

УДК 621.74:537.84

**ЕФЕКТИВНІСТЬ УНІВЕРСАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕМІШУВАЧІВ
РІДКОГО МЕТАЛУ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ЧАСТОТИ ЖИВЛЕННЯ**

А.К. Шидловський, академік НАН України, **Ю.М. Гориславець**, докт.техн.наук,
О.І. Глухенький, канд.техн.наук, **О.І. Бондар**
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.
E-mail: ugoris@ied.org.ua

Наведено результати чисельного моделювання електромагнітних і гідродинамічних процесів в електромагнітних системах перемішування рідкого металу з універсальними індукторами, які в залежності від одно- чи багатофазного живлення створюють у ванні печі відповідно двоконтурну або одноконтурну вихрові течії рідкого металу. Чергування у часі зазначених режимів живлення дозволяє більш ефективно перемішувати рідкий метал за рахунок почергової зміни структури вихрової течії. Досліджувалися універсальні індуктори з двома і трьома стрижнями при живленні їх струмами різної частоти. Ефективність перемішування оцінювалася за допомогою середньої в об'ємі ванни печі швидкості рідкого металу. Показано, що в режимі багатофазного (дво- та трифазного) живлення, при якому створюється біжуче магнітне поле, максимальна ефективність перемішування досягається при низьких частотах (2–3 Гц), а при однофазному, коли виникає тільки пульсуюче поле, – при більш високих частотах (20–50 Гц). Установлено, що при однофазному живленні тристрижневого індуктора зменшення частоти струму призводить до реверсу основної течії рідкого металу, чого не відбувається у випадку двострижневого індуктора. Наведено рекомендації щодо вибору оптимальних (раціональних) частот живлення універсальних перемішувачів. Бібл. 9, рис. 7.

Ключові слова: електромагнітне перемішування, рідкий метал, універсальний індуктор, однофазне і багатофазне живлення, пульсуюче і біжуче магнітні поля, одноконтурна і двоконтурна вихрові течії, чисельне моделювання.

Перемішування рідкого металу – одна з важливих технологічних операцій, яка використовується у сучасному металургійному виробництві. Вона дозволяє суттєво покращити якість металу і підвищити продуктивність плавильного та ливарного обладнання [5]. Особливо важливим і необхідним є перемішування в металургійних агрегатах, які призначені для плавлення та приготування металевих сплавів, зокрема сплавів на основі алюмінію [3, 6]. Наразі перемішування рідкого металу в таких агрегатах (печах, міксерах) головним чином здійснюється електромагнітним способом за допомогою перемішувачів, які побудовані на основі лінійних індукторів біжучого магнітного поля, що працюють на промисловій [9] або на понижених [4, 8] частотах.

Раніше нами було запропоновано використати для перемішування металу так звані універсальні індуктори, які в залежності від типу живлення (однофазного чи багатофазного) створюють відповідно пульсуюче або біжуче магнітні поля. Електромагнітні перемішувачі на базі таких індукторів дозволяють реалізувати новий ефективний спосіб електромагнітного перемішування рідкого металу за рахунок використання почергової силової дії цих полів. У випадку прилаштування такого перемішувача до бокової стінки печі він почергово створює в ній двоконтурну і одноконтурну (в плані) вихрові течії рідкого металу. Чергування у часі таких течій дозволяє більш ефективно перемішувати метал завдяки тому, що застійні зони, які виникають в одному режимі живлення, перемішуються в іншому [7].

У роботі [1] на основі мультифізичного моделювання електромагнітних і гідродинамічних процесів у системі "індуктор – рідкий метал" визначено вплив основних конструктивних параметрів на ефективність електромагнітних перемішувачів з універсальними індукторами. В результаті проведеного моделювання було встановлено, що найбільш ефективними перемішувачами, які можуть працювати в зазначених режимах, є перемішувачі з двострижневим та тристрижневим лінійними індукторами. Для кожного з них визначено оптимальні полюсні ділення для різних значень зазору між індуктором і рідким металом, що знаходиться у ванні печі. Зазначені розрахунки виконувалися при живленні індукторів струмами промислової частоти. Проте невирішеним залишилося питання – яким чином частота живлення таких перемішувачів впливає на інтенсивність перемішування рідкого металу у плавильній печі. Розгляду саме цього питання і присвячена представлена робота.

Метою роботи є визначення ефективності універсальних перемішувачів рідкого металу в залежності від частоти їхнього живлення та видача рекомендацій щодо вибору оптимальних (раціональних) значень цієї частоти.

