

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ РІДКОГО МЕТАЛУ В ІНДУКЦІЙНІЙ КАНАЛЬНІЙ ПЕЧІ

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

На фізичній моделі індукційної каналної печі досліджено структуру обертального руху рідкого металу в циліндричних каналах. Отримано розподіл швидкості обертання металу по радіусу та довжині каналу печі. Експериментальним шляхом показана можливість інтенсифікації тепло-масообміну в індукційній печі з обертальним рухом металу за рахунок підсилення вихрового руху рідкого металу в поздовжніх перетинах циліндричних каналів та виникнення транзитної течії в каналній частині печі. Бібл. 7, рис. 5.

Ключові слова: індукційна канална піч, обертальний рух рідкого металу, фізичне моделювання, швидкість металу, тепло-масообмін.

Обертальний рух рідкого металу найбільш доцільно створювати в каналах індукційних плавильних печей для плавки алюмінію та сплавів на його основі. Особливістю плавки цього металу є те, що він внаслідок своєї високої хімічної активності інтенсивно окислюється, що призводить до забруднення розплаву твердими та газоподібними неметалевими домішками. Це суттєво знижує якість розплавленого металу, а також погіршує роботу печі. Неелектропровідні частинки, виринаючи в полі електромагнітних сил, рухаються у напрямку стінок каналів і осідають на їхній поверхні, що призводить до “заростання” каналів. Особливо інтенсивно цей процес протікає при плавці алюміній-магнієвих сплавів, що змушує виконувати механічну чистку каналів печі практично після кожної плавки [5].

Усунути це небажане явище можна, компенсуючи радіальні електромагнітні сили в каналі іншими масовими силами, наприклад, механічними, що виникають при обертальному русі рідкого металу. Під дією такого руху легкі за масою частинки (ними є оксиди алюмінію або магнію з адсорбованим воднем), рухаючися по спіральних траєкторіях, переміщуються (мігрують) не до стінки циліндричного каналу, як звичайно, а до його осі. Такий рух частинок призводить до їхніх зіткнень та коагуляції з утворенням оксидних конгломератів. Видалення останніх з розплаву дозволяє у процесі плавлення металу очищати його від неметалевих домішок, поліпшуючи якість алюмінієвих сплавів.

Ще однією перевагою таких печей є здатність обертального руху металу перемішувати розплав у ванні та інтенсифікувати тепло-масообмін у печі за рахунок підсилення замкнених вихрових течій у поздовжніх перерізах каналів. За деяких умов можливе також виникнення транзитної течії розплаву в каналній частині печі, що є, особливо дієвим засобом передачі тепла від каналів до ванни печі.

Обертальний рух рідкого металу в циліндричних каналах печей можна створити різними способами. Найбільш просто та ефективно його можна отримати за рахунок обертального магнітного поля, утвореного індуктором (робочою котушкою) та однією або декількома додатковими котушками. В [1] описано електромагнітні системи, які спроможні створити такий рух у каналах печі. Додаткові котушки цих систем розміщують зверху на індукторі або намотують на бокові ярма феромагнітного осердя (магнітопроводу). Можливе виконання цих котушок також у вигляді сідловидних котушок, які охоплюють циліндричні канали печі.

У роботах [2,4] проведено комп'ютерне моделювання електромагнітних та гідродинамічних процесів в індукційній каналній печі з обертальним рухом рідкого металу. В результаті цього моделювання було встановлено, що обертальний рух розплаву в циліндричному каналі печі не є осесиметричним, тобто центр його обертання не співпадає з віссю каналу. Було отримано розрахункові залежності електродинамічних параметрів такої печі (питомого електромагнітного моменту та усередненої кутової швидкості рідкого металу в каналах) від ампер-витків індуктора і додаткової котушки, а також від живлячої напруги печі.

Метою цієї роботи є експериментальне дослідження обертального руху рідкого металу в циліндричних каналах плавильної печі, визначення параметрів такого руху, а також встановлення впливу його на теплообмінні процеси в каналній печі.

