

ЦИРКУЛЯЦІЯ МЕТАЛЕВОГО РОЗПЛАВУ В ІНДУКЦІЙНІЙ КАНАЛЬНІЙ ПЕЧІ ПРИ ФАЗОВОМУ КЕРУВАННІ НАПРУГАМИ ЖИВЛЕННЯ

Ю.М. Гориславець^{*}, докт. техн. наук, О.І. Глухенький^{**}, канд. техн. наук,

О.І. Бондар^{***}, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: ugoris@ied.org.ua, gai56@ied.org.ua, oleksii.bondar@ied.org.ua

Представлено математичну модель, що описує взаємопов'язані електромагнітний і гідродинамічний процеси в індукційній каналній печі. Модель являє систему рівнянь магнітної гідродинаміки, яка включає в себе інтегродиференціальні рівняння для електромагнітного поля у разі заданих напруг на індукторах печі та рівняння гідродинаміки у вигляді рівнянь Нав'є-Стокса, записаних для стаціонарної турбулентної течії з використанням к-ε моделі турбулентності. На прикладі двофазної каналної печі розглянуто вплив фазового кута зсуву між напругами, що живлять індуктори печі, на структуру та інтенсивність руху рідкого металу в каналах. Визначено значення цього кута, які забезпечують максимальну витрату транзитної течії розплаву в каналах. Бібл. 3, рис. 3.

Ключові слова: індукційна канална піч, система електроживлення, математичне моделювання.

Індукційні каналні печі, як відомо, широко використовуються для плавлення як чорних, так і кольорових металів. У порівнянні з іншим плавильним обладнанням такі печі мають значні переваги. Вони забезпечують мінімальне окислення та випаровування металу, так як його нагрівання відбувається знизу. Завдяки використанню замкнутого магнітопроводу у них досить високий електричний ККД. Окрім того, вони мають також високий тепловий ККД, оскільки основна маса розплаву знаходиться у ванні, що має товсту теплоізоляційну футеровку. Завдяки циркуляції розплаву, зумовленої електродинамічними і термогравітаційними силами, вони забезпечують достатньо високу однорідність хімічного складу металу. Така циркуляція сприяє також прискоренню процесу плавлення [1].

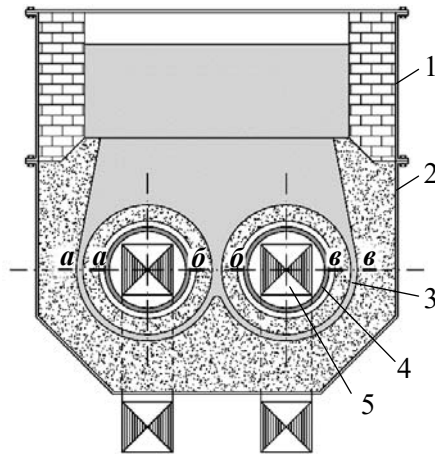


Рис. 1

В електромагнітному відношенні індукційна канална піч подібна силовому трансформатору, що працює в режимі короткого замикання. На рис. 1 наведено ескіз одного із варіантів конструктивного виконання такої печі, а саме: двофазну піч типу ІЛК-1,2, що призначена для плавлення міді та різноманітних сплавів на її основі [2]. Піч складається з облицьованої жароміцною цеглою ванни 1, в якій знаходиться основна маса розплаву, і індукційного блоку 2, що знаходиться під ванною. Саме цей блок і є тим умовним трансформатором, вторинна обмотка якого являє собою короткозамкнений виток 3 рідкого металу. У цьому каналі за допомогою котушки (індуктора) 4 із замкнутим магнітопроводом 5 наводиться електричний струм, який нагріває рідкий метал. Піч на рис. 1 має у своєму складі два канали та два незалежні індуктори, які зазвичай живляться різними фазами напругами.