Досліджуються електромагнітні перемішувачі на основі лінійних індукторів, схематично представлених на рис. 1. Це – дво- та тристрижневі індуктори з котушками, розміщеними на кожному стрижні. При живленні їх однофазним струмом вони створюють пульсуюче магнітне поле, а при живленні багатофазним (дво- або трифазним) – біжуче. Стосовно них, по аналогії з роботою [1], проводилося мультифізичне моделювання зв'язаних електромагнітних і гідродинамічних процесів у системі "індуктор–рідкий метал" для відбивної печі, що плавить алюміній, при різних частотах живлення. Моделювання електромагнітного поля в такій системі, як і раніше, здійснювалося у двовимірній постановці у допустимому безіндукційному наближенні, тобто без врахування індукованих за рахунок руху рідкого металу струмів. Для врахування турбулентного характеру руху рідкого металу при електромагнітному перемішуванні в гідродинамічних розрахунках використовувалася $k-\epsilon$ модель турбулентності. Моделювання виконувалося при заданому і однаковому для обох індукторів струмовому навантаженні, тобто при заданих струмах (ампер-витках) в котушках, частота яких змінювалася в діапазоні 0,2 ... 50 Гц.

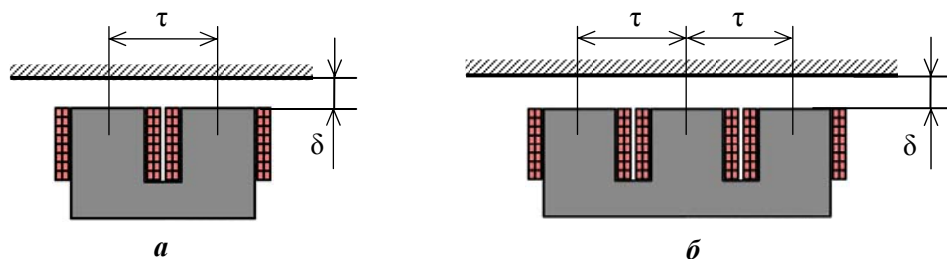


Рис. 1

Сталими величинами були: об'єм рідкого металу (розплаву алюмінію), який склав $2 \times 3 \times 0,5 \text{ м}^3$, індуктор, прилаштований до більшої бокової стінки печі, сумарні ампер-витки усіх котушок кожного індуктора склали 60 кА (амплітудне значення), які рівномірно розподілені по котушках, зазор між індуктором і рідким металом $\delta = 0,1 \text{ м}$, полюсне ділення $\tau = 0,3 \text{ м}$. Решта розмірів індукторів приймалися такими, як і в роботі [1]. Їхні значення відповідно склали: довжина і ширина кожного стрижня – 0,2 м, ширина магнітопроводу – 0,3 м, поперечний переріз кожної котушки – $0,2 \times 0,05 \text{ м}^2$. Висота електромагнітної системи (її розмір по осі z), яка використовувалася для визначення інтегральних параметрів (електромагнітної потужності, інтегральних сил, потужності тепловиділення в рідкому металі та ін.), прийнята рівною висоті рідкого металу в печі, тобто 0,5 м. При багатофазному живленні кути зсуву між струмами сусідніх котушок для кожного індуктора приймалися рівними 120 ел. град., а в однофазному режимі – 180 ел. град.

У результаті послідовного чисельного розв'язання електромагнітної і гідродинамічної задач для кожного індуктора були отримані розподіли питомих електромагнітних сил та швидкості руху рідкого металу, а також визначені їхні інтегральні параметри. Оцінка ефективності обох індукторів проводилася за допомогою інтегральних показників, якими виступали електромагнітні сили $F_x = h_m \int_{S_m} f_x dS$ і $F_y = h_m \int_{S_m} f_y dS$, де f_x і f_y – питомі електромагнітні сили, які наводяться в рідкому металі, S_m і h_m – горизонтальний переріз і висота рідкого металу у ванні печі, а також середня швидкість руху рідкого металу $W = \frac{1}{S_m} \int_{S_m} \sqrt{u_x^2 + u_y^2} dS$.

На рис. 2 представлено результати такого моделювання у вигляді залежностей швидкості рідкого металу W від частоти струмів живлення ν для двострижневого (рис. 2, а) і тристрижневого (рис. 2, б) індукторів. На цих рисунках криві, позначені цифрою 1, належать до режиму багатофазного живлення, за яким у результаті дії біжучого магнітного поля у ванні печі виникає рух рідкого металу у вигляді одноконтурної вихрової течії. Криві, позначені цифрою 2, належать до режиму однофазного живлення індукторів, в результаті якого за рахунок дії пульсуючого магнітного поля у ванні створюється двоконтурна течія.

