https://doi.org/10.15407/plit2023.02.003

УДК 621.74 : 669.18 : 537.84

О.М. Смірнов*, *д-р техн. наук, проф., зав. відділу;*
e-mail: stalevoz@i.ua; ORCID 0000-0001-5247-3908
В.В. Осипенко**, *ген. директор; e-mail: g.d.destal@ukr.net;*
ORCID 0009-0001-9934-7615
С.В. Семірягін**, *канд. техн. наук, доц., заст. ген. директора;*
e-mail: td.destal@ukr.net; ORCID 0000-0002-8733-3216
М.С. Горюк *, *канд. техн. наук, заст. зав. відділу;*
e-mail: gormak72@gmail.com; ORCID 0000-0002-7561-6948
А.Ю. Семенко *, *канд. техн. наук, ст. наук. співроб.;*
e-mail: semenko.au@gmail.com; ORCID 0000-0002-0448-1636
Ю.П. Скоробагатько*, *канд. техн. наук, ст. наук. співроб.;*
e-mail: yulka.ukr@gmail.com; ORCID 0000-0002-1724-9895

*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ, Україна

** ТОВ НВП «Дніпроенергосталь», Запоріжжя, Україна

ПЕРЕМІШУВАННЯ МЕТАЛЕВИХ РОЗПЛАВІВ ЯК ЗАСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ АГРЕГАТУ «КІВШ-ПІЧ».
Повідомлення 2. НОВИЙ МЕТОД ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПЕРЕМІШУВАННЯ МЕТАЛЕВОГО РОЗПЛАВУ В АГРЕГАТІ «КІВШ-ПІЧ»

Вивчено особливості зносу вогнетривкої футеровки агрегату «ківш-піч», який працює в умовах металургійного мінізаводу, при інтенсивному перемішуванні рідкого металу газовими середовищами та електромагнітним полем. Установлено, що найбільш стресовими ділянками, стійкість яких визначає тривалість міжремонтної експлуатації ковша, є зона шлакового пояса, днище, а також бічна стінка, поблизу якої розташовується електромагнітний перемішувач. Розроблено рекомендації з відновлення робочого шару футеровки, сформульовано вимоги щодо раціоналізації режимів перемішування розплаву. Теоретично досліджено вплив електромагнітного перемішування на перебіг процесів тепломасопереносу в рідкометалевій ванні металургійних агрегатів, зокрема на гомогенізацію сплаву в режимі вільної турбулентності при введенні добавок. Запропоновано для впровадження в металургійних технологіях виплавки та доведення сплавів новий електромагнітний перемішувач конструкції ФТІМС НАН України, в основу дії якого покладено вплив на розплав пульсуючого магнітного поля, силові лінії якого однаково інтенсивно поширюються в горизонтальній та вертикальній площинах. Показано, що конструкція розробленого перемішувача, його живлення від електромережі промислової

частоти 50 Гц, характер дії створюваного поля забезпечують простоту його виготовлення та експлуатації і таким чином надають йому суттєві техніко-економічні й технологічні переваги порівняно з відомими перемішувачами біжучого магнітного поля при тих же параметрах електромагнітних систем. Спільні дослідження фахівців ФТІМС НАН України та ІЕД НАН України з використанням математичного моделювання і натурних досліджень на алюмінієвому розплаві показали можливість реалізації широкого спектру режимів перемішування як за інтенсивністю, так і за характером руху рідкометалевого середовища. Таким чином, застосування створеного електромагнітного перемішувача в агрегаті «ківш-піч» дозволить суттєво розширити можливості доведення рідких сплавів за хімічним складом і температурою, особливо в умовах малих металургійних виробництв.

Ключові слова: *агрегат «ківш-піч», металевий розплав, електромагнітне перемішування, вогнетривка футеровка, пульсуюче та біжуче магнітне поле.*

Як зазначено в першій частині публікації [1], неухильне посилення вимог щодо якості литої металопродукції, техніко-економічних показників її одержання й дотримання екологічної безпеки змушує виробників застосовувати оригінальні технічні рішення, передусім у плані модернізації наявного обладнання та його адаптації до новітніх технологічних процесів.

При цьому в процесах безперервного розливання істотно зростає роль агрегатів «ківш-піч» у плані забезпечення успішного проведення необхідних технологічних операцій із доведення рідкої сталі за температурою й хімічним складом, у тому числі з використанням примусового перемішування розплаву. Застосування широко відомих способів продувки розплаву інертним газом (аргоном) забезпечує високу ефективність дегазації та видалення неметалевих включень, однак не дозволяє належним чином розв'язувати задачі, пов'язані з необхідністю рафінуючої шлакової та флюсової обробки рідкого сплаву, введення до нього легуючих і модифікуючих компонентів. Для цього технологічно й економічно доцільнішим є застосування електромагнітного перемішування.

Однак застосовувані сьогодні перемішувачі біжучого магнітного поля мають низку особливостей конструкції та функціонування, що стримує розширення їх використання. Тому виникла нагальна потреба створення й упровадження електромагнітних перемішувачів відносно простої конструкції, що живляться струмом промислової частоти, можуть забезпечувати різні режими перемішування розплаву, є мобільними і не вимагають для своєї установки внесення істотних змін у конструкцію металургійних агрегатів.

Також на окрему увагу дослідників і виробників заслуговує питання стійкості вогнетривкої футеровки агрегатів «ківш-піч» в умовах інтенсивного перемішування розплаву та застосування при цьому хімічно агресивних середовищ (шлаки, флюси).

Так, практика експлуатації агрегату «ківш-піч» на мінізаводах підтвердила [2–5], що умови роботи футеровки в окремих зонах ковша значно відрізняються і, відповідно, знос її в різних зонах може відчутно змінюватися (рис. 1). Пунктирною лінією показано номінальне значення товщини футеровки, яку необхідно відновлювати в процесі ремонту ковша для його подальшої експлуатації.

Основними зонами підвищеного зносу футеровки сталерозливних ковшів агрегатів «ківш-піч» є:

- зона шлакового пояса (зона у верхній частині ковша, що безпосередньо контактує зі шлаковим покривом на поверхні рідкометалевої ванни);

- зона контакту футеровки із висхідними потоками, що швидко рухаються (при продувці інертним газом);

- зона днища, яка безпосередньо прилягає до продувного вузла.

