

УДК 621.746.558.086.4

О.В. Гресс, зав. кафедрою, професор, д.т.н.

А.Ю. Омельчук, аспірант

ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ГІДРОДИНАМІКИ У КОВШАХ МАЛОЇ МІСТКОСТІ ЗА КОМБІНОВАНИМ СПОСОБОМ ПЕРЕМІШУВАННЯ СТАЛІ

*Дніпродзержинський державний технічний університет
(Повідомлення 2)*

Подано результати фізичного моделювання гідродинаміки металу в ливарному ковші за електромагнітного перемішування та одночасного продування крізь донну фурму. Знайдено регресійні залежності швидкості потоків металу в об'ємі ковша.

Ключові слова: ливарний ківш, моделювання, гідродинаміка, електромагнітне перемішування, інертний газ, продування

Представлены результаты физического моделирования гидродинамики металла в литейном ковше при электромагнитном перемешивании и одновременной продувке через донную фурму. Найдены регрессионные зависимости скорости потоков металла в объеме ковша.

Ключевые слова: литейный ковш, моделирование, гидродинамика, электромагнитное перемешивание, инертный газ, продувка

The results of physical model operation of hydrodynamics for metal in a foundry ladle at electromagnetic interfusion and simultaneous blowing out through ground lance are offered. Regressive dependences of speed of metal streams in the volume of ladle are found.

Keywords: foundry ladle, model operation, hydrodynamics, electromagnetic mixing, inert gas, blowing

Вступ. Скорочення часу позапічної обробки металу спричинює необхідність збільшення інтенсивності конвективних потоків за допомогою застосування додаткових способів перемішування. Світовий досвід [1-3] свідчить про те, що найкращих результатів впливу на якість сталі сягають під час використання комбінованих способів інтенсифікації потоків рідкого металу.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження поведінки та визначення швидкості потоків розплаву в ливарних ковшах за одночасної обробки металу продуванням аргоном і електромагнітним перемішуванням (комбінований спосіб).

Методика досліджень. Під час дослідження гідродинаміки металу в процесі його комбінованої обробки в ливарних ковшах використовували методи фізичного моделювання. Зокрема, рідкий метал замінювали водою, інертний газ – повітрям, а пристрій електромагнітного перемішування – спеціальною установкою, що відтворювала характерний для електромагнітного перемішування контур гідродинамічних потоків розплаву. Швидкість потоків рідини визначали за допомогою методу «трассерів». Інші умови моделювання наведено у роботі [4]. Додатково для одержання якісної картини впливу металу футерівку днища ковша покривали рівномірним шаром сріблястого графіту. Швидкість гомогенізації ванни металу визначали шляхом введення кольорової рідини.

Оскільки середовище, яке моделюють, є гетерофазним (метал, газ), виконання

моделі здійснювали відповідно до теорії подоби. Згідно положень теорії подоби масштаб зазначених моделей можливо визначити за допомогою чисел Вебера We ($We = \frac{\sigma_p}{\rho_p \cdot \ell \cdot W^2}$, тут і далі σ – поверхневий натяг, ρ – щільність, ℓ – характерний розмір, W – швидкість, індекс «р» стосується рідини) і Лапласа ($La = \frac{\sigma_p}{\rho_p \cdot \ell^2 \cdot g}$, тут g – прискорення вільного падіння). Оскільки значення швидкості у натурному зразку є невідомими, для визначення масштабу моделі K_ℓ використовували число Лапласа за умови $La = idem$:

$$K_\ell = \sqrt{\frac{K_{\sigma_p}}{K_{\rho_p} \cdot K_g}}, \quad (1)$$

де $K_{\sigma_p} = \frac{\sigma'_p}{\sigma_p}$, $K_{\rho_p} = \frac{\rho'_p}{\rho_p}$, $K_g = 1$ – масштаби, відповідно, поверхневого натягу, щільності та прискорення вільного падіння (тут і далі «штрих» стосується моделі).

Поверхневий натяг води та сталі, згідно літературних джерел [5], знаходиться у діапазоні, відповідно, 0,073...0,075 і 1,2...1,865 Н/м, щільність води та сталі знаходиться у межах, відповідно, 998,2 і 7000...7500 кг/м³. Підставлення чисельних значень σ і ρ до рівняння (1) дає значення масштабу моделювання $K_\ell = \ell'/\ell$ у межах 0,53...0,69.