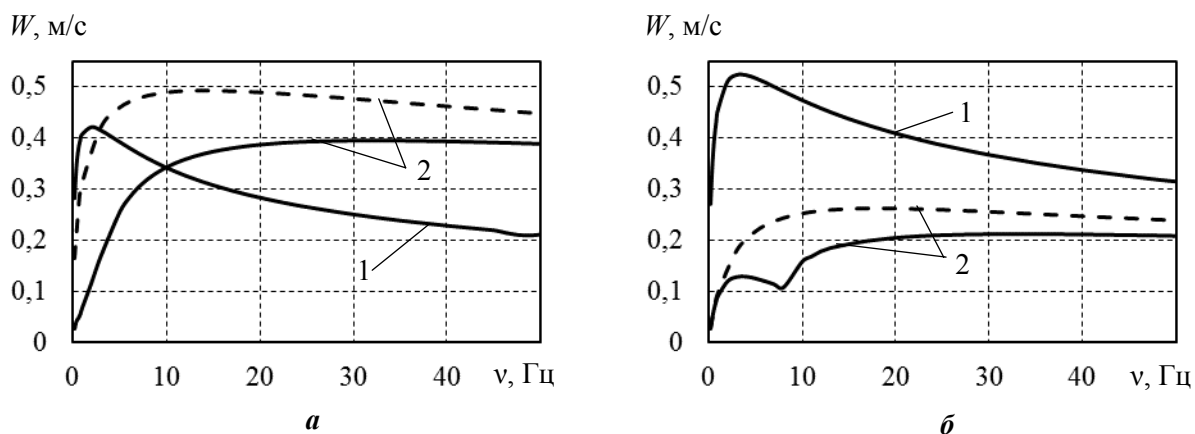


Рис. 2

Характеризуючи режим багатофазного живлення універсальних індукторів, слід відзначити суттєву залежність швидкості металу від частоти. Максимальні значення її досягаються при низьких частотах (на рівні 2–3 Гц), що характерно і для класичних індукторів з біжучим магнітним полем. Що стосується режиму однофазного живлення, коли створюється пульсуюче магнітне поле, ці залежності мають зовсім інший вигляд. У діапазоні частот від ~20 до 50 Гц середня швидкість рідкого металу у ванні печі змінюється несуттєво для обох індукторів, проте нижче цього діапазону вона при зменшенні частоти спадає до нуля (суцільні криві 2 на рис. 2).

Порівнюючи між собою обидва індуктори, слід також зазначити, що в режимі багатофазного живлення більш ефективним (виходячи з середньої швидкості W) у всьому діапазоні частот, що досліджувався, є тристрижневий індуктор, в той час як у режимі однофазного живлення, навпаки – більш ефективним виявився двострижневий індуктор.

Цікавою обставиною, яка була виявлена у процесі розрахунків, є особлива поведінка тристрижневого перемішувача в режимі однофазного живлення на частотах нижче 15 Гц (див. суцільну криву 2 на рис. 2, б). Дослідження гідродинамічних течій рідкого металу, що виникають при дії цього перемішувача, показує, що в діапазоні частот від 15 до 10 Гц виникає реверс основної вихрової течії. На рис. 3 для різних значень частоти струму представлено структури течій рідкого металу у ванні печі для такого перемішувача. Рис. 3, а отримано на частоті 17 Гц, рис. 3, б – на 11 Гц, і рис. 3, в – на 7 Гц (внаслідок симетрії вихрових течій при такому живленні на цих рисунках представлено тільки половину ванни печі).

Вперше таке явище, тобто реверс руху рідкого металу при зміні частоти струму живлення, було виявлено нами для індуктора пульсуючого магнітного поля, який мав тристрижневий індуктор з

