

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ВИХРОВОГО ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ РІДКОГО МЕТАЛУ ДЛЯ ВІДБИВНОЇ ПЕЧІ

І. М. Єлісеєв^{1, а}, Т. О. Пеньковий^{1, 3, б}, Т. В. Доник^{1,2}, А. А. Халатов^{1,2}

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
НН Фізико-технічний інститут

²Інститут технічної теплофізики НАН України

³Інститут Електродинаміки НАН України

Анотація

У роботі наведено двохвимірне моделювання електромагнітних та гідродинамічних процесів у відбивній печі та приєднаний камері вихрового руху металу. Дослідження виконувалось у середовищі мультифізичного моделювання COMSOL Multiphysics 6.0. Досліджено два випадки з'єднання вихрової камери з відбивною піччю. З результатів моделювання помітно, що переміщаючи циліндричну камеру відносно натискного каналу, можна регулювати співвідношення між витратою металу, що надходить з камери до ванни печі, та витратою металу, що циркулює у вихровій камері.

Ключові слова: Комп'ютерне моделювання, відбивна піч, електромагнітний перемішувач, вихрова течія металу, натискний канал

Вступ

Як відомо, відбивні печі широко використовуються для плавлення металевих відходів (брухту) з метою повторного залучення металу у виробництво. Особливо актуально це стосується алюмінію, оскільки внаслідок відсутності електролізного виробництва в Україні первинний алюміній у нас не виробляється. Проте тут існують проблеми у випадку, коли плавленню піддається так звана легковагова (легковесная – рос. мовою) шихта (наприклад, металева стружка, алюмінієві банки з-під напоїв тощо). Незважаючи на те, що такі відходи попередньо перед плавленням компактуються (брикетуються), все ж таки із-за того, що після завантаження таких брикетів у піч вони практично повністю знаходяться над поверхнею рідкого металу. Піддаючись верхньому поверхневому нагріванню, значна частина такої шихти просто згорає [1].

Відоме цікаве рішення, яке дозволяє зменшити ці втрати при плавленні таких відходів. Воно полягає в тому, що зазначені відходи перед плавленням не брикетують а, навпаки, подрібнюють, а потім плавлять їх у вихровому потоці рідкого металу («vortex flow») [2]. За дослідницькими даними вихід придатного для повторного використання металу за такою технологією складає більше 97-98 %. Легковагова шихта у вигляді подрібнених відходів подається у вихровий потік рідкого металу, створений відцентровим електромагнітним насосом. Зазначена шихта затягується у вихрову воронку і плавиться в рід-

кому металі. Електромеханічний насос тут виконує дві функції: **створює вихровий потік** («воронку») і забезпечує **циркуляцію металу** у ванні печі, тобто здійснює перемішування металу у ванні і подачу нагрітого металу до вихрової камери, забезпечуючи таким чином ефективне плавлення шихти.

Недоліком такого рішення можна вважати використання для цих цілей відцентрового механічного насоса, що знижує надійність і довговічність такого конструктивного рішення. Для подолання даної проблеми можна використати електромагнітну систему виконану у вигляді дугового індуктора, яка і буде створювати рушійну силу для рідкого металу. Таке рішення значно довговічніше, ніж механічний насос і надійніший у використанні, так як безпосереднього контакту з агресивним середовищем рідкого металу немає.

Метою даної роботи є дослідження можливості використання електродугового індуктора у якості насоса рідкого металу та розглянути утворену ним воронку в вихровій камері для різних варіантів під'єднання печі і камери.

1. Комп'ютерне моделювання

Комп'ютерне моделювання електро- та гідродинамічної було проведено з використанням пакету для мультифізичного моделювання COMSOL Multiphysics 6.0 [3]. Було проведено розрахунок 2D задачі.

На Рис. 1 представлено схему відбивної печі з окремою циліндричною камерою («карманом»), в якій за допомогою дугового індуктора створюється вихровий (обертальний) потік рідкого металу. Циліндрична камера за допомогою двох каналів з'єднана з

^аivanqqe@gmail.com

^бpenaimidg@gmail.com

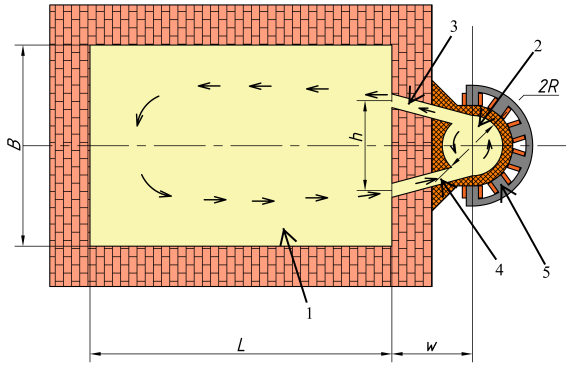


Рис. 1. Відбивна піч з приєднаною вихровою камерою та індуктором. (1 – ванна печі, 2 – вихрова камера, 3 – натискний канал, 4 – всмоктуючий канал, 5 – дуговий індуктор)