В індукційній каналній печі, як видно з її конструктивних особливостей, об'єми, де виділяється тепло та знаходиться метал, що підлягає плавленню, просторово роз'єднані. Оскільки основна частина тепла в печі виділяється в каналах, а плавлення здійснюється у ванні, температура металу в каналах завжди вища, ніж у ванні. Різниця цих температур, яку ще називають перегрівом металу в каналах, залежить від потужності печі. Чим більша потужність, тим більший перегрів металу в каналах. Для печей, що плавлять мідь, різниця між максимальною температурою металу в каналах і середньою температурою у ванні може сягати 150⁰С [3]. Виходячи з наведеного, важливою задачею для таких печей є забезпечення ефективного теплообміну між каналами та ванною печі. За недостатньою інтенсивністю передачі

© Гориславець Ю.М., Глухенький О.І., Бондар О.І., 2020

ORCID ID: ^{*} <https://orcid.org/0000-0003-1668-4972>; ^{**} <https://orcid.org/0000-0001-5053-5677>

^{***} <https://orcid.org/0000-0002-1678-8862>

тепла метал в каналній частині печі перегрівается, що призводить до завищених втрат енергії та передчасного виходу печі з ладу.

Одним з найбільш дієвих засобів інтенсифікації зазначених процесів є створення в кожному каналі печі транзитної (наскрізної) течії рідкого металу, за якою метал з ванни надходить в канал через одне гирло, а залишає його через інше. Такий рух металу дає змогу істотно знизити перегрів металу в каналах по відношенню до ванни, що, в свою чергу, призводить до збільшення ресурсу роботи печі, підвищення її ККД та зниження питомих витрат електроенергії.

Слід зазначити, що рух рідкого металу в каналах індукційної печі, у загальному випадку, в основному визначається електромагнітними силами та в меншій мірі – термогравітаційними. Останні –пропорційні різниці густини нагрітих і холодних шарів розплаву в каналі та ванні печі. Електромагнітні сили виникають за взаємодії індукованих в рідкому металі струмів із власним магнітним полем та полем розсіювання індуктора. Розподіл і значення цих сил залежать від багатьох чинників, серед яких визначальними є геометрична форма каналу та глибина проникнення електромагнітного поля в метал ϵ , точніше – величина ϵ/Δ (Δ – товщина каналу). Для багатофазних індукційних блоків зазначений розподіл залежить також від системи живлення печі.

Максимальні електромагнітні зусилля в каналах виникають в місцях, де є значна кривизна або розтікання (розпушування) ліній струму. Зі збільшенням кривизни цих ліній рівень зусиль в місці їхнього вигину (повороту) зростає. Ділянками каналів, де є подібні вигини струму, а отже, і значні зусилля, є гирла каналів, тобто зони з'єднання (стикування) каналів з ванною печі, а також зони стикування каналів між собою. Під дією цих сил в таких "активних" зонах виникає вихровий рух, який залучає до себе також частину металу, що знаходиться як в каналах, так і у ванні печі. Якщо, наприклад, інтенсивність вихорів в обох гирлах каналу різна, то це може призвести до виникнення транзитного руху металу в ньому. Істотно посилити такий рух можна за рахунок штучного збільшення кривизни ліній струму в одному гирлі і зменшення її в іншому. Цього можна досягти як зміною конфігурації каналів, так і зміною шляхів протікання індукованого струму в каналах за рахунок використання різних систем електроживлення печі.

Метою цієї роботи є визначення впливу фазового кута зсуву між напругами, що живлять індукційну каналну піч, на структуру та інтенсивність вихрового руху рідкого металу в ній. Дослідження цього питання проводилося на прикладі двофазної каналної печі шляхом тривимірного математичного моделювання взаємопов'язаних електромагнітних і гідродинамічних процесів, які описуються рівняннями магнітної гідродинаміки, що включають в себе рівняння електродинаміки (електромагнітного поля) та гідродинаміки.

Моделювання електромагнітного поля виконувалося за заданих напруг на індукторах печі. В такій постановці воно потребувало розв'язання коло-польової задачі, яка являє собою систему диференціальних рівнянь для комплексних амплітуд векторного магнітного $\dot{\mathbf{A}}$ і скалярного електричного $\dot{\phi}$ потенціалів, а також інтегрального рівняння балансу напруг для кожного індуктора

$$j\omega\sigma\dot{\mathbf{A}} + \nabla \times ((\mu_0\mu_r)^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) - \sigma\mathbf{u} \times (\nabla \times \dot{\mathbf{A}}) + \sigma\nabla\dot{\phi} = \dot{\mathbf{J}}_e; \quad (1)$$

$$\dot{U} = \dot{I}R_{AC} + j\omega\dot{\Psi} = \dot{I}R_{AC} + j\omega \frac{w}{S_i} \int_{V_i} \dot{A}_r dV, \quad (2)$$

