

УДК 621.746.558.086.4

О.В. Гресс, зав. кафедрою, д.т.н., професор
А.Ю. Омельчук, аспірант

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

*Дніпродзержинський державний технічний університет
(Повідомлення І)*

Представлены результаты физического моделирования гидродинамики металла в литейном ковше при электромагнитном перемешивании. Найдены регрессионные зависимости скорости потоков металла в объеме ковша.

Ключевые слова: литейный ковш, моделирование, гидродинамика