Дослідження проводили методом фізичного моделювання. Для цього було створено фізичну модель індукційної каналної печі для плавки алюмінію типу ІАК (рис. 1). Канальна частина цієї печі, що складається із двох циліндричних каналів круглого перерізу 1 і 2 та сполучного каналу 3, приєднана до ванни печі 4. Для збудження електричного струму в рідкому металі застосовують індуктор 5 з магнітопроводом 6, який охоплює один із циліндричних каналів. Фізична модель виконана в масштабі 1:3 по відношенню до промислової печі; як моделюючий метал використовувався галій, що має температуру плавлення біля 30°C . З метою дотримання подібності електромагнітного поля модель живили напругою підвищеної частоти (~ 500 Гц).

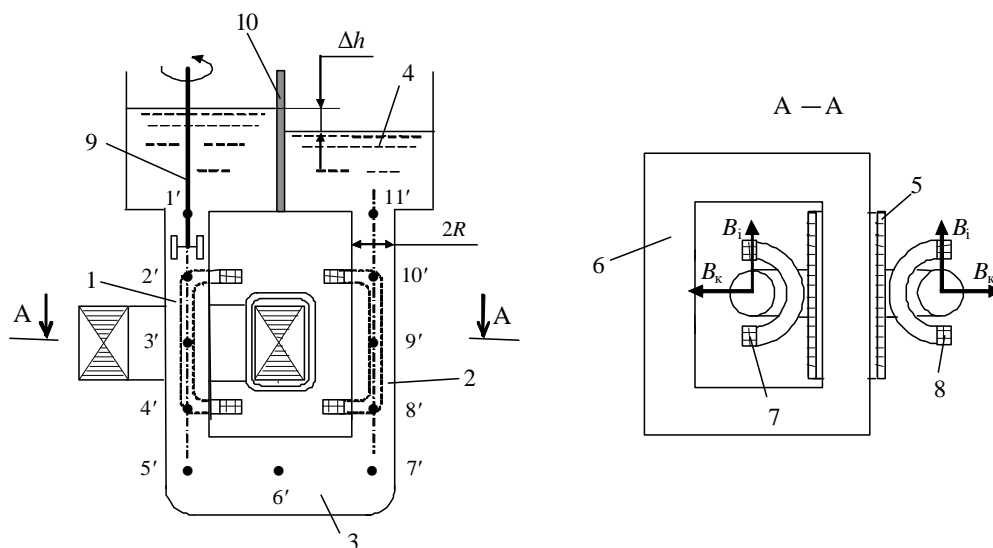


Рис. 1

Метал у циліндричних каналах моделі обертало за допомогою обертального магнітного поля, створеного полем розсіювання індуктора і полем додаткових (сідловидних) котушок 7 і 8, установлених біля кожного циліндричного каналу. Магнітне поле кожної котушки B_k у зоні циліндричного каналу зсунуто у просторі та за фазою на 90 град відносно поля індуктора B_i . Виконання електромагнітної системи у вигляді двох сідловидних котушок на відміну від котушки, яка розміщена на індукторі, дозволяє керувати обертальним рухом незалежно у кожному циліндричному каналі.

Швидкість обертання рідкого металу в каналах вимірювали за допомогою електромагнітного давача (контактного зонду з постійним магнітом) [7] та соосно установленій в каналі гідродинамічної вертушки (поз.9 на рис. 1), яка виконана із немагнітної сталі. Вона має три лопаті, що зсунуті одна відносно іншої на 120 град. Розміри кожної лопаті – 2×4 мм (діаметр каналу моделі – $d = 2R = 52$ мм).