Для перерахування кількісних характеристик швидкості переміщення моделюючого гетерофазного середовища на реальні значення, згідно з теорією подоби, використовували число Архімеда ($Ar = \frac{W^2 \cdot \rho_g}{g \cdot \ell \cdot \rho_p}$, індекс «g» стосується газу). Перерахункове рівняння для швидкості має вигляд:

$$W = W' \cdot \sqrt{\frac{K_{\rho_g}}{K_\ell \cdot K_{\rho_p}}}. \quad (2)$$

Масштаб часу (τ) визначали за умови сталості критерію гомохронності:

$$K_\tau = \frac{\tau'}{\tau} = \frac{\ell' \cdot W}{\ell \cdot W'} = \sqrt{K_\ell}. \quad (3)$$

Витрату дуття на моделі розраховували за формулою:

$$v' = v \cdot \sqrt{K_\ell^5}. \quad (4)$$

Фізичне моделювання гідродинаміки металу в ливарних ковшах за умов лабораторії кафедри ливарного виробництва чорних і кольорових металів Дніпродзержинського державного технічного університету виконували на прозорій експериментальній установці у масштабі 0,6 реального однотонного ливарного ковша, що відповідає положенням теорії подоби та дозволяє одержувати кількісні характеристики руху потоків металу в реальному зразку (рис. 1,а).

Циркуляційний контур рідинних потоків, що за формою є характерним для електромагнітного способу перемішування сталі в ковші, забезпечували за рахунок

використання спеціального пристрою, що встановлювали у задане місце об'єму моделі ковша за допомогою розроблених механічних кріплень з можливістю переміщення пристрою залежно від задач експерименту (рис. 1,б). Оскільки потоки розплаву, створено продуванням газом (інтенсивність подавання 1,2...3,2 л/(хв·т) і спрямовано знизу вгору, то в усіх досліджених випадках потоки металу, що індуковано пристроєм електромагнітного перемішування металу (ПЕМПМ), спрямовано зверху вниз, сприяючи перемішуванню всього об'єму ванни ковша. Живлення електродвигуна пристрою виконували за допомогою постійного струму, що регулюють. Для моделювання продування металу інертним газом у днищі моделі ковша було передбачено продувальний вузол, до якого з надлишковим тиском подавали повітря, що надходило по гнучкому шлангу від компресора. Тиск повітря та його витрату контролювали за показниками манометра та ротаметра.

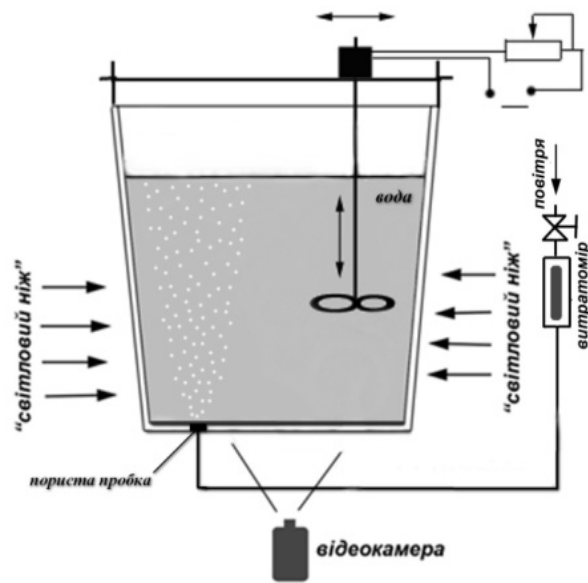


Рисунок 1 – Установка для моделювання гідродинаміки металу в ливарних ковшах під час комбінованого способу перемішування:
 а - фото установки; б - схема установки

Результати досліджень. Внаслідок моделювання гідродинаміки металу у ливарних ковшах одержано наступні результати. За розташуванням місця накладення електромагнітного впливу на висоті 0,25 від днища ковша потоки металу від дії ПЕМПМ виникали досить близько до днища та були спрямовані у його бік. Визначено, що в такому разі біля місця удару струменя металу буде відбуватися руйнування футерівки днища. Внаслідок відбитого від днища ковша струменя металу утворювався вигин факелу газо-металевої суміші у нижній його частині, який збільшувався за мірою підвищення потужності ПЕМПМ та постійною витратою газу. Із збільшенням витрати газу, незалежно від потужності ПЕМПМ, ефект викривлення факелу знижувався та практично ставав непомітним за максимальної інтенсивності подавання повітря. В області днища від осі фурми до стінки ковша утворювалася застійна зона, яка зменшувалася за мірою збільшення витрати газу, проте повністю не зникала. Незначна застійна зона виникала також щодо осі ковша у нижній його частині.