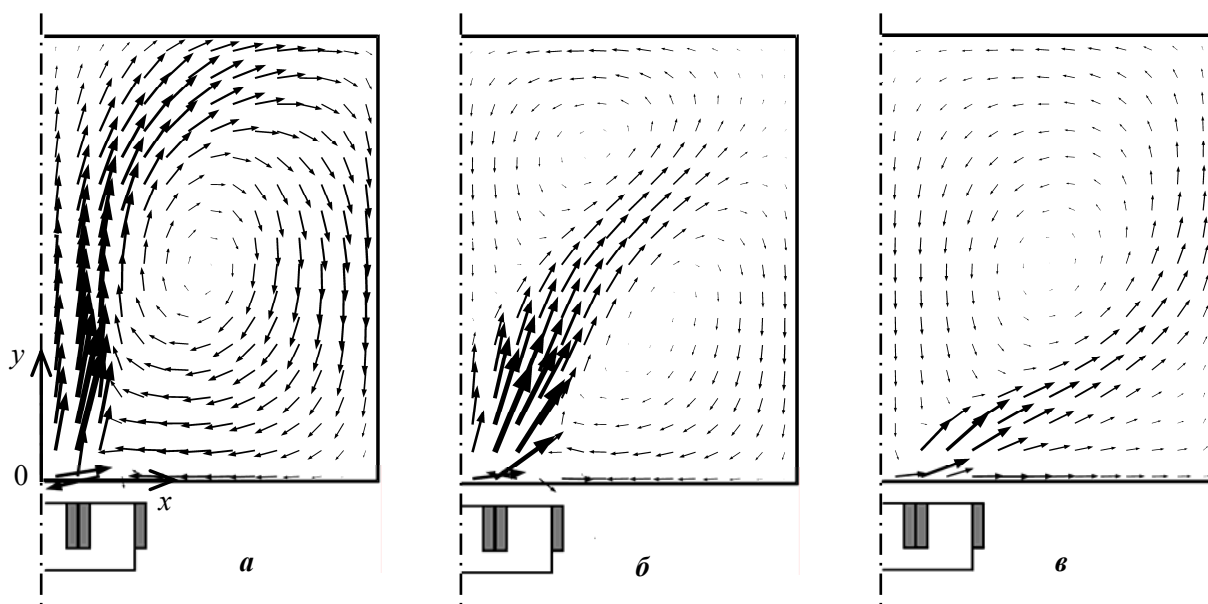


Рис. 3

однією котушкою, розміщеною на середньому стрижні магнітопроводу [2]. Пояснення причини виникнення цього явища ґрунтувалося на різному впливі на рідкий метал окремо нормальних f_y і тангенціальних f_x електромагнітних сил у залежності від частоти. Із зменшенням частоти інтегральна сила F_y для цього індуктора спадає, а сила F_x зростає (до частоти приблизно 10 Гц). Спробуємо з цих самих позицій з'ясувати причини такої поведінки швидкості W для тристрижневого індуктора з трьома котушками при однофазному живленні і отримати відповідь на питання, чому, на відміну від цього індуктора, таке явище не виникає у випадку двострижневого індуктора?

Насамперед зазначимо, як і у випадку індуктора пульсуючого магнітного поля, кожний універсальний індуктор при однофазному живленні створює у рідкому металі нормальні f_y і тангенціальні f_x електромагнітні сили. На рис. 4 представлено розподіл цих сил на стінці ванни печі, до якої прилаштовано індуктор, окремо для двострижневого (рис. 4, а) і тристрижневого (рис. 4, б) індукторів при $\nu = 50$ Гц. Нормальні сили f_y створюють рух металу у напрямку від індуктора до протилежної стінки ванни печі, який, у свою чергу, і породжує двоконтурну (у плані ванни) вихрову течію. Тангенціальні сили, як видно з рис. 4, суттєво менші нормальних сил. Відношення максимальних значень цих сил до нормальних приблизно складає 0,025 для обох індукторів. Незважаючи на це, а також на те, що інтеграл цих сил, тобто інтегральна сила F_x для всієї ванни дорівнює нулю, їхній вплив на рух металу може бути суттєвим. Як правило, дія тангенціальних сил спрямована проти основної течії, створеної нормальними силами, а тому вони послаблюють її.