На рис. 2 показано розподіл (профіль) азимутальної швидкості металу u_ϕ по радіусу каналу, отриманий на моделі при ампер-витках індуктора $I_{iW_i} = 3$ кА та ампер-витках додаткової котушки $I_{kW_k} = 1$ кА ($I_{iW_i}/I_{kW_k} = 3$). Вимірювання, проведені за допомогою електромагнітного давача (темні точки), показують, що обертання металу в циліндричному каналі печі дійсно не є осесиметричним, що зумовлено неоднорідним розподілом по кутовій координаті ϕ азимутальних електромагнітних сил f_ϕ . Це підтверджується результатами комп'ютерного моделювання обертального руху рідкого металу в каналах печі та пристрою для безперервного рафінування металевих розплавів, побудованого на базі каналної печі [3]. Вісь його обертання зсунута відносно циліндричного каналу в бік індуктора. Вимірювання швидкості відбувалося за допомогою вертушки, яка облаштовувалася лопатями, що встановлювалися на різних відстанях від осі давача (світлі точки на рис. 2). Зрозуміло, що визначити такою вертушкою зазначену несиметрію в розподілі u_ϕ неможливо. Тим не менш, як видно з рисунка, результати, отримані за допомогою обох давачів, досить близькі.

Розподіл швидкості u_ϕ по довжині (осі z) циліндричних каналів печі представлено на рис. 3. Ці дані отримані вертушкою на відстані $r/R = 0,9$ від осі каналу для лівого (крива 1) та правого (крива 2) циліндричних каналів. Відмінність лівого і правого каналів, як видно з рис. 1, полягає в тім, що перший з них охоплений магнітопроводом, а другий – ні. Оскільки магнітне поле розсіювання індуктора в лівому каналі дещо більше, ніж в правому, швидкість u_ϕ в ньому вища.

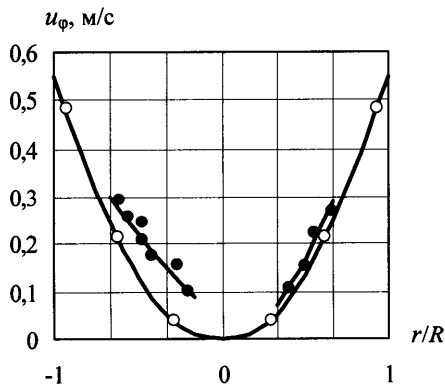


Рис. 2

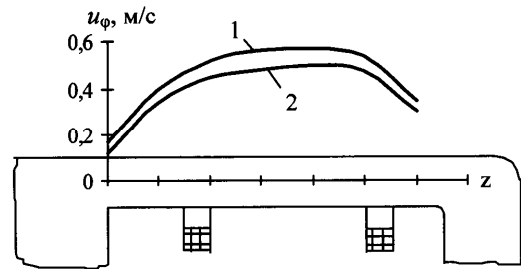


Рис. 3

Проведені дослідження показали, що швидкість обертання рідкого металу в циліндричних каналах печі за всіх інших однакових умов залежить від струму в індукторі I_1 (струму в каналі), струму в додаткових котушках I_k та фазового зсуву між ними ψ . Максимально досягнута на моделі кутова швидкість металу $\Omega = u_\phi/r$ (для $r/R = 0,9$) склала біля 60 1/с (~600 об/хв; $u_\phi \approx 1,5$ м/с біля стінки каналу). Це значення одержано при $I_1 w_1 = 5$ кА, $I_k w_k = 3$ кА і $\psi = 90$ ел.град. Отримана на моделі залежність швидкості u_ϕ від струму в каналі (при $I_1 w_1 / I_k w_k = \text{const}$) практично лінійна, що свідчить про незначний внесок в загальне електромагнітне поле моделі індукваного за рахунок швидкості металу електричного поля [2].