При розташуванні ПЕМПМ на висоті 0,5 від днища ковша кінетична енергія

удару струменя металу від дії ПЕМПМ об днище ковша знижувалася. Під час збільшення потужності ПЕМПМ відбувалося зміщення униз зони викривлення факелу. Спостерігали інтенсифікування перемішування, циркуляційні потоки зростали в об'ємах на 15...20 %. Застійна зона щодо осі внизу ковша зникла, проте явно було видно застійну зону від осі фурми до ближньої стінки ковша. Вона майже повністю зникла за максимальної витрати газу, але у такому разі в місці виходу газу з ванни на дзеркалі металу утворювалося «око». У такому разі швидкість гомогенізації ванни металу була вищою, ніж при розташуванні ПЕМПМ на висоті 0,25 від днища ковша. Отже, для запобігання виникнення «ока» на поверхні металу доцільно застосовувати ПЕМПМ з невеликою потужністю при малих питомих витратах газу.

За розташуванням ПЕМПМ на висоті 0,75 від днища ковша енергія струменя від дії ПЕМПМ при ударі об днище знижувалася вже за невеликої потужності ПЕМПМ, але над ним на поверхні металу утворювалася «воронка». Це призводило до зтягування шлаку в метал. Вигин факела зміщувався вниз щодо його осі. Утворювалася застійна зона між фурмою та ближньою стінкою. Циркуляційні потоки зливалися в один великий контур, але, із збільшенням потужності ПЕМПМ, розділялися на два контури: великий – внизу и малий – вгорі. З'являлися висхідні потоки вздовж стінки, що розташована поряд із фурмою. Із збільшенням питомих витрат газу вигин факела дещо зменшувався, але, в середньому, був більшим порівняно з попередніми експериментами, застійна зона між фурмою та стінкою зменшувалася, геометричні розміри «ока» металу зростали.

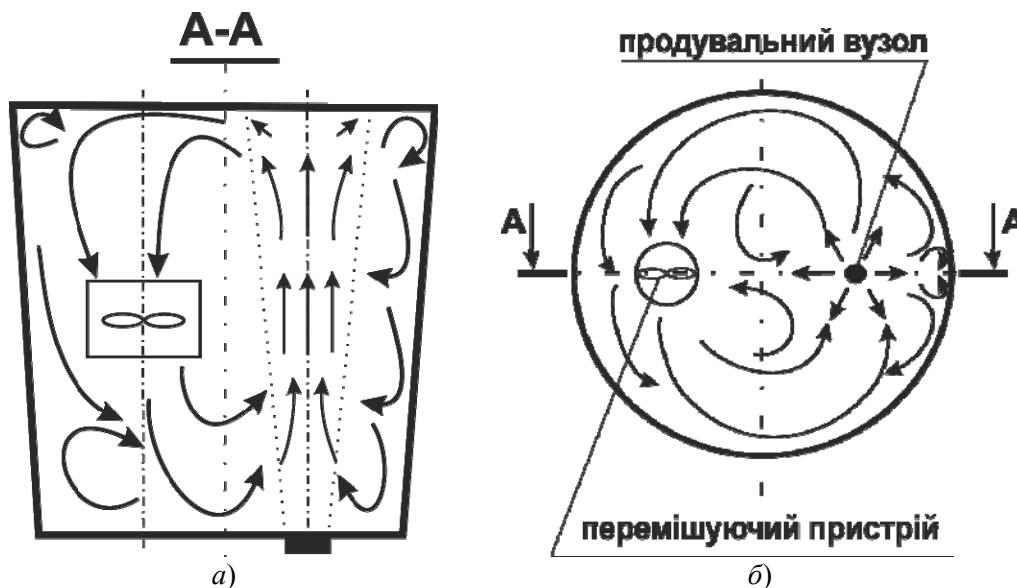


Рисунок 2 – Загальна схема потоків металу в ковші:
а - вид зверху; б - вертикальний розріз ковша

Таким чином, найбільш ефективним, з точки зору зменшення часу повного перемішування металу, є розташування місця прикладання електромагнітного перемішування на відстані 0,5...0,6 висоти ковша за невеликої потужності електромагнітного поля та питомої витрати газу крізь донну фурму 2,2 л/(хв·т), якого розташували на 0,5 радіусу біля протилежної стінки ковша. Загальну схему напрямів руху потоків металу у ковші в такому разі наведено на рис. 2.