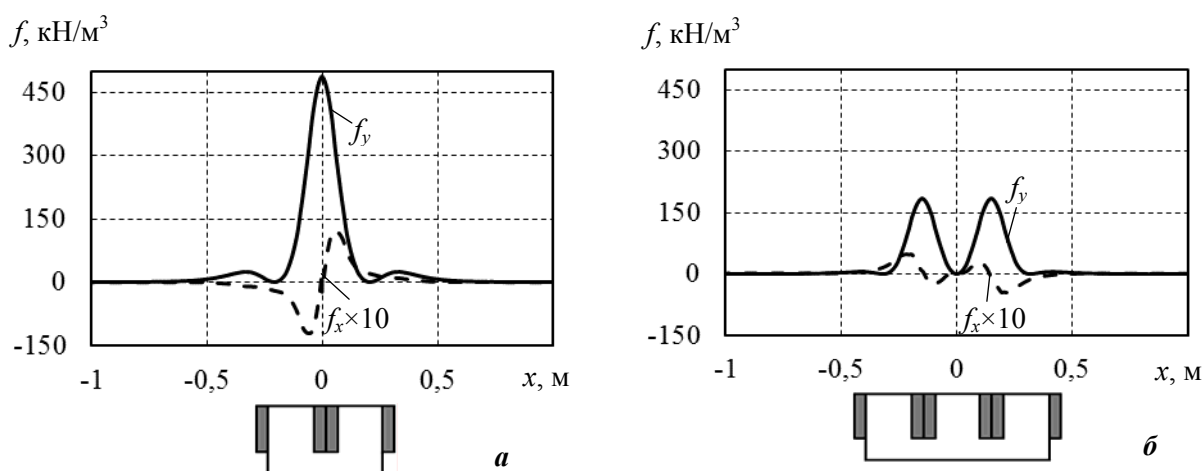


Рис. 4

На рис. 2 пунктирними кривими позначено залежності середньої швидкості рідкого металу, отримані для обох індукторів за умови $f_x = 0$, яка штучно була прийнята в розрахунках. Дійсно, у цьому випадку середня швидкість металу збільшується. Цікавим при цьому є те, що як при дії двострижневого, так і тристрижневого індукторів не виникає реверс руху рідкого металу. Це дозволяє дійти висновку, що причиною реверсу є наявність тангенціальних сил, які за певних умов можуть до цього призвести.

Для того, щоб оцінити внесок кожної складової електромагнітних сил у створенні руху рідкого металу, доцільно перейти до аналізу електромагнітного тиску, що розвивається у рідкому металі в результаті дії цих сил. Слід зазначити, що під електромагнітним тиском зазвичай розуміється тиск, що створюється електромагнітними силами в нерухомому рідкому електропровідному середовищі. Хоча цей тиск є результатом дії всіх сил (і нормальних, і тангенціальних), його умовно (для якісних оцінок) можна представити у вигляді двох складових, які створюються окремо нормальними і тангенціальними силами,

$$p_{fy} = \int_0^a f_y dy \quad \text{і} \quad p_{fx} = \int_0^{b/2} f_x dx,$$

де a – ширина ванни печі (менша сторона), b – довжина ванни (більша сторона).

На рис. 5 і 6 представлено розподіли електромагнітного тиску, створеного нормальними f_y і тангенціальними f_x електромагнітними силами, для різних значень частоти струму в котушках для двострижневого (рис. 5, а і рис. 6, а) і тристрижневого (рис. 5, б і рис. 6, б) індукторів. Із цих рисунків видно, що максимальні значення електромагнітного тиску $p_{fy \max}$, який створюється нормальними силами, для

двострижневого індуктора знаходяться при $x = 0$ (на осі симетрії), а для тристрижневого – при $x \approx \pm\tau/2$. Максимальні значення електромагнітного тиску $p_{fx\max}$, який створюється тангенціальними силами, для обох індукторів знаходяться при $y = 0$, тобто на стінці ванни печі, до якої прилаштовано індуктор.