де ω – кругова частота; σ – питома електропровідність; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ_r – відносна магнітна проникність відповідної розрахункової області; \mathbf{u} – швидкість рідкого металу; $\dot{\mathbf{J}}_e$ – густина зовнішнього струму; \dot{U} , \dot{I} , R_{AC} , w , S_i і V_i – напруга, струм, активний опір, число витків, площа поперечного перерізу і об'єм індуктора; $\dot{\Psi} = \frac{w}{S_i} \int_{V_i} \dot{A}_r dV$ – потокозчеплення індуктора з густиною струму в перерізі індуктора $\dot{J}_e = Iw / S_i$, \dot{A}_r – тангенціальна відносно індуктора компонента векторного потенціалу.

Гідродинамічний процес описувався диференціальними рівняннями Нав'є-Стокса для стаціонарної турбулентної течії з використанням k- ϵ моделі турбулентності

$$\rho_m(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot (\eta_{ef} \nabla \mathbf{u}) + \mathbf{f}; \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (4)$$

де ρ_m – густина рідкого металу, p – тиск, η_{ef} – коефіцієнт ефективної динамічної в'язкості металу, розрахований відповідно до прийнятої моделі турбулентності, \mathbf{f} – питома електромагнітна сила в рідкому металі, обчислена за результатами розрахунку електромагнітної задачі як

$$\mathbf{f} = 0,5 \operatorname{Re}(\mathbf{J} \times \mathbf{B}), \quad (5)$$

де $\mathbf{J} = \sigma(-\nabla\phi - j\omega\mathbf{A} + \mathbf{u} \times \mathbf{B})$ – густина струму в рідкому металі; \mathbf{B} – спряжений комплекс індукції магнітного поля, $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$.

Внаслідок симетрії фізичних процесів в печі відносно вертикальної площини, що проходить через середину поперечних перерізів каналів, задача розв'язувалася в тривимірній декартовій системі координат для однієї половини об'єму печі. Вихідні дані приймалися такими. Об'єм розплавленого металу (міді) у ванні печі складав $(1,04 \times 0,67 \times 0,45) \text{ м}^3$, в каналах індукційного блоку – $0,04 \text{ м}^3$; внутрішній діаметр каналів (короткозамкнених "витків") – $0,51 \text{ м}$, їхній поперечний переріз – $(25 \times 100) \text{ мм}^2$; розміри кожного індуктора: середній діаметр – $0,32 \text{ м}$, довжина – $0,62 \text{ м}$, число витків індуктора – $w = 47$; частота і напруга живлення – $\nu = 50 \text{ Гц}$ і $U = 500 \text{ В}$; відносна магнітна проникність магнітопроводів приймалася постійною $\mu_r = \mu_{Fe} = 1000$.

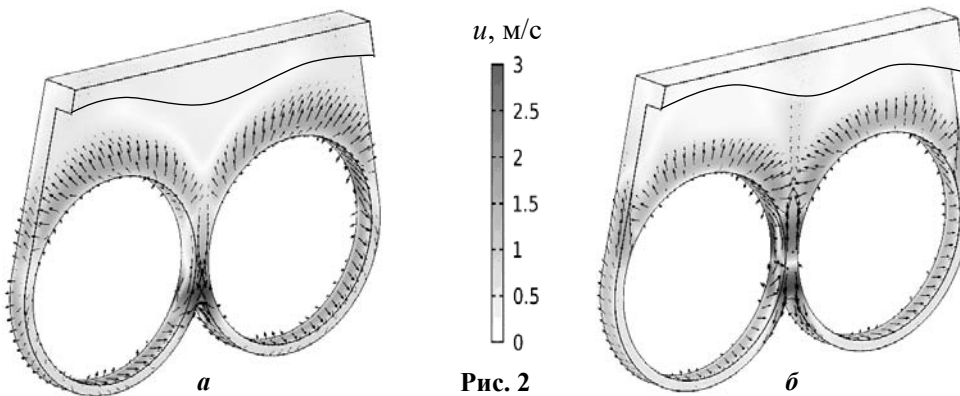


Рис. 2

На рис. 2 показано отримані в результаті проведеного моделювання розподіли швидкості руху рідкого металу в каналах печі для двох значень фазового кута зсуву між напругами на індукторах $\psi = 0$ (рис. 2, а) і $\psi = 180$ ел. град. (рис. 2, б), тобто при однофазному живленні. На цьому