Також у разі встановлення на одній із бічних стінок агрегату електромагнітного перемішувача (див. рис. 1), у цій зоні, зважаючи на безпосередню силову дію магнітного поля, швидкості руху розплаву досягають максимальних значень порівняно з іншими зонами об'єму рідкометалевої ванни, що сприяє прискореному зносу футеровки ковша [2–3].

На практиці швидкість зносу футеровки в перелічених вище зонах досить сильно різниться між собою (див. рис. 1) і може в кілька разів перевищувати швидкість зносу інших ділянок на внутрішній поверхні ковша. Однак критичний знос (не більше 80–85% від вихідного номінального значення) робочого вогнетривкого шару, що контактує з розплавом і/або шлаком у будь-якій (навіть лише в одній) із таких зон передбачає необхідність виведення ковша з експлуатації з метою локального ремонту футеровки чи навіть її повної заміни.

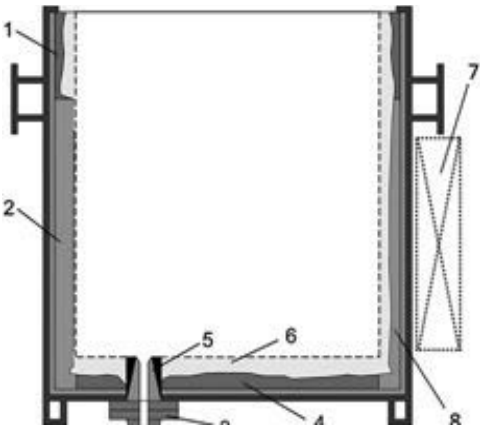


Рис. 1. Характер зносу вогнетривкої футеровки агрегату «ківш-піч» в процесі експлуатації: 1 — зношений шар у зоні шлакового пояса; 2 — зношений бічний шар; 3 — патрубок системи вдування аргону; 4 – зношений шар подини; 5 — пробка для вдування аргону; 6 — шар футеровки, який підлягає відновленню; 7 — місце розташування бічного електромагнітного перемішувача біжучого поля; 8 — зношений шар у місці встановлення перемішувача

Наприклад, на рис. 2а представлено сталерозливний ківш місткістю 18 т рідкої сталі агрегату «ківш-піч», що працює в умовах металургійного мінізаводу при виробництві високоякісних марок сталей, а рис. 2, *б* демонструє стан робочої внутрішньої поверхні футеровки ковша після його виведення з експлуатації з метою ремонту.

У табл. 1 наведено виробничі дані щодо зносу футеровки зазначеного ковша в процесі його експлуатації. Габаритні розміри ковша (включаючи товщину металевого



а *б*

Рис. 2. Сталерозливний ківш місткістю 18 т рідкої сталі агрегату «ківш-піч» (*а*), що працює в умовах металургійного мінізаводу в процесі виробництва високоякісних марок сталей, і стан робочої внутрішньої поверхні футеровки ковша (*б*) після його виведення з експлуатації

кожуха): висота — 2600 мм, зовнішній діаметр — близько 2130 мм, діаметр внутрішнього корисного об'єму ковша — близько 1600 мм, висота наливу рідкої сталі (без урахування шлакового покриву на її поверхні) — близько 1300 мм. Футеровка ковша багатошарова, її загальна товщина (включаючи теплоізоляцію та робочий шар) становила в ділянці подини близько 320 мм, а по висоті внутрішньої бічної поверхні ковша — близько 235 мм. При цьому власне робочий шар футеровки, від стану якого і

Таблиця 1

Приблизна швидкість зносу вогнетривів у різних зонах футеровки сталерозливного ковша (місткість — 18 т рідкої сталі) агрегату «ківш-піч», мм/плавка

Зона підвищеного зносу	Вид технологічної операції		
	Електромагнітне перемішування й вакуумування	Продувка аргоном і вакуумування	Продувка аргоном
Шлаковий пояс	3,0–3,5	3,5–4,0	2,5–3,0
Стінка в місці контакту з найбільш високошвидкісними конвективними потоками розплаву	2,5–3,0	2,5–3,0	2,5–3,0
Стінка в інших зонах	1,5–2,0	1,5–2,5	1,5–2,5
Днище ковша	1,5–2,0	2,0–2,5	2,0–2,5
Продувний вузол	Немає	5,0–6,0	5,0–6,0
Гніздовий блок (стійкість у плавках до заміни)	20–23	22–25	22–25

залежить міжремонтна тривалість безаварійної експлуатації ковша, було виготовлено з периклазо-вуглецевого вогнетривкого матеріалу із вмістом MgO не менше 94%. Товщина цього шару в подовій частині становила близько 190 мм, у зоні шлакового пояса по колу ковша — близько180 мм, по решті висоти внутрішньої бічної поверхні ковша — близько 155 мм.

Звичайно, наведені в табл. 1 дані можуть відрізнятися від результатів досліджень на інших агрегатах аналогічного призначення, оскільки ці параметри прямо пов'язані з умовами роботи конкретного обладнання та сталеплавильного цеху, а також із суворо обумовленими технологічними завданнями, які мають бути вирішені (зокрема щодо забезпечення відповідного хімічного складу сплаву, його чистоти від шкідливих домішок, продуктивності процесу, використовуваних рафінуючих середовищ, допоміжних систем і пристроїв тощо).

Одним із найраціональніших способів вирішення проблеми підвищення надійності й тривалості безперервної експлуатації ковша є виконання його футеровки за мультизональним принципом: використання для формування робочого шару в зонах підвищеного зносу механічно міцніших, хімічно й термічно стійкіших, хоч і дорожчих за вартістю, вогнетривів — наприклад, того ж таки периклазо-вуглецевого складу, але з підвищеним вмістом MgO (не менше 98%). При цьому, незважаючи на певне ускладнення процедури виготовлення футеровки і на те, що такі вогнетриви дорожчі на 15–20% порівняно із застосовуваними в інших зонах ковша, кінцевий ефект полягає в збільшенні тривалості експлуатації ковша та є цілком економічно доцільним [6]. Крім того, на практиці також прагнуть забезпечити кратну загальному часу експлуатації ковша періодичність заміни елементів, що найбільше зношуються (наприклад, у зоні продувного вузла або шлакового пояса).