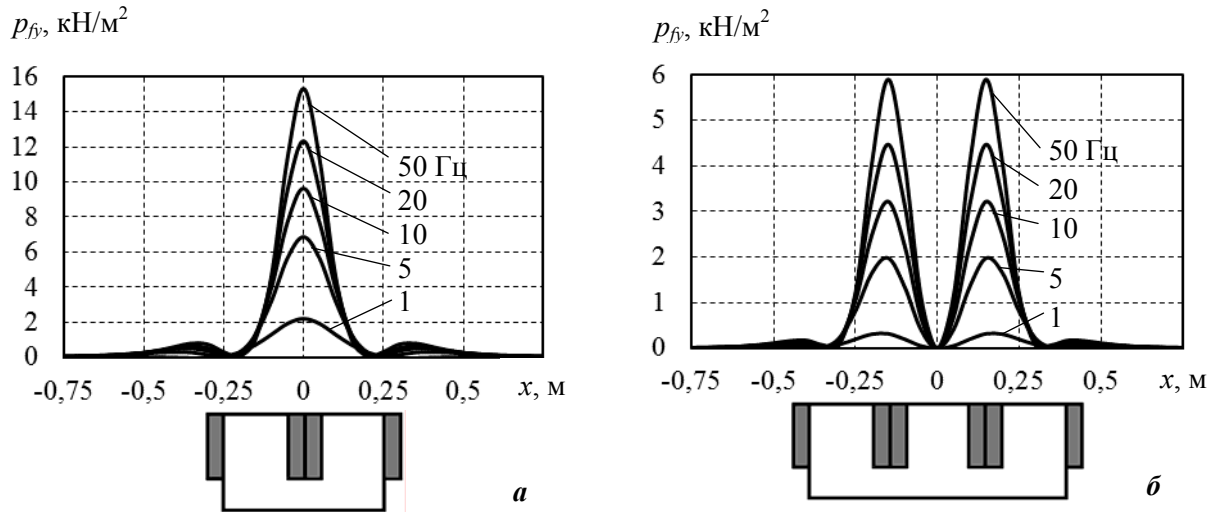


Рис. 5

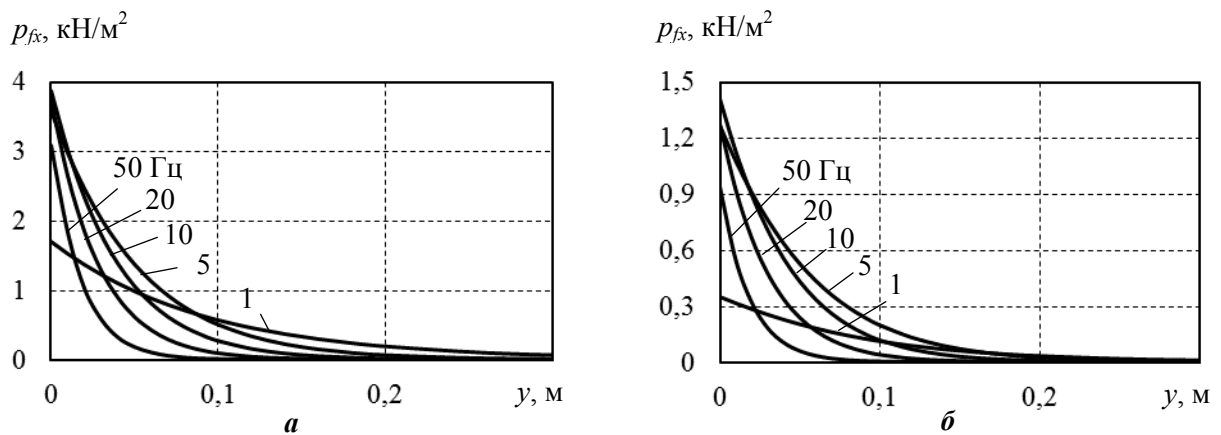


Рис. 6

Для того, щоб оцінити вплив тангенціальних сил на інтенсивність руху рідкого металу, розглянемо співвідношення максимальних тисків $p_{fx\max}$ і $p_{fy\max}$ для кожного індуктора. На рис. 7 в залежності від частоти струму живлення наведено відношення цих тисків $p_{fx\max}/p_{fy\max}$ для двострижневого (крива 1) і для тристрижневого (крива 2) індукторів. Як бачимо, незважаючи на те, що нормальні сили f_y більш ніж на порядок перевершують тангенціальні сили f_x (див. рис. 4), внесок останніх у створення електромагнітного тиску виявився значним. На частоті 50 Гц вони збуджують тиск, який складає майже 20% від тиску, що утворюють нормальні сили. Як слідує з рис. 7, із зменшенням частоти відносний внесок тангенціальних сил збільшується для обох індукторів. Проте, якщо для частот, більших ~ 15 Гц, внесок тангенціальних сил є дещо більшим для двострижневого індуктора, то для частот, менших ~ 15 Гц, цей внесок стає більшим для тристрижневого індуктора, особливо в області малих частот. Так, наприклад, при $\nu = 2$ Гц електромагнітний тиск, зумовлений тангенціальними силами, уже складає приблизно 1,1 від тиску, який створюють нормальні сили, тобто перевершує

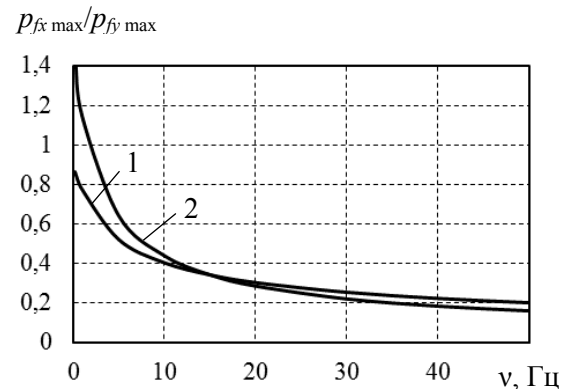


Рис. 7

останній. Для двострижневого індуктора при цій самій частоті відношення зазначених тисків знаходиться лише на рівні 0,7.

Саме за рахунок цієї відмінності і можна пояснити, чому тангенціальні електромагнітні сили в рідкому металі у випадку тристрижневого індуктора при однофазному живленні на малих частотах сильніше ніж у випадку двострижневого впливають на структуру вихрової течії, що в кінцевому результаті призводить до реверсу основного вихрового руху рідкого металу у ванні печі.

У випадку двострижневого індуктора, як показали розрахунки, внесок тангенціальних сил не є достатнім, щоб змінити течію рідкого металу, яка в основному формується нормальними електромагнітними силами.