В результаті обробки фото- та відеоматеріалів знайдено, що швидкості потоків металу за різної потужності електромагнітного поля знаходяться у межах 0,023...

0,096 м/с (інтенсивність подавання газу 1,2 л/(хв·т), 0,030...0,121 м/с (інтенсивність 2,2 л/(хв·т) та 0,056...0,189 м/с (інтенсивність 3,2 л/(хв·т)). У середньому, абсолютна швидкість потоків, як в області продування газом, так і в зоні накладення електромагнітного впливу, біля стінок агрегату є декілька вищою, ніж у центрі об'єму металу.

На основі експериментальних даних побудовано графічну залежність абсолютних значень швидкості потоків рідкого металу (W , м/с) у ливарному ковші (тут і далі r – відстань від осі ковша, відносні одиниці; H – відстань від днища ковша, відносні одиниці) (рис. 3).

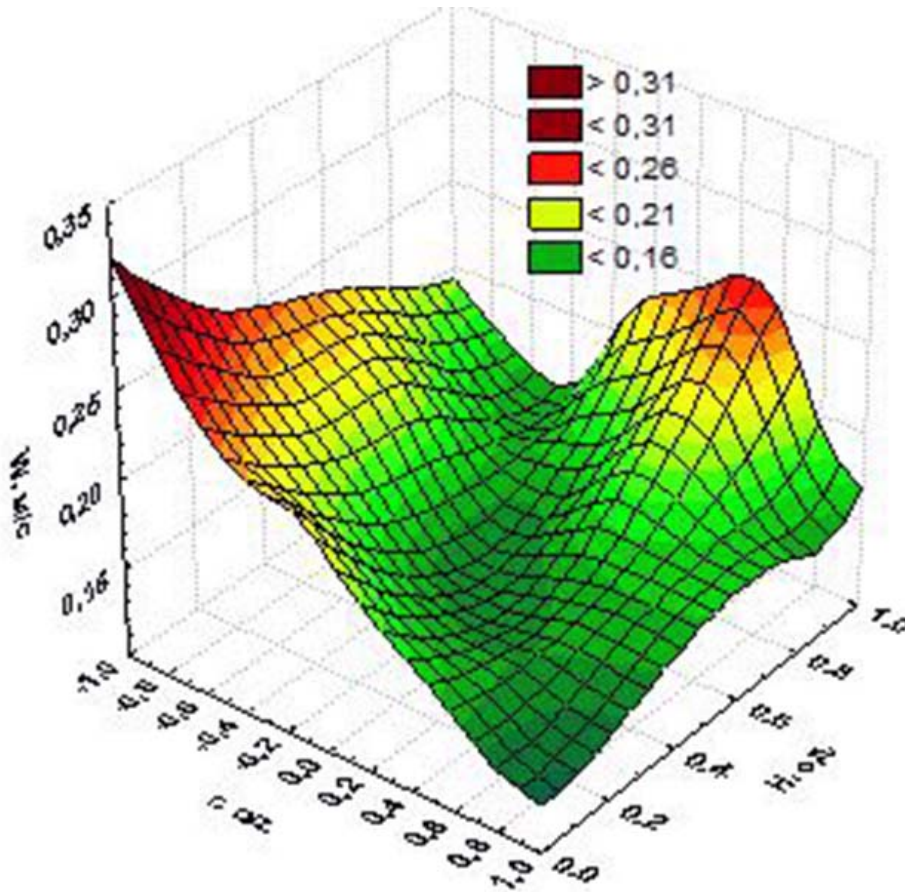


Рисунок 3 – Розподіл швидкості потоків металу в ковші

За результатами статистичних розрахунків (довірчий інтервал вірогідності у всіх розрахунках прийнятий 95 %) знайдено регресійну залежність швидкості потоків металу в площині, що проходить через осі ковша та донної фурми:

$$W = 0,173 + 0,112 P + 0,069 I + 0,028 V - 0,035 r + 0,193 H + 0,006 P^2 + 0,016 I^2 + 0,026 V^2 + 0,032 r^2 + 0,211 H^2 ; R = 0,49 , \quad (5)$$