рисунок такі розподіли наведено у площині симетрії та для зовнішніх поверхонь каналів. Звідсіля видно, що під дією електромагнітних сил в каналах виникає достатньо складний тривимірний вихровий рух розплаву, при цьому в обох випадках присутня компонента швидкості, спрямована вздовж кожного каналу. Якщо проінтегрувати цю компоненту по поперечному перерізу каналу, отримаємо середньовитратну швидкість транзитної течії в каналі. У першому випадку, тобто при $\psi = 0$ ця швидкість в позначених на рис. 1 перерізах каналів "а – а" і "в – в" виявилася спрямованою вгору, а у спільному для обох каналів перерізі "б – б" – вниз. При $\psi = 180$ ел. град. (рис. 2, б) напрям транзитного руху в обох каналах змінюється на протилежний.

Зміна напрямку та інтенсивності течії металу в каналах у разі зміни фазового кута ψ пояснюється різним розподілом індукovanого в металі струму. Так, у випадку, коли $\psi = 0$, струм на спільній ділянці обох каналів печі практично відсутній (лінії струму охоплюють обидва індуктори), а при $\psi = 180$ ел. град. навпаки, він є максимальним, оскільки струми, індукovanі кожним індуктором, на цій ділянці співпадають за фазою. Це призводить до того, що у першому випадку повністю виключається силова дія (вплив) на метал середнього (спільного) гирла каналів, в той час як максимально проявляється дія виступу футеровки у нижній частині спільної ділянки каналів, який огинає струм, створений двома індукторами. У другому випадку (при $\psi = 180$ ел. град.) – навпаки, дія цього виступу відсутня, а середнього гирла – максимальна. Інші значення фазового кута дають проміжну картину. У кожному випадку саме спільна дія всіх "активних" зон каналів і визиває той чи інший напрям транзитного руху

розплаву відповідної інтенсивності.

Вплив фазового кута ψ на інтенсивність транзитного руху рідкого металу в каналах індукційної печі демонструється на рис. 3, де наведено розрахункові залежності масової витрати розплаву в кожному каналі. Криві 1 і 2 на цьому рисунку визначають витрату розплаву в лівому та правому каналах відповідно, а крива 3 – визначає витрату через спільну для обох каналів ділянку. Додатні значення витрати на рисунку умовно означають напрям руху металу в каналах

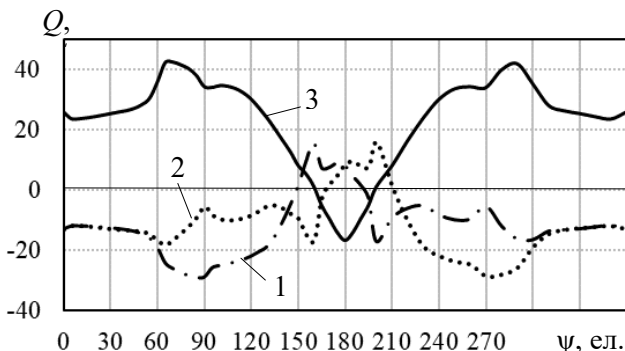


Рис. 3

вгору через зазначені перерізи, від'ємні – вниз. Як видно, витрата через спільну ділянку дорівнює алгебраїчній сумі витрат через лівий і правий канали. Із рис. 3 видно, що в діапазоні значень кута $\psi = 0 \dots 60$ ел. град. витрати металу в обох каналах однакові, а максимальні витрати металу через обидва канали досягаються приблизно за $\psi = 60$ ел. град. Цікавою обставиною при цьому є можливість реверсу транзитної течії в каналах печі в процесі плавки у разі зміни значення фазового кута ψ , наприклад, з 0 або 60 ел. град. до 180 ел. град. і навпаки. Таким чином, можна зазначити, що фазове керування напругами на індукторах багатофазних індукційних каналних печей дає змогу керувати процесом масообміну, а, відповідно, і теплообміну між каналами та ванною печі шляхом зміни інтенсивності та напрямку руху транзитної течії рідкого металу в каналах.