Отримані результати дозволяють сформулювати рекомендації щодо вибору частоти живлення універсальних перемішувачів на основі дво- і тристрижневих індукторів, котрі можуть бути використані для реалізації нового способу електромагнітного перемішування рідкого металу в плавильних агрегатах, що полягає у почерговій дії пульсуючого і біжучого магнітних полів. Зрозуміло, що оскільки в режимі біжучого магнітного поля оптимальними для таких перемішувачів є низькі значення частоти (на рівні 2–3 Гц), а в режимі пульсуючого поля такими є більш високі значення (на рівні 20–50 Гц), то одним із варіантів їхнього живлення може бути такий, за яким багатofазне живлення здійснюється від напівпровідникового перетворювача частоти (при низьких частотах), а однофазне – безпосередньо від електричної мережі на промисловій частоті.

Можливий і більш простий варіант, коли обидва режими реалізуються на частоті 50 Гц. Переваги цього варіанту очевидні, оскільки для нього не потрібне додаткове обладнання у вигляді перетворювача частоти. Проте потрібно зазначити, що при такому живленні ефективність перемішування металу в режимі біжучого магнітного поля буде дещо меншою від максимально можливої. Але оскільки на цій частоті середні швидкості рідкого металу для обох режимів не дуже відрізняються один від одного, це означає, що ефективність перемішування металу буде приблизно однаковою як при одному, так і при другому режимах живлення.

Висновки.

1. Для універсальних електромагнітних перемішувачів рідкого металу з дво- та тристрижневими лінійними індукторами, котрі в залежності від типу живлення (однофазного або багатofазного) почергово створюють пульсуюче і біжуче магнітні поля, встановлено залежності середньої швидкості вихрового руху рідкого металу у ванні печі від частоти струму живлення.

2. Виявлено реверс вихрової течії рідкого металу зі зміною частоти струму для електромагнітного перемішувача із тристрижневим індуктором у режимі однофазного живлення.

3. Викладено рекомендації щодо вибору оптимальних (раціональних) частот живлення універсальних перемішувачів рідкого металу для плавильних агрегатів.

1. Бондар О.І., Глухенький О.І., Гориславець Ю.М. Визначення основних конструктивних параметрів універсальних перемішувачів рідкого металу // Праці ІЕД НАНУ. – 2017. – Вип. 46. – С. 119-126.

2. Глухенький А.И., Гориславец Ю.М., Токаревский А.В. Трёхмерное моделирование однофазного электромагнитного перемешивателя жидких металлов // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 5. – С. 77-84.

3. Дубоделов В.И., Фиксен В.Н., Горюк М.С., Слажнев Н.А., Скоробагатько Ю.П. Современные устройства для электромагнитного перемешивания алюминиевых расплавов в печах и миксерах повышенной емкости // Металл и литье Украины. – 2008. – № 6. – С. 12-17.

4. Павлов Е.А., Боговалов С.В., Тимофеев В.Н., Надточий Д.С. Магнитогидродинамическое перемешивание алюминиевых расплавов в миксерах сопротивления // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. – С. 201-205.

5. Тир Л.Л., Столов М.Я. Электромагнитные устройства для управления циркуляцией расплава в электропечах. – М.: Металлургия, 1991. – 280 с.

6. Электромагнитное перемешивание (ЭМП) расплава алюминия. Available at: <http://ontecom.com>

7. Dubodolov V.I., Gorislavets Y.M., Glukhenkyi A.I., Fikssen V.M. Electromagnetic stirrer of liquid metal with alternate action of travelling and pulsating magnetic fields // Proceedings of the 8th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials EPM2015. – October 12-16, 2015. – Cannes, France. – Pp. 605-608.

8. <http://new.abb.com/metals/abb-in-metals/offering/products/metallurgy-products/electromagnetic-stirrers-and-breaks-for-steel/lf-ems-for-ladle-furnace-operation>

9. Non ferrous casting: Equipment MHD Technology. – Riga, Latvia: Krāsainie lējumi, 2004. – 22 p.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ УНИВЕРСАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЕЙ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЧАСТОТЫ ПИТАНИЯ

А.К. Шидловский, академик НАН Украины, **Ю.М. Гориславец**, докт.техн.наук, **А.И. Глухенький**, канд.техн.наук, **А.И. Бондар**
Институт электродинамики НАН Украины,
 пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина. E-mail: ugoris@ied.org.ua

Приведены результаты численного моделирования электромагнитных и гидродинамических процессов в электромагнитных системах перемешивания жидкого металла с универсальными индукторами, которые в зависимости от одно- или многофазного питания создают в печи соответственно двухконтурное или одноконтурное вихревые течения жидкого металла. Чередование во времени указанных режимов питания позволяет более эффективно перемешивать жидкий металл за счет поочередной смены структуры вихревого течения. Исследовались универсальные индукторы с двумя и тремя стержнями при питании их токами разной частоты. Эффективность перемешивания оценивалась с помощью средней в объеме ванны печи скорости жидкого металла. Показано, что в режиме многофазного (двух- и трехфазного) питания, при котором создается бегущее магнитное поле, максимальная эффективность перемешивания достигается при низких частотах (2–3 Гц), а при однофазном, когда возникает только пульсирующее поле, – при более высоких частотах (20–50 Гц). Установлено, что при однофазном питании трехстержневого индуктора уменьшение частоты тока приводит к реверсу основного течения жидкого металла, чего не происходит в случае двухстержневого индуктора. Приведены рекомендации по выбору оптимальных (рациональных) частот питания универсальных перемешивателей. Библ. 9, рис. 7.

