytetu “Lvivska politekhika”. – 2007. – No.597. – Pp. 61–65. (Ukr)
6. *Goryslavets Yu.M., Glykhenkii A.I.* Determination of velocity of rotational motion of liquid metal in the device of continuous refining. // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2008. – No.6. – Pp. 60–64. (Rus)
7. *Goryslavets Yu.M., Glykhenkii A.I.* Electrodynamic parameters of the rotational motion of liquid metal of induction channel furnace // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2009. – No.3. – Pp. 35–40. (Rus)
8. *Goryslavets Yu.M., Glykhenkiy O.I.* Experimental investigation rotational motion of liquid metal in channel induction furnace // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2011. – No.4. – Pp. 64–68. (Ukr)
9. *Goryslavets Yu.M., Glykhenkiy O.I.* Behavior of gas bubbles in the channel of electromagnetic system of refining of metal melts // Tekhnichna Elektrodynamika. Tematychnyi vypusk “Problemy suchasnoi elektrotekhniki”. – 2010. – No.2. – Pp. 148–153. (Ukr)
10. *Goryslavets Yu.M., Glykhenkiy O.I.* Power characteristics of induction channel furnace with rotational motion of liquid metal // Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2011. – Vol.30. – Pp. 117–123. (Ukr)
11. *Shidlovskii A.K., Goryslavets Yu.M., Glykhenkii A.I.* Electromagnetic system for batching of liquid metals. – Kyiv: Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine, 2011. – 208 p. (Rus)
12. *Shydlovskiy A.K., Goryslavets Yu.M., Glykhenkiy O.I.* Increase of efficiency of systems of electromagnetic stirring and refining of metallic melts // Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy – 2010. – Vol.26. – Pp. 13–20. (Ukr)
13. Patent 63413 Ukraine, F27D 11/00. Method of melting of aluminum in induction channel furnace / *A.K. Shydlovskiy, Yu.M. Goryslavets, O.I. Glykhenkiy* // Promyslova vlasnist. – 2011. – Biulleten No.19. (Ukr)
14. Patent 63435 Ukraine, C22B 9/00. Method of refining of molten metal / *A.K. Shydlovskiy, Yu.M. Goryslavets, O.I. Glykhenkiy* // Promyslova vlasnist. – 2011. – Biulleten No.19. (Ukr)

Надійшла 19.12.2011

Received 19.12.2011