Роботу виконано за бюджетною темою "Розробити електромагнітні та напівпровідникові системи модульної структури для енергоефективної термообробки металевих розплавів і деталей" («Елтерм-П»), №ДР 0119U001212.

1. Иванова Л.И., Грובה Л.С., Сокунов Б.А. Индукционные каналные печи. Екатеринбург: Изд-во УГТУ - УПИ, 2002. 105 с.
2. Фарбман С.А., Колобнев И.Ф. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов. М.: Metallurgiya, 1968. 496 с.
3. Гориславец Ю.М., Колесниченко А.Ф., Горохов В.И., Куроедов В.А., Витчинников Н.С. Разработка и освоение на Артемовском заводе ОЦМ трехфазных плавильных печей с однонаправленным движением металла. *Цветные металлы*. 1981. № 5. С.79-81.

УДК 621.74: 537.84

ЦИРКУЛЯЦІЯ МЕТАЛІЧЕСКОГО РАСПЛАВА В ИНДУКЦИОННОЙ КАНАЛЬНОЙ ПЕЧИ ПРИ ФАЗОВОМ УПРАВЛЕНИИ НАПРЯЖЕНИЯМИ ПИТАНИЯ

Ю.М. Гориславец, докт. техн. наук, **А.И. Глухенький**, канд. техн. наук, **А.И. Бондар**, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина

e-mail: ugoris@ied.org.ua, gai56@ied.org.ua, oleksii.bondar@ied.org.ua

Представлена математическая модель, описывающая взаимосвязанные электромагнитный и гидродинамический процессы в индукционной каналной печи. Модель представляет собой систему уравнений магнитной гидродинамики, которая включает в себя интегро-дифференциальные уравнения для электромагнитного поля при заданных напряжениях на индукторах печи и уравнения гидродинамики в виде уравнений Навье-Стокса, записанные для стационарного турбулентного течения с использованием k-ε модели турбулентности. На примере двухфазной каналной печи рассмотрено влияние фазового угла сдвига между напряжениями, питающими индукторы печи, на структуру и интенсивность движения жидкого металла в каналах. Определены значения этого угла, которые обеспечивают максимальный расход транзитного течения расплава в каналах. Библ. 3, рис. 3.

Ключевые слова: индукционная каналная печь, система электропитания, математическое моделирование.

CIRCULATION OF THE METAL MELT IN THE INDUCTION CHANNEL FURNACE AT A PHASE CONTROL OF SUPPLY VOLTAGE

Yu.M. Goryslavets, O.I. Glukhenky, O.I. Bondar

Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremogy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: ugoris@ied.org.ua, gai56@ied.org.ua, oleksii.bondar@ied.org.ua

A mathematical model that describes the coupled electromagnetic and hydrodynamic processes in an induction channel furnace is presented. The model is a system of equations of magnetic hydrodynamics, which includes integro-differential equations for the electromagnetic field at applied voltages at the furnace inductors and equations of hydrodynamics in the form of Navier-Stokes equations for stationary turbulent flow using the k-ε turbulence model. Using the example of a two-phase channel furnace, the influence of the phase angle between the voltages supplying the furnace inductors on the structure and intensity of the liquid metal flow in the channels is considered. The values of this angle which provide the maximum flow rate of transit melt flow in the channels are determined. References 3, figures 3.

Key words: induction channel furnace, power supply system, mathematical modelling.

1. Ivanova L.I., Grobova L.S., Sokunov B.A. Induction channel furnaces. Yekaterinburg: Publishing House of the Ural State Technical University - UPI, 2002. 105 p. (Rus)
2. Farbman S.A., Kolobnev I.F. Induction furnaces for melting metals and alloys. Moskva: Metallurgiya, 1968. 496 p. (Rus)
3. Gorislavets Yu.M., Kolesnichenko A.F., Gorokhov V.I., Kuroedov V.A., Vitchinnikov N.S. Design and development of three-phase melting furnaces with unidirectional movement of metal at the Artyomovsk plant OTSM. *Tsvetnye metaly*. 1981. No 5. S.79-81. (Rus)

Надійшла 28.02.2020

Остаточний варіант 26.03.2020