У зв'язку з необхідністю створення обертального руху рідкого металу в каналах печей цікавим є питання – чи може такий рух спричинити вихрові течії в поздовжніх перетинах циліндричних каналів, а також чи можливе виникнення в цьому випадку транзитної течії металу в каналній частині печі? Для вивчення цього питання було проведено досліди на фізичній моделі печі з встановленою у її ванні герметичною електропровідною перегородкою (поз.10 на рис. 1). Вони показали, що наявність в одному з каналів обертального руху призводить до появи перепаду рівнів рідкого металу Δh по обидві сторони від перегородки, який залежить від кутової швидкості обертання. Із збільшенням цієї швидкості перепад рівнів росте. Таким чином, циліндричний канал з обертальним рухом металу нагадує своєрідний насос, причому насосний ефект цього каналу не залежить від напрямку обертання металу в ньому. Кожний канал качає метал вгору (у ванну) при будь-якому напрямку обертання. Якщо обертання металу створювали тільки в одному каналі, то рівень металу був вищим над тим каналом, де обертали метал. У тому випадку, коли обертання відбувалося одночасно в обох каналах, рівень металу був вищим над охопленим каналом, оскільки при однакових значеннях ампер-витків додаткових котушок обертання в ньому має більшу швидкість. Таким чином, обертальний рух розплаву в циліндричних каналах печі створює натиск, який за відсутності перегородки повинен викликати транзитну течію.

Появу насосного ефекту каналу можна пояснити наявністю ділянок каналу, в яких існує градієнт кутової швидкості по довжині каналу $\partial\Omega/\partial z \neq 0$. Такими ділянками є зони стику циліндричного каналу з нижнім сполучним каналом та ванною печі. Оскільки значення зазначеного градієнта на цих ділянках різні (див. рис. 3), сумарний натиск усього каналу буде відмінним від нуля. Якщо натиски, створені кожним циліндричним каналом, не врівноважують один одного, у каналній частині печі виникає транзитна течія. Очевидно, що така течія повинна інтенсифікувати тепло-масообмін у печі. Для підтвердження цього припущення фізичну модель облаштували термопарами, які встановлювали в місцях, позначених на рис. 1 точками (1'...11').

На рис. 4 показано розподіл відносної температури рідкого металу в каналах моделі печі $T - T_b$ (T_b – температура металу в ванні) при наявності електропровідної перегородки (рис. 4, а) й без неї (рис. 4, б) для $I_1 w_1 = 5$ кА і $I_k w_k = 3$ кА. Активна потужність, що споживалась моделлю в процесі цього експерименту, підтримувалася постійною – 6 кВт. Позначення кривих на цьому рисунку: 1 – без обертання рідкого металу; 2 і 3 – з обертанням металу в охопленому і неохопленому магнітопроводом каналах відповідно; 4 – з обертанням в обох каналах. По осі абсцис відкладено номери термопар згідно з рис. 1.

Істотне зниження температури металу в каналах моделі без перегородки при обертанні його в одному каналі, а також характер відповідних кривих (криві 2 і 3 на рис. 4, б) дозволяють зробити висновок, що при наявності обертання металу в одному із циліндричних каналів виникає транзитна течія металу в каналній частині печі, завдяки якій метал із ванни надходить в канал, де відсутній обертальний рух, а залишає каналну частину через канал з обертальним рухом металу.

При наявності обертання металу в обох каналах, незважаючи на те, що температура розплаву в каналах знижується у порівнянні з випадком, коли обертання відсутнє, загальний рівень температури металу в каналах моделі з перегородкою і без неї приблизно однаковий (порівн. криві 4 на рис. 4, а і 4, б). Останнє дозволяє припустити, що обертальний рух металу викликає не тільки транзитну течію у каналній частині печі, але й підсилює вихровий рух металу в поздовжніх перетинах циліндричних каналів, інтенсифікуючи таким чином масообмін з ванною. Метал при цьому поступає із ванни в кожний канал через осьову зону, розкручується там і залишає його біля стінки.