основною камерою (ванною) печі. Змінюючи кут, під яким натискний (напірний) канал стикується з циліндричною поверхнею бокової стінки камери, можна за потребою змінювати співвідношення між витратою рідкого металу, що поступає з камери у ванну печі, і витратою металу, який циркулює (обертається) в кармані. Довжина камери $B = 2$ м, ширина $L = 3$ м. Вхідний в камеру канал має ширину 0.15 м, а вихідний 0.1 м. Сама вихрова камера має радіус $R = 0.3$ м. Відстань між вхідним і вихідним каналом $h = 0.5$ м.

Змінювати зазначене співвідношення витрат на практиці можна за рахунок переміщення циліндричної камери відносно ванни, залишаючи фіксованим натискний канал, так як це показано на Рис. 2. Положення камери в цьому випадку можна характеризувати геометричним параметром a/R , де розміри a і R позначені на цьому рисунку.

Розрахунки проводилися при заданих на котушках струмі промислової частоти ($F = 50$ Гц), фазний струм між котушками було прийнято за $\varphi = 60^\circ$. Струм на котушках для двох варіантів був заданий в діапазоні $A_w = 5, 10, 15, 20$ кА·витків.

Дослідження проводилось у два етапи: спочатку було розраховано стаціонарну електромагнітну задачу, після чого гідродинамічну задачу. Перетікання двох процесів вважалося слабкозв'язним, що і дає підставу розв'язувати ці задачі послідовно [4].

Система описуюча електромагнітне поле, в загальному випадку має наступний вигляд:

$$\nabla \times \left(\frac{\nabla \times \dot{\mathbf{A}}}{\mu_0 \mu_r} \right) + (j\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r) \dot{\mathbf{A}} + (\sigma + j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r) \nabla \dot{\varphi} = \dot{\mathbf{J}}_e, \quad (1)$$

де $\dot{\mathbf{A}}$ – векторний магнітний потенціал, μ_0 і ε_0 – магнітна і діелектрична проникності вакууму, μ_r і ε_r

– відносні магнітна і діелектрична проникності, σ – питома електропровідність, ω – кутова частота, $\dot{\varphi}$ – скалярний електричний потенціал, $\dot{\mathbf{J}}_e$ – комплексна амплітуда густини струму зовнішніх джерел із заданим розподілом.

Розподіл швидкостей для металевого розплаву визначався вирішенням рівняння Нав'є-Стокса:

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \mathbf{p} + \nu \Delta \mathbf{u} + \mathbf{f}, \quad (3)$$

де $\mathbf{u}$ – швидкість, ρ – густина рідини, p – тиск, ν – кінематична в'язкість, $\mathbf{f}$ – сила Лоренца, обчислена за допомогою електродинамічної задачі.

Для моделювання було обрано RANS систему рівнянь руху. Використана $k - \varepsilon$ модель турбулентності, яка широко використовується для розрахунку подібних задач.

2. Результати моделювання

У результаті моделювання було отримано розподіл електромагнітних сил у металі, рушійною силою для обох варіантів була сила Лоренца.

На Рис. 3 представлено розподіл рушійної сили для рідкого металу на стінці вихрової камери, вздовж якої розміщені котушки індукторів, θ – кут полярної системи координат, центр якої знаходиться в центрі вихрової камери. Видно, що розподіл рушійної сили має не рівномірний характер, з максимумами в місцях накладання магнітних полів створюваних сусідніми котушками.