Іншим ефективним прийомом збільшення стійкості футеровки ковша є її ремонт після певної фіксованої кількості плавок. Зазвичай такий ремонт здійснюють із використанням спеціальних тиксотропних самотверднучих мас на основі корунду (вміст Al_2O_3 — більше 98%), які подаються в зазор між металевим шаблоном і залишковим шаром футеровки. Надалі перед початком експлуатації відновлену футеровку просушують. Таким чином вдається підвищити кількість наливів розплаву в той самий ківш в 2,5–3,0 рази і навіть більше.

Як уже зазначалося, додатковий резерв розширення функціональних можливостей агрегатів «ківш-піч» полягає у використанні електромагнітного перемішування при реалізації комплексу операцій із позапічної обробки та доведення рідких сплавів.

У цілому особливості перемішування розплавів під дією електромагнітних сил

були предметом численних досліджень, у тому числі із залученням методів фізичного й математичного моделювання, а також на натурних об'єктах у виробничих умовах [7–11].

Режими руху металевих розплавів у металургійних агрегатах з організацією електромагнітного перемішування найчастіше підпорядковуються законам вільної турбулентності [7]. У цьому випадку після встановлення певного режиму циркуляції швидкість масообмінних процесів у розплаві характеризується одним із критеріїв подібності [7]:

$$\Pi_M = \frac{t_{T0} \cdot \upsilon_0}{l_0}, \tag{1}$$

$$\Pi'_M = \frac{t_{T0} \cdot J_0}{l_0} \sqrt{\frac{\mu}{2\rho}} \tag{2}$$

$$Q' = \frac{t_{T0} \cdot Q_0}{V_0}, \tag{3}$$

де Π_M — безрозмірний критерій подібності; t_{T0} — характерна тривалість виконуваних технологічних операцій (періодичність подачі присадок, час перемішування тощо), с; υ_0 — лінійна швидкість потоку розплаву при перемішуванні, м/с; l_0 — характерний лінійний розмір, м; Π'_M — безрозмірний критерій подібності масообміну, приведений до властивостей розплаву й характеристик електромагнітного перемішувача; l_0 — амплітуда характерного настилу електричного струму електромагнітної системи, А/м; μ — магнітна проникність, Гн/м; ρ — густина розплаву, кг/м^3; Q' — приведена масова витрата при перемішуванні; Q_0 — характерна масова витрата металу в напрямку перемішування (циркуляції), кг/с; V_0 — об'єм розплаву, м^3.

Із виразів (1)–(3) видно, що при сталій геометрії печі, міксера чи ковша (ідеться передусім про розміри й конфігурацію внутрішнього простору) ефективність роботи таких металургійних агрегатів під час реалізації різних технологічних операцій прямо пропорційна інтенсивності перемішування розплаву. Так, наприклад, продуктивність плавильної печі може бути збільшена в кілька разів при організації керованого руху розплаву відносно твердої шихти або легуючої добавки, що вводиться [12, 13].

Що стосується гомогенізації розплаву за хімічним складом, то при одноконтурній циркуляції, яка встановилася, цей процес також було досліджено за допомогою різних моделей [7, 8].

В одній із них (стосовно вмісту легуючої добавки в одній із зон рідкометалевої ванни) використовується диференціальне рівняння на основі закону збереження маси [7]:

$$Q_A \cdot \rho_A(t) \cdot C_A(t) - Q_B \cdot \rho_B(t) \cdot C_B(t) = \frac{dM_B}{dt} \tag{4}$$

де A, B — індекси різних зон розплаву; Q — об'ємний потік із зони, м^3/с; $\rho(t)$ — густина розплаву в зоні, кг/м^3; t — час, с; $C(t)$ — концентрація легуючого елемента в зоні, % мас.; M_B — маса легуючого елемента в зоні B, кг.

Інша наближена модель процесу гомогенізації розплаву ґрунтується на диференціальному рівнянні масопереносу [8]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{\upsilon} \nabla C = \left(D_M + D_T\right) \nabla^2 C \tag{5}$$

де D_M, D_T — коефіцієнти молекулярної й турбулентної дифузії відповідно, м^2/с.

Дослідження, проведені за допомогою обох моделей [8], показали, що ефективність процесу гомогенізації розплаву під дією перемішування в режимі вільної турбулентності характеризується безрозмірним дифузійним критерієм Фур'є $F_{o_{AT}}$:

$$Fo_{Д.Т} = \frac{\upsilon_{Ц.М} \cdot t}{r_0} \qquad (6)$$

де $\upsilon_{Ц.М}$ — швидкість циркуляції металу, м/с; r_0 — характерний розмір металургійного агрегату, у якому організовано перемішування, м.

При цьому слід відзначити низку особливостей, притаманних виключно електромагнітному перемішуванню, що забезпечують додаткову інтенсифікацію масообміну. Так, гомогенізація розплаву за допомогою електромагнітного перемішування відбувається не просто пропорційно збільшенню швидкості перемішування, а навіть більш різко [7]. Це підтвердили експерименти з гомогенізації хімічного складу залізо-нікелевого розплаву при його легуванні алюмінієм із використанням електромагнітного перемішування. Зокрема, встановлено, що збільшення в 2 рази напруженості магнітного поля, створюваного електромагнітним перемішувачем, призвело до прямого підвищення швидкості перемішування також у 2 рази, проте при цьому непропорційно прискорилася гомогенізація рідкого сплаву за хімічним складом: її тривалість порівняно з режимом без електромагнітного перемішування скоротилася майже у 8 разів [7, 8].