де P – висота розташування місця накладання електромагнітного впливу від днища ковша, відносні одиниці; I – інтенсивність витрати дуття, л/(хв·т); V – швидкість руху шарів рідини в зоні розташування ПЕМПМ, відносні одиниці; R – коефіцієнт кореляції.

Аналізуючи одержану залежність, можна стверджувати, що на функцію відгуку найбільше впливає висота розташування контрольних точок. Найменша швидкість спостерігається при розташуванні ПЕМПМ у нижній частині ковша та за мінімальної

інтенсивності продування ванни металу. Слід відмітити досить низьке значення коефіцієнту кореляції регресійного рівняння. Цей факт означає високу турбулентність потоків рідини, що не може бути описана рівняннями другого порядку та вимагає застосування апарату математичного моделювання.

Проте, вирішення задачі оптимізації багато екстремальної функції (5) дозволило визначити, що максимальна швидкість потоків сягається біля стінки агрегату зі сторони продувального вузла поблизу дзеркала металу при розташуванні ПЕМПМ на висоті 0,75 наливу металу за витрати дуття 3,2 л/(хв·т). Отже, саме через цю точку внутрішнього простору ковша за вищезазначених умов слід вводити додаткові, у тому числі і дисперсні матеріали.

Проте, як було описано вище, при такому положенні зони примусового перемішування над нею на поверхні металу утворюватиметься «воронка», що призводить до забруднення металу залученим до нього шлаком. Також за максимальної витрати дуття у місці виходу газу з ванни на дзеркалі металу створюватиметься «око».

Тому, більш прийнятним, на наш погляд, є інший екстремум, що передбачає розташування зони уведення додаткових матеріалів приблизно на 0,5 висоти наливу металу в ковші за зменшенням інтенсивності витрати газу до 2,2 л/(хв·т). Також визначено, що реагенти недоцільно вводити у ванну ковша на висоті 0,63 наливу металу на відстані 0,26 від осі ковша в сторону розташування донної фурми.

Висновки. Виконані дослідження дозволили визначити якісну картину та кількісні характеристики поведінки металу в об'ємі ливарних ковшів під час продування їх газом і одночасної дії електромагнітного поля. Вирішення задачі оптимізації знайдених екстремальних регресійних залежностей дозволило запропонувати оптимальні точки уведення додаткових дисперсних матеріалів до об'єму ливарного ковша.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Большаков, В. И.* Направления совершенствования металлургического оборудования [Текст] / В. И. Большаков // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – № 2 (217). – С. 86-88.
2. *Назаров, С. Н.* Опыт совершенствования технологии внепечной обработки стали [Текст] / С. Н. Назаров, А. В. Грабов, С. А. Мотренко и др. // Сталь. – 2001. – № 12. – С. 20-22.
3. Комплексная внепечная обработка стали на установках ковш-печь [Электронный ресурс]. Режим доступа: \www/ URL: <http://metallurgiya.net/elektrometallurgiya/82-kompleksnaya-vneprechnaya-obrabotka-stali-na-ustanovkakh-kovsh-pech.html>. – Загл. с экрана.
4. *Гресс, О. В.* Фізичне моделювання процесів гідродинамики в ковшах малої місткості за комбінованим способом перемішування сталі (Повідомлення 1) / О. В. Гресс, А. Ю. Омельчук // Металургія : наукові праці Запорізької державної академії. – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2014. – Вип. 1(31). – С. 39-45.
5. *Огурцов, А. П.* Непрерывное литье стали [Текст] : монография / А. П. Огурцов, А. В. Гресс. – Днепропетровск : Системные технологии, 2002. – 675 с. – Библиогр. : с. 651-674. – ISBN 966-7316-67-X.

Стаття надійшла до редакції 28.03.2014 р.
Рецензент, проф. О. П. Огурцов

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука
<http://www.zgia.zp.ua>