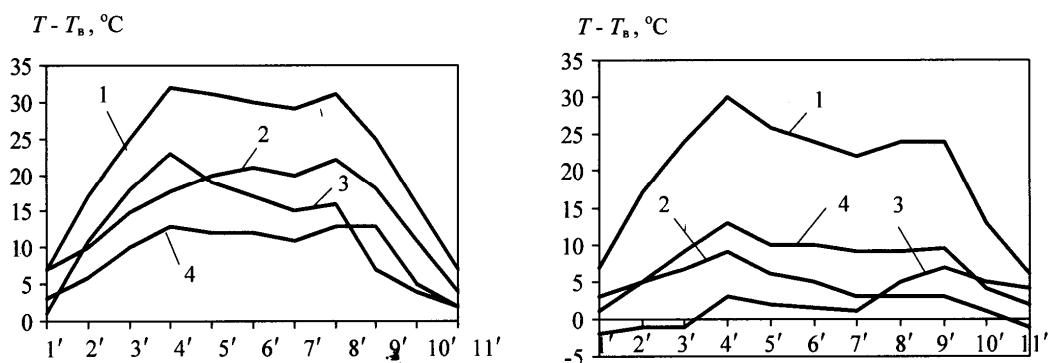


Рис. 4, а, б

На рис. 5 для тих самих чотирьох випадків представлені значення відносної температури $\Theta = (T_{\max} - T_{\min}) / (T_{\text{ум}} - T_{\text{пл}})$ залежно від параметра $M = \mu_0(I_i w_i)^2 / (\rho g d^3)$, де T_{\max} і T_{\min} – максимальна і мінімальна температури металу в каналах, $T_{\text{ум}}$ – умовна температура в середній частині каналу, яка визначена за умови, що теплопередача в каналах відбувається тільки за рахунок теплопровідності [6], $T_{\text{пл}}$ – температура плавлення металу, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, ρ – густина рідкого металу, g – прискорення сил тяжіння. Рис. 5, а відображує процеси у моделі з перегородкою у ванні, а рис. 5, б – у моделі без перегородки. Усі криві на рисунку отримано при $I_i w_i / I_k w_k = 3$. Їхнє цифрове позначення таке саме, як і на рис. 4.

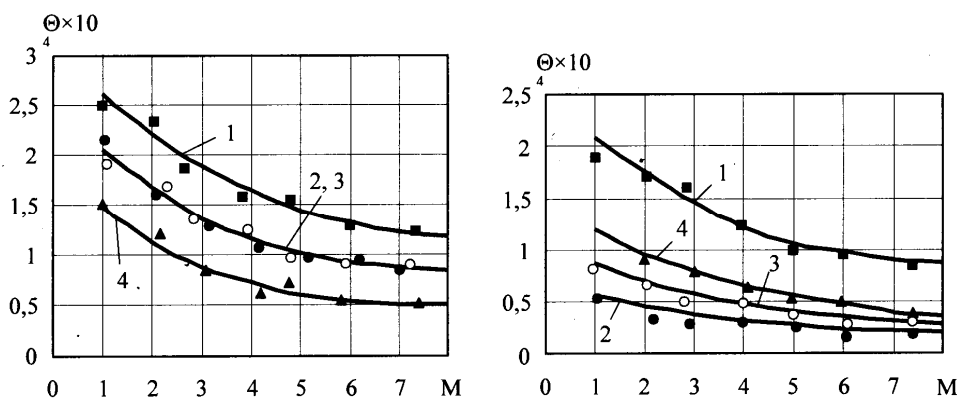


Рис. 5, а, б

Із отриманих таким чином даних випливає, що обертальний рух рідкого металу суттєво знижує температуру металу в каналах, особливо якщо він створюється тільки в одному із циліндричних каналів. Температура Θ при обертанні металу зменшується в декілька разів у порівнянні з випадком, коли воно відсутнє. Таким чином, обертальний рух рідкого металу є досить ефективним засобом інтенсифікації тепло- і масообміну в індукційних каналних печах, який дозволяє суттєво знизити перегрів металу в каналах.

1. Гориславец Ю.М. Электромагнитные системы вращательного движения жидкого металла для индукционных каналных печей // Техн. электродинамика. – 1998. – №4. – С. 12–14.

Gorislavets Yu.M. Electromagnetic systems of rotational motion of liquid metal for induction channel furnace // Tekhnichna elektrodynamika. – 1998. – №4. – P. 12–14. (Rus.)