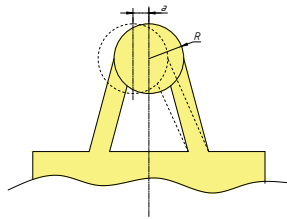


Рис. 2. Вихрова камера відбивної печі

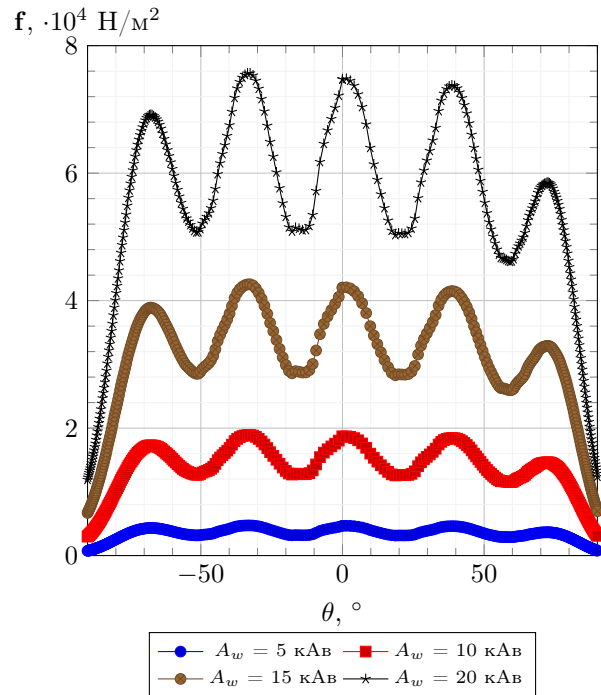
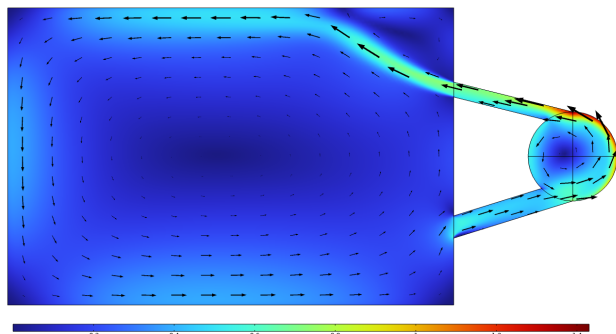
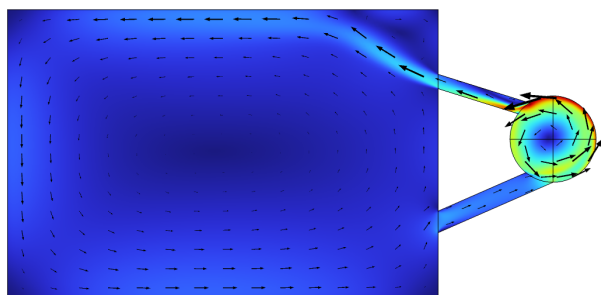


Рис. 3. Розподіл сили Лоренца на стінці вихрової камери.

Після розрахунку електромагнітної задачі була розрахована гідродинамічна задача. На Рис. 4 зображено вихрові течії розплаву для двох варіантів при 10 кАв. Легко помітити, що течія металу, створена дуговим індуктором, розділяється на дві частини, за якою частина металу поступає з камери у ванну печі, а інша частина циркулює у вихровій камері.



(a) $a/R = 1$



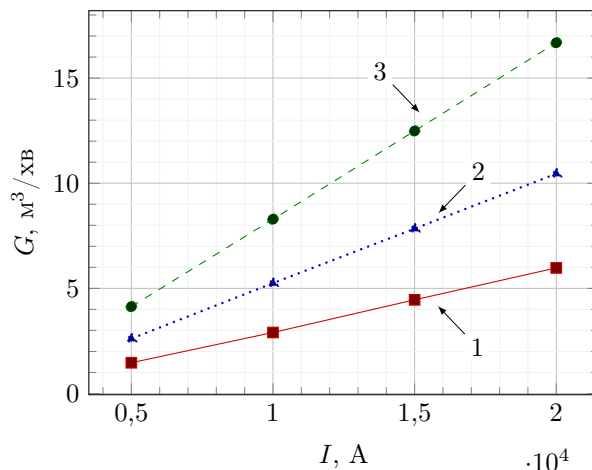
(б) $a/R = 0.5$

Рис. 4. Течія рідкого металу у відбивній плавильній печі

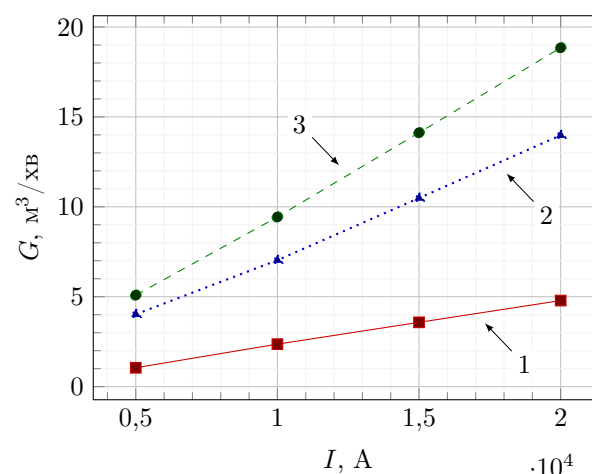
Візуально можна спостерігати, що для варіанту 4(a) метал після потрапляння до камери, в основній своїй масі перетікає до ванни, а для варіанту 4(б) – більш виразне утворення вихрового потоку в камері. Для наочного прикладу порівнюємо за допомогою об'ємної витрати металевого розплаву через різні поперечні перерізи системи для різних значень I_w в діапазоні 5, 10, 15 та 20 кАв.