Крім того, на тривалість гомогенізації розплаву відчутно впливає кількість контурів циркуляції (утворюваних вихорів) [7, 8, 11]. Характерними особливостями багатоконтурної циркуляції є набагато менший, ніж при одноконтурному перемішуванні, вплив напрямку руху рідкого металу на швидкість процесу гомогенізації [7, 8], а також багатостадійність процесу перенесення добавки, що включає розподіл її по периферії першого вихору за рахунок примусової конвекції, дифузію в умовах турбулентності (як углиб вихору, так і через межу вихорів), повторення цих етапів для всіх наявних вихорів (контурів циркуляції). Установлено [11], що в даному разі фактором, що лімітує швидкість гомогенізації розплаву, є дифузія добавки через границі вихорів, які утворюються при перемішуванні.

З огляду на сказане, а також на основі раніше проведеного аналізу особливостей роботи електромагнітних перемішувачів біжучого поля [1, 14] фахівці ФТІМС НАН України запропонували та випробували в умовах технологічної ділянки новий електромагнітний перемішувач, дія якого ґрунтується на генеруванні у рідкометалевому середовищі передусім пульсуючого магнітного поля [14–16]. Такий пристрій являє собою одно- або двополюсну електромагнітну систему, що складається з розімкнутого магнітопроводу зі встановленими на кожному полюсі обмотками. Перемішувач розміщується на бічній стінці металургійного агрегату з розплавом, прилягаючи до неї полюсом (полюсами). При пропусканні по обмотці синусоїдального струму виникає магнітне поле, вектор індукції якого змінюється також за синусоїдальним законом («пульсує»).

Експериментальний зразок такого перемішувача було спроєктовано та виготовлено у ФТІМС НАН України. Його випробування й дослідження проводилися на вогнетривкому тиглі місткістю 300 кг алюмінієвого розплаву з температурою 700–750 °С. Перемішувач розташовувався на довгій стороні тигля по центру як по висоті, так і по довжині відносно рідкометалевої ванни. Відстань від полюса перемішувача до розплаву становила 135 мм. Живлення перемішувача проводилося через ступінчастий автотрансформатор від стандартної електричної мережі змінного струму частотою 50 Гц напругою 220 В. Максимальна електрична потужність експериментального зразка перемішувача сягала 60 кВт, однак загалом вона визначалася ступенем напруги живлення та відповідного струму. З огляду на відносно невеликий об'єм тигля й необхідність додержання техніки безпеки, потужність перемішувача в експериментах не перевищувала 20 кВт.

Було досліджено вплив дії магнітного поля на формування потоків у рідкому металі. Так, поблизу стінки тигля з перемішувачем у результаті його дії утворюються вихори, що забезпечують одночасне перемішування розплаву не лише в горизонтальній, а й у вертикальній площинах (рис. 3), що неможливо реалізувати в перемішувачах біжучого магнітного поля [14, 15].

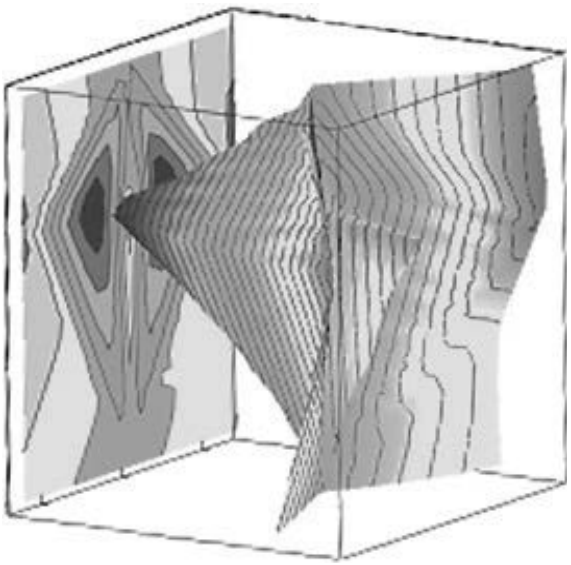


Рис. 3. Формування горизонтальних та вертикальних потоків у металевому розплаві під дією пульсуючого магнітного поля, створюваного експериментальним електромагнітним перемішувачем

Також було досліджено вплив відстані від полюса перемішувача до рідкого металу на швидкість розплаву в ядрі потоку (по нормалі від центру полюса). При потужності перемішувача 20 кВт швидкість розплаву в ядрі потоку сягала 1 м/с і зберігала таке значення на відстані не менше 1,2 м від стінки, поблизу якої розташовано перемішувач. Для порівняння можна відзначити, що для забезпечення зіставних значень швидкості руху розплаву при використанні в печах і міксерах для алюмінію та його сплавів перемішувачів біжучого магнітного поля, які працюють на частоті 50 Гц, їхній індуктор потрібно розташовувати на відстані не більше 60–100 мм від рідкого металу (у середньому майже вдвічі ближче до розплаву, ніж для експериментального перемішувача), що потребує особливих технічних рішень для виготовлення футеровки в місці розташування перемішувача [17, 18].

На основі цих даних було проведено попередню оцінку можливості застосування експериментального перемішувача при його роботі з рідкою сталлю, середня температура обробки якої більше ніж у 2 рази перевищує типову температуру обробки рідких алюмінієвих сплавів [19, 20], що зумовлює необхідність застосування в агрегатах масивнішого шару футеровки і через це вимагає збільшення інтенсивності магнітного поля для забезпечення ефективного перемішування розплаву. При цьому слід також враховувати, що й інші фізичні властивості рідкої сталі, які впливають на процес перемішування, суттєво відрізняються від алюмінієвих розплавів. Так, густина рідкої сталі в 3 рази, а в'язкість — у 5 разів більші за відповідні показники рідких алюмінієвих сплавів [20–22].

З огляду на геометричні розміри дослідженого ковша (див. рис. 1), зокрема його внутрішній діаметр 1600 мм, товщина футеровки бічної стінки близько 235 мм, глибина рідкометалевої ванни близько 1300 мм, можна з високою ймовірністю стверджувати таке: у разі забезпечення потужності експериментального перемішувача на рівні 50–60 кВт інтенсивність перемішування розплаву буде досить високою, при цьому у вертикальній площині не відбуватиметься порушення цілісності захисного шлакового покриву на поверхні рідкометалевої ванни, а в горизонтальній — гідродинамічна дія на стінки футеровки не буде надмірною, спричиняючи її руйнування.