2. Гориславец Ю.М. Комп'ютерне моделювання індукційної каналної печі з обертовим рухом рідкого металу // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – 2008. – Ч6. – С. 92–95.
- Goryslavets Yu.M. Computer simulation of induction channel furnace with rotational motion of liquid metal // Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vupusk "Problemy suchasnoi elektrotekhniki". – 2008. – Vol. 6. – P. 92–95. (Ukr.)
3. Гориславец Ю.М., Глухенький А.И. Определение скорости вращательного движения жидкого металла в устройстве непрерывного рафинирования // Техн. електродинаміка. – 2008. – №6. – С. 60–64.
- Goryslavets Yu.M., Glukhenkii A.I. Determination of velocity of rotational motion of liquid metal in the device of continuous refining // Tekhnichna elektrodynamika. – 2008. – №6. – P. 60–64. (Rus.)
4. Гориславец Ю.М., Глухенький А.И. Электродинамические параметры системы вращательного движения жидкого металла индукционной каналной печи // Техн. електродинаміка. – 2009. – №3. – С. 35–40.
- Goryslavets Yu.M., Glukhenkii A.I. Electrodynamics parameters of the system of rotational motion of liquid metal of induction channel furnace // Tekhnichna elektrodynamika. – 2009. – №3. – P. 35–40. (Rus.)
5. Золотухин В.А., Темеров А.А., Видин Ю.В., Евтихов Ж.Л. О некоторых факторах, влияющих на характер зарастания окислами каналов индукционной плавильной печи // Промышленная энергетика. – 1981. – №10. – С. 12–14.
- Zolotukhin V.A., Temerov A.A., Vidin Yu.V., Evtikhov Zh.L. About some factors, influencing on character of overgrowing by oxides of channels of induction melting furnace // Promyshlennaia energetika. – 1981. – №10. – P. 12–14. (Rus.)
6. Колесниченко А.Ф., Гориславец Ю.М., Бундя А.П., Борисов Б.П., Граудул В.Н. Перенос энтальпии и вещества при неоднородных МГД-течениях в каналах индукционных плавильных печей // Магнитная гидродинамика. – 1979. – №1. – С. 111–116.
- Kolesnichenko A.F., Goryslavets Yu.M., Bundia A.P., Borisov B.P., Graudul V.N. Transfer enthalpies and substance at heterogeneous MHD flows in channels of induction melting furnaces // Magnitnaia gidrodinamika. – 1979. – №1. – P. 111–116. (Rus.)
7. Ricou R., Vives Ch. Local velocity and mass transfer measurements in molten metals using and incorporated magnet probe // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1982. – Vol.25. – №10. – P. 1579–1588.

УДК 621.365.51:537.84

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

Экспериментальное исследование вращательного движения жидкого металла в индукционной каналной печи

На физической модели индукционной каналной печи исследована структура вращательного движения жидкого металла в цилиндрических каналах. Получено распределение скорости вращения металла по радиусу и длине канала печи. Экспериментальным путем показана возможность интенсификации тепло-массообмена в индукционной печи с вращательным движением металла за счет усиления вихревого движения жидкого металла в продольных сечениях цилиндрических каналов и возникновения транзитного течения в каналной части печи. Библ. 7, рис. 5.

Ключевые слова: индукционная каналная печь, вращательное движение жидкого металла, физическое моделирование, скорость металла, тепло-массообмен.

Yu.M.Goryslavets, O.I.Glukhenkyi,

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
 Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

Experimental study of rotational motion of liquid metal in induction channel furnace

On the physical model of induction channel furnace the structure of rotational motion of liquid metal in cylindrical channels is studied. Distribution of metal velocity on radius and length of furnace channel is received. The possibility of intensification of heat and mass transfer in induction furnace with rotational motion of metal by increasing the vortex motion of liquid metal in the longitudinal sections of cylindrical channels and emergence of transit flow in channel part of furnace is experimentally rotined. References 7, figures 5.

Key words: induction channel furnace, rotational motion of liquid metal, physical modelling, velocity of metal, heat and mass-transfer.

Надійшла 25.03.2011

Received 25.03.2011