На Рис.5 наведено, як змінюється витрата металу зі збільшенням сили струму. Переріз «1» визначає витрату рідкого металу, що поступає із камери у ванну печі і назад, переріз «2» характеризує витрату металу, що циркулює в камері, а переріз «3» визначає сумарну витрату, створену електромагнітною системою. Для визначення витрат приймалося, що висота рідкого металу в усій системі однакова і складає $h = 0,5$ м. Отримані залежності показують, що витрата металу через поперечний переріз «3» дорівнює сумі витрат через перерізи «1» і «2» в межах похибки $\pm 20\%$.

Інша кількісна оцінка системи у вигляді швидкості руху металу представлена на Рис. 6. На ньому в



(a) $a/R = 1$



(б) $a/R = 0.5$

Рис. 5. Об'ємна витрата рідкого металу в поперечних перерізах

залежності від сили струму в котушках наведена середня кутова швидкість металу у камері ω_c .

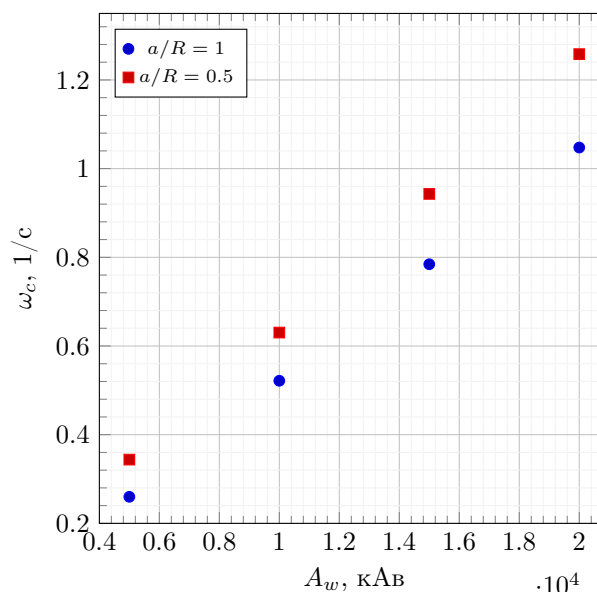


Рис. 6. Кутова швидкість металу у вихровій камері

Наведені на дані дозволяють зробити висновок, що із збільшенням співвідношення a/R кутова швидкість вихрового руху металу в циліндричній камері зростає. Таким чином, переміщаючи циліндричну камеру відносно натискного каналу, можна регулювати швидкість і кількість металу, що циркулює у вихровій камері. Необхідне значення цього співвідношення для реальної печі може бути встановлено на основі проведених теплових розрахунків або експериментальних даних.

Висновки

Виконано двовимірне моделювання мультифізичної задачі за допомогою програмного забезпечення COMSOL Multiphysics 6.0. Розв'язання задач електродинаміки і гідродинаміки виконувалось послідовно, так як процеси розглянуті в цій статті можна вважати слабкозв'язними. За результатами розв'язання електромагнітної задачі було розраховано рушійну силу, яку створює шестиполосний індуктор в об'ємі вихрової камери.

Розв'язок гідродинамічної задачі проводився для двох варіантів під'єднання натискного каналу, який з'єднує вихрову камеру та відбивну піч. З результатів моделювання помітно, що переміщаючи циліндричну камеру відносно натискного каналу, можна

регулювати співвідношення між витратою металу, що надходить з камери до ванни печі, та витратою металу, що циркулює у вихровій камері, а також змінювати кутову швидкість обертання рідкого металу у вихровій камері.

Наведені результати можуть бути використані у технологіях електромагнітного перемішування розплаву в плавильних печах, а також для систем вихрового руху металу («vortex flow») для плавки шихти.

Перелік використаних джерел

1. Stal R., Hanley P. Electromagnetic stirring in aluminum ladles. — ABB Value Paper., 2009.
2. Современные устройства для электромагнитного перемешивания алюминиевых расплавов в печах и миксерах повышенной емкости / Дубоделов В.И., Фиксен В.Н., Горюк М.С., Слажнев Н.А. и Скорбагатко Ю.П. // Металл и литье Украины. — 2008. — № 6. — С. 12–17.
3. Multiphysics simulation just got better, faster, more accessible. — Access mode: <https://www.comsol.com/>.
4. Подольцев А. Д., Кучерявая И. Н. Мультифизическое моделирование электротехнических устройств // Технічна електродинаміка. — 2015. — № 2. — С. 3–15.