Додатково проведено дослідження спаду поля й зменшення швидкості перемішування розплаву в міру віддалення полюса перемішувача від рідкометалевої ванни. Установлено, що для даного експериментального перемішувача збільшення зазначеної відстані в 1,5 рази (зі 135 мм до 200 мм) призводить до зниження швидкості розплаву в 3 рази.

Узагальнені дані щодо вивчення швидкості руху розплаву під дією магнітного поля експериментального перемішувача наведено в табл. 2. Від'ємні значення швидкості підтверджують той факт, що в певних зонах спостерігається притягування («всмоктування») розплаву до стінки, поблизу якої встановлено перемішувач,

Таблиця 2

Розподіл швидкості руху рідкого алюмінієвого сплаву під впливом магнітного поля експериментального перемішувача у вертикальній та горизонтальній площинах [15]

Швидкість руху розплаву, м/с									
Відстань відносно осі полюса електромагніту		Відстань від футеровки стінки тигля, мм							
		50	100	150	200	250	300	350	400
По вертикалі по осі полюса перемішувача, мм	50	-1,45	-1,66	-1,08	0,63	0,18	0,65	0,80	-0,50
	0 (центр)	-1,65	0,59	0,99	0,95	0,93	0,88	0,78	0,98
	-50	-2,34	-0,69	0,93	1,08	0,95	0,96	0,96	0,76
	-100	-1,77	1,05	1,17	1,07	0,87	0,90	0,82	0,70
По горизонталі при азимутальному відхиленні праворуч чи ліворуч від осі, °	0 (центр)	-1,61	0,62	0,95	0,91	0,83	0,76	0,96	1,12
	10	0,63	1,01	1,09	0,82	0,72	0,77	0,75	0,69
	20	0,42	0,73	1,15	0,86	0,68	0,78	0,73	0,67
	30	0,65	0,99	0,93	0,78	0,89	0,85	0,72	0,62

унаслідок чого утворюються вихори, що забезпечують перемішування розплаву не лише в горизонтальній, але й у вертикальній площинах.

На підставі викладеного можна стверджувати, що експериментальний перемішувач порівняно з аналогічними пристроями біжучого поля є простішим у виготовленні й експлуатації, здатний забезпечити різноманітніші режими перемішування розплаву. Теоретичні й експериментальні дослідження, проведені спільно фахівцями ФТІМС НАН України та Інституту електродинаміки НАН України, показали, що гідродинамічна ефективність і продуктивність експериментального перемішувача приблизно на 20% вища, ніж у перемішувачів біжучого поля з близькими електричними параметрами (кількість ампер-витків, напруга й частота живлення тощо) [23]. Це зумовлює перспективність використання розробленого пристрою для перемішування металевих розплавів, у тому числі рідкої сталі, не лише в плавильних печах чи міксерах, але й у ковшах, зокрема в агрегатах «ківш-піч» (рис. 4).

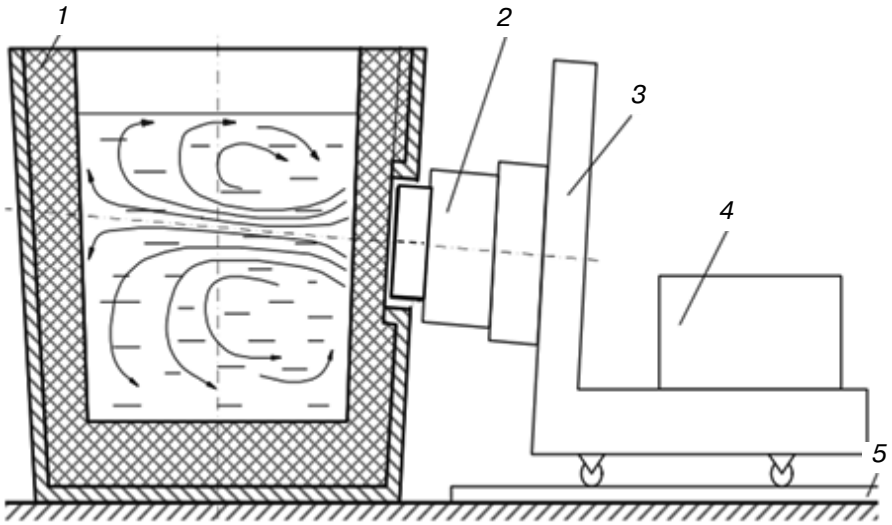
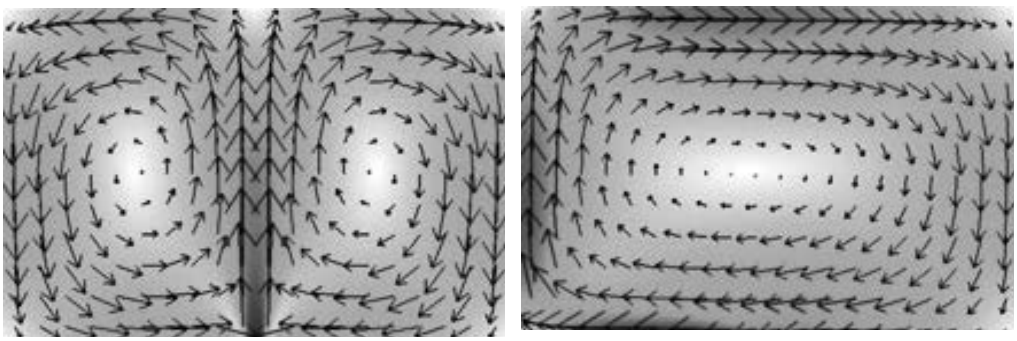


Рис. 4. Принципова схема установки експериментального електромагнітного перемішувача на агрегаті «ківш-піч»: *1* — ківш; *2* — експериментальний електромагнітний перемішувач; *3* — візок для переміщення перемішувача; *4* — противага; *5* — рейковий шлях

Крім того, як уже зазначено, можливе виготовлення експериментального перемішувача у вигляді двополюсного пристрою з, відповідно, двома індукційними обмотками. Математичне моделювання, проведене фахівцями Інституту електродинаміки НАН України, та подальша перевірка його результатів в умовах технологічної ділянки відділу магнітної гідродинаміки ФТІМС НАН України показали таке [24–27].