Ключевые слова: электромагнитное перемешивание, жидкий металл, универсальный индуктор, однофазное и многофазное питания, пульсирующее и бегущее магнитные поля, одноконтурное и двухконтурное вихревые течения, численное моделирование.

EFFICIENCY OF UNIVERSAL ELECTROMAGNETIC STIRRERS OF LIQUID METAL DEPENDING ON FREQUENCY OF POWER SUPPLY

A.K. Shydlovskiy, Y.M. Gorislavets, O.I. Glukhenkiy, O.I. Bondar
Institute of Electrodynamics of the National Academy of Science of Ukraine,
 Peremohy av., 56, Kyiv, 03057, Ukraine. E-mail: ugoris@ied.org.ua

Results of numerical modelling of electromagnetic and hydrodynamic processes in electromagnetic systems of stirring of liquid metal with universal inductors, that depending on single or multiphase power supply creates in furnace bath dual circuit or single circuit vortex flows of liquid metal respectively have been shown. Changing during time such modes of power supply allow to stir liquid metal more efficiently due to alternating changing of structure of vortex flow. Two and three core universal inductors with different power supply frequency were investigated. Effectiveness of stirring was estimated with the help of average velocity of liquid metal in the volume of furnace bath. It was shown that in the mode of multiphase (two and three phase) power supply, at which travelling magnetic field is created, maximal effectiveness of stirring reached at low frequencies (2-3 Hz), while in single phase mode, when only pulsed field is created, – at higher frequencies (20-50 Hz). It was found that during single phase power supply of three core inductor decreasing of frequency of current results in reverse of main flow of liquid metal, what not happens in the case of two core inductor. Recommendations on selection of optimal (rational) power supply frequency of universal stirrers are shown. References 9, figures 7.

Key words: electromagnetic stirring, liquid metal, universal inductor, single phase and multiphase power supply, pulsed and travelling magnetic fields, single circuit and dual circuit vortex flows, numerical modelling.

1. Bondar O.I., Glukhenkiy O.I., Gorislavets Y.M. Determining of basic design parameters of universal stirrers of liquid metal // Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2017. – Iss. 46. – Pp. 119-126. (Ukr)
2. Glukhenkiy O.I., Gorislavets Y.M., Tokarevskiy A.V. Three dimensional modelling of single phase electromagnetic stirrer of liquid metals // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2013. – No 6. – Pp. 77-84. (Rus)
3. Dubodelov V.I., Fiksen V.M., Goriuk M.S., Slazhnev N.A., Skorobahatko Y.P. Modern devices for electromagnetic stirring of aluminium melts in furnaces and mixers of extended capacity // Metall i Litie Ukrainy. – 2008. – No 6. – Pp. 12-17. (Rus)
4. Pavlov E.A., Bogovalov S.V., Timopheev V.N., Nadtochiy D.S. Magnetohydrodynamic stirring of aluminum melts in resistance mixers // Vestnik Sibirskogo Gosudarstvennogo Aerokosmicheskogo Universiteta. – 2006. – No 5. – Pp. 201-205.
5. Tir L.L., Stolov M.Y. Electromagnetic devices to control the circulation of the melt in electric furnaces. – Moskva: Metallurgiya, 1991. – 280 p. (Rus)
6. Electromagnetic stirring (EMS) of aluminum melt. Available at: <http://ontecom.com> (accessed 10.05.2017)
7. Dubodelov V.I., Gorislavets Y.M., Glukhenkiy A.I., Fiksen V.M. Electromagnetic stirrer of liquid metal with alternate action of travelling and pulsating magnetic fields // Proceedings of the 8th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials EPM2015. – October 12-16, 2015. – Cannes, France. – Pp. 605-608.
8. <http://new.abb.com/metals/abb-in-metals/offering/products/metallurgy-products/electromagnetic-stirrers-and-breaks-for-steel/lf-ems-for-ladle-furnace-operation>
9. Non ferrous casting: Equipment MHD Technology. – Riga, Latvia: Krāsainie lējumi, 2004. – 22 p.

Надійшла 17.05.2017
 Остаточний варіант 23.05.2017