При живленні обох обмоток перемішувача від однієї фази електричної мережі збуджується пульсуюче магнітне поле, а якщо кожну обмотку живити від окремої фази — біжуче магнітне поле. Тобто якщо періодично, у тому числі за заданою програмою, змінювати режим живлення такого двополюсного електромагнітного перемішувача з однофазного на двофазний, і навпаки, то по черзі генеруватимуться пульсуюче й біжуче магнітні поля, що істотно розширить можливості організації різноманітних режимів перемішування металевих розплавів (рис. 5) [24–27].



а *б*

Рис. 5. Утворення вихорів при перемішуванні металевого розплаву під дією пульсуючого (*а*) та біжучого (*б*) магнітних полів, створюваних експериментальним електромагнітним перемішувачем [24–27]

Перевірка запропонованого способу живлення перемішувача на рідкому алюмінієвому сплаві підтвердила розширення можливостей реалізації різних режимів перемішування розплавів.

Висновки

Таким чином, проведений теоретичний аналіз, розрахунки, моделювання й натурні дослідження свідчать про ефективність та перспективність застосування нового електромагнітного перемішувача конструкції ФТІМС НАН України для перемішування рідких металевих сплавів, у тому числі сталі, при їх доведенні в агрегатах типу «ківш-піч». При цьому можуть бути суттєво розширені технологічні можливості таких металургійних агрегатів у плані забезпечення більш ефективних режимів шлакової та флюсової обробки розплавів, видалення з них газів і неметалевих включень, введення легуючих і модифікуючих добавок, поєднання електромагнітного перемішування з процесами продування рідкого металу інертними газами або вакуумуванням тощо. Одночасно висока керованість процесом електромагнітного перемішування створює передумови для належного контролю стану вогнетривкої футеровки агрегату «ківш-піч» із метою подовження терміну його безаварійної міжремонтної експлуатації, що додатково покращить техніко-економічні показники виготовлення високоякісної литої металопродукції.

Список літератури

1 Смірнов О.М., Осипенко В.В., Семірягін С.В., Горюк М.С., Семенко А.Ю., Скоробагатько Ю.П. Перемішування металевих розплавів як засіб підвищення ефективності функціонування агрегатів «ківш-піч». Повідомлення 1. Способи та системи перемішування рідких сплавів у металургійних агрегатах (огляд). *Процеси лиття*. 2023. № 1 (151). С. 3–11.

2 Смирнов А.Н., Немсадзе Г.Г., Куберский С.В. Повышение стойкости футеровки сталеразливочных ковшей (Монография). Днепр: GIR-International, 2018. 205 с.

3 Смирнов А.Н., Цупрун А.Ю., Пимоненко В.А. и др Оптимизация работы ковшей для агрегата «печь-ковш» в условиях ДП «УБиВТ». *Наукові праці Донецького національного технічного університету: Серія «Металургія».* 2002. Вип. 40. С. 118–124.

4 Гридин С.В., Цупрун А.Ю., Минц А.Я. Математическое и физическое моделирование перемешивания металла в ковше при донной продувке аргоном. *Металлургическая и горнорудная промышленность.* 2002. № 10. С. 110–114.

5 Teng L. Effect of EMS on Inclusion Removal in Ladle Furnace for Specialty Steel Production. AISTech 2017 Proceedings. © 2017 by AIST. P. 1395–1402.

6 Сайт компанії «General Investment Resources (GIR) International» URL: www.gir.com.ua.

7 Тир Л.Л., Столов М.Я. Электромагнитные устройства для управления циркуляцией расплава в электропечах. Москва: Металлургия, 1975. 224 с.

8 Тир Л.Л., Столов М. Я. Электромагнитные устройства для управления циркуляцией расплава в электропечах: 2-ое изд., перераб. и доп. Москва: Металлургия, 1991. 280 с.

9 Исследования в области промышленного электронагрева: Сб. научн. тр. / ВНИИЭТО. Москва: Энергия, 1969. № 3. 308 с.

10 Столов М.Я., Левина М.Я. Процесс гомогенизации расплава при легировании в индукционных тигельных печах. *Исследования в области промышленного электронагрева* / ВНИИЭТО. Москва: Энергия, 1979. № 9. С. 91–98.

11 Булыгин Л.Л. XII Рижское совещание по магнитной гидродинамике. Т. II: Тезисы докладов. Саласпилс: Институт физики АН ЛатвССР, 1987. С. 223–226.

12 Дубоделов В.И., Кочегура Н.М., Казачков С.П. и др. Воздействие движущейся жидкометаллической среды на твердожидкое состояние сплава. *Литейные свойства сплавов. Кристаллизационные процессы в сплавах и отливках.* Киев: Институт проблем литья АН УССР, 1972. С. 165–167.

13 Довбня В.Д., Дубоделов В.И., Полищук В.П. и др. К вопросу о комплексном использовании температурного и гидродинамического факторов для интенсификации литейных процессов в магнитодинамических установках. *Тезисы докладов VII Рижского совещания по магнитной гидродинамике.* Рига, 1972. Ч. 3. С. 15–17.

14 Дубоделов В.И, Фикссен 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. 12–18.

15 Dubodelov V. , Fikssen V., Slazhniev M., Gorshkov A., Goryuk M., Skorobagatko Yu. Development of Electromagnetic Stirrer of Pulsing Magnetic Field for Melting of Aluminium Alloys in Reverberatory Furnaces. Proceedings of the 6th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials «EPM 2009». October 19–23, 2009. Dresden, Germany. P. 599–602.

16 Патент України № 113617. Електромагнітний перемішувач пульсуючого магнітного поля для рідких металів / Фікссен В.М., Дубодєлов В.І., Слажнєв М.А., Горюк М.С. (ФТІМС НАН України). МПК (2016.01) F27D 27/00, H05B 6/34, H05B 6/36, C22B 9/02, C21C 7/00. Заявл. 15.04.2013 р. № a 2013 04794. Опубл. 27.02.2017, Бюл. № 4.

17 Non ferrous casting — Equipment MHD Technology. Krãsainie lẽjumi, Riga, Latvia. 2004.

18 The ABB Group. URL: https://new.abb.com/metals/abb-in-metals/offering/products/metallurgy-products

19 Кухлинг Х. Справочник по физике: Пре. С нем. 2-е изд. Москва: Мир, 1985. 520 с., ил.

20 Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. Москва: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

21 Алюминий: свойства и физическое металловедение: Справ. изд. Пер. с англ. / Под ред. Хэтча Дж. Е. Москва: Металлургия, 1989. 422 с.

22 Арсентьев П.П., Коледов Л.А. Металлические расплавы и их свойства. Металлургия, 1976. 376 с.

23 Дубоделов В.И., Фикссен В.Н., Глухенький А.И., Гориславец Ю.М. МГД перемешиватели алюминиевых сплавов с пульсирующим магнитным полем. *Технічна електродинаміка*. 2009. № 1. С. 61–66.

24 Dubodelov V.I., Gorislavets Yu.M., A.I. Glukhenkii, Fikssen V. M.. Electromagnetic stirrer of liquid metal with alternate action of traveling and pulsating magnetic fields. Proceedings of the 8th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials EPM2015. SIMAP Laboratory – EPM Group: 2015, ISBN 978-2-9553861-0-1. October 12-16, 2015. Cannes, France. P. 605–608.

25 Dubodelov V., Fikssen V., Gorislavets Y., Glukhenkyi A., Bondar O. Controlling of hydrodynamic and thermal state of melt while stirring with travelling and pulsing magnetic fields. Abstract No. 52 of the 10th PAMIR International Conference – Fundamental and Applied MHD, June 20–24, 2016, Cagliari, Italy.

26 Дубоделов В.И., Фикссен В.Н., Гориславец Ю.М., Глухенький А.И., Бондар А.И. Моделирование электромагнитного перемешивателя металлических расплавов под воздействием пульсирующего и бегущего магнитных полей. *Процессы литья*. 2016. № 4. С. 3–9.

27 Патент на корисну модель № 137596. Спосіб електромагнітного перемішування рідкого металу / МПК (2006) F27D 27/00 / Дубодєлов В.І., Гориславець Ю.М., Глухенький О.І., Горюк М.С., Фікссен В.М., Бондар О.І. Інститут електродинаміки (ІЕД) НАН України (UA). Заявл. 24.04.2019 № u201904455. Опубл. 25.10.2019, Бюл. № 20.

Надійшла 24.04.2023

References

1 Smirnov O.M., Osypenko V.V., Semiryagin S.V., Goryuk M.S., Semenko A.Yu., Skorobagatko Yu. P. (2023). Stirring of metal melts for improving the efficiency of the «ladle – furnace» units. Message 1. Methods and systems for stirring of liquid alloys in metallurgical aggregates (Review). *Casting Processes*. No. 1 (151). pp. 3–11 [in Ukrainian].

2 Smirnov A.N., Nemsadze G.G., Kubersky S.V. (2018). Increasing the durability of the lining of steel-pouring ladles (Monograph). Dnipro: GIR-International, 205 p. [in Russian].

3 Smirnov A.N., Tsuprun A.Yu., Pymonenko V. A. (2002). Optimisation of operation of ladles for the «furnace-ladle» unit in the conditions of the State Enterprise «UByVT». *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu: Seriia «Metalurhiia»*. Issue 40. pp. 118–124 [in Russian].

4 Gridin S.V., Tsuprun A.Yu., Mints A.Ya. (2002). Mathematical and physical modeling of metal mixing in a ladle during bottom blowing with argon. *Metallurhycheskaia y hornorudnaia promishlennost.* No. 10. pp. 110–114 [in Russian].

5 Teng L. (2017). Effect of EMS on Inclusion Removal in Ladle Furnace for Specialty Steel Production. AISTech 2017 Proceedings by AIST. pp. 1395–1402.

6 General Investment Resources (GIR) International. URL: www.gir.com.ua. [in Ukrainian].

7 Tire L.L., Stolov M.Ya. (1975). Electromagnetic devices for melt circulation control in electric furnaces. Metallurgy, 224 p. [in Russian].

8 Tire L.L., Stolov M.Ya. (1991). Electromagnetic Devices for Melt Circulation Control in Electric Furnaces: 2nd ed., Revised. and additional. Metallurgy, 280 p. [in Russian].

9 Scientific reports. (1969). Research in the field of industrial electric heating: VNIIETO. Energiia. No. 3. 308 p. [in Russian].

10 Stolov M.Ya., Levina M.Ya. (1979). The process of melt homogenization during alloying in induction crucible furnaces. scientific Proceedings: Research in the field of industrial electric heating. VNIIETO. Energiia. No. 9. pp. 91–98 [in Russian].

11 Bulygin L.L. (1987). XII Riga meeting on magnetohydrodynamics. Issue II: Abstracts of reports. Salaspils, Institute of Physics, Academy of Sciences of the Latvian SSR, pp. 223–226 [in Russian].

12 Dubodelov V.I., Kochegura N.M., Kazachkov S.P. et al. (1972). Influence of a moving liquid-metal medium on the solid-liquid state of the alloy. Casting properties of alloys. Crystallization processes in alloys and castings. Kyiv: Institute of Casting Problems of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. pp. 165–167 [in Russian].

13 Dovbnya V.D., Dubodelov V.I., Polishchuk V.P. et al. (1972). On the question of the complex use of temperature and hydrodynamic factors for the intensification of casting processes in magnetodynamic installations. Abstracts of reports of the VII Riga meeting on magnetohydrodynamics, Riga, 1972. Part 3. pp. 15–17 [in Russian].

14 Dubodelov V.I., Fixsen V.N., Goryuk M.S., Slazhnev N.A., Skorobagatko Yu.P. (2008). Modern devices for electromagnetic mixing of aluminum melts in high-capacity furnaces and mixers. Metal and Casting of Ukraine. No. 6. pp. 12–18 [in Russian].

15 Dubodelov V., Fikssen V., Slazhniev M., Gorshkov A., Goryuk M., Skorobagatko Yu. (2009). Development of Electromagnetic Stirrer of Pulsing Magnetic Field for Melting of Aluminium Alloys in Reverberatory Furnaces. Proceedings of the 6th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials “EPM 2009”, October 19-23, Dresden, Germany. pp. 599–602.

16 Pulsating magnetic field electromagnetic stirrer for liquid metals. Patent of Ukraine for an invention. UA113617 (from 27.02.2017) / Fixsen V.M., Dubodelov V.I., Slazhnev M.A., Goryuk M. S. [in Ukrainian].

17 Nonferrous casting – Equipment MHD Technology. Krãsainie lẽjumi, Riga, Latvia. 2004.

18 The ABB Group. URL: https://new.abb.com/metals/abb-in-metals/offering/products/metallurgy-products.

19 Kuhling H. (1985). Handbook of Physics: Pre. With him. 2nd ed. Mir, 520 p. [in Russian].

20 Physical Quantities: Handbook. Ed. I.S. Grigorieva, E.Z. Meilikhov. Energoatomizdat. (1991). 1232 p. [in Russian].

21 Aluminum: properties and physical metallurgy: Ref. ed. from English Hatch J. E. Metallurgy. (1989). 422 p. [in Russian].

22 Arsentiev P.P., Koledov L.A. (1976). Metal melts and their properties. Metallurgy. 376 p. [in Russian].

23 Dubodelov V.I., Fixsen V.N., Glukhenky A.I., Gorislavets Yu.M. (2009). MHD stirrers of aluminum alloys with a pulsating magnetic field. Tekhnichna elektrodinamika. No. 1. pp. 61–66 [in Russian].

24 Dubodelov V.I., Gorislavets Yu.M., Glukhenkii A.I., Fikssen V.M. (2015). Electromagnetic stirrer of liquid metal with alternate action of traveling and pulsating magnetic fields. Proceedings of the 8th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials EPM2015. SIMAP Laboratory – EPM Group, ISBN 978-2-9553861-0-1. pp. 605–608.

25 Dubodelov V., Fikssen V., Gorislavets Y., Glukhenkyi A., Bondar O.. (2016). Controlling of hydrodynamic and thermal state of melt while stirring with travelling and pulsing magnetic fields. Abstract No. 52 of the 10th PAMIR International Conference – Fundamental and Applied MHD, June 20-24, Cagliari, Italy.

26 Dubodelov V.I., Fixsen V.N., Gorislavets Yu.M., Glukhenky A.I., Bondar A.I. (2016). Modeling of an electromagnetic stirrer of metal melts under the influence of pulsating and traveling magnetic fields. Casting processes. No. 4. pp. 3–9 [in Russian].

27 Method of electromagnetic stirring of liquid metal. Patent of Ukraine on utility model. UA137596 (from 25.10.19) / V.I. Dubodelov, Y.M. Horyslavets, O.I. Gluhenkyi, M.S. Goryuk, V. Fixsen. M., O.I. Bondar [in Ukrainian].

Received 24.04.2023

O.M. Smirnov[1]* , *Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of the Department;*
e-mail: stalevoz@i.ua, ORCID 0000-0001-5247-3908
V.V. Osypenko** , *CEO LTD; e-mail: g.d.destal@ukr.net;*
ORCID 0009-0001-9934-7615
S.V. Semiryagin** , *PhD (Engin.), Associate Professor, Deputy CEO;*
e-mail: td.destal@ukr.net; ORCID 0000-0002-8733-3216
M.S. Goryuk* , *PhD (Engin.), Deputy of Head of the Department;*
e-mail: gormak72@gmail.com; ORCID 0000-0002-7561-6948
A.Yu. Semenko* , *PhD (Engin.), Senior Researcher;*
e-mail: semenko.au@gmail.com; ORCID 0000-0002-0448-1636
Yu.P. Skorobagatko* , *PhD (Engin.), Senior Researcher;*
e-mail: yulka.ukr@gmail.com; ORCID 0000-0002-1724-9895

*Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
**LTD Scientific and Manufacturing Enterprise Dneproenergostal (Zaporizhzhia, Ukraine)

STIRRING OF METAL MELTS FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE "LADLE – FURNACE" UNITS
Message 2. NEW METHOD FOR ELECTROMAGNETIC STIRRING OF METALLIC MELT IN "LADLE – FURNACE" UNIT

The features of refractory lining's wear of "ladle – furnace" unit at work on metallurgical mini-plant with intensive stirring of liquid metal by gas and electromagnetic field is studied. It was established that the most affected areas are slag zone, ladle's bottom, as well as side wall, near which the electromagnetic stirrer is located. The stability of these areas determines the duration of the ladle working between repairs. Recommendations for recovery of the lining's working layer have been developed. Also, there are formulated the requirements for rationalization of melt stirring modes. Theoretical studying of influence of electromagnetic stirring on heat & mass transfer processes in liquid metal bath of metallurgical aggregates (in particular, during homogenization of alloy in free turbulence mode at input of additives) was investigated. New electromagnetic stirrer was designed in the PTIMA NASU, and it is proposed for technologies of melting and finishing of alloys. The stirrer creates the pulsating magnetic field, and its force lines spread equally intensively both in the horizontal and vertical planes. It is shown that design of developed stirrer, its power supply by industrial frequency 50 Hz, and physical nature of the generated field's action provide the simplicity of its making and operation. So, new stirrer has essential technical, economic and technological advantages in comparison with known stirrers of travelling magnetic field at the same parameters of electromagnetic systems. Joint research performed by specialists of the PTIMA NASU and IED NASU with using mathematical modeling and experiments on aluminum melt showed the following. It is possible to realize a wide range of stirring modes, both intensity and melt movement directions. Thus, the application of developed electromagnetic stirrer in the "ladle – furnace" units will allow to significantly expand the possibilities for finishing liquid alloys on chemical composition and temperature, especially at small metallurgical plants.

Keywords: *"ladle – furnace" unit, metallic melt, electromagnetic stirring, refractory lining, pulsing and travelling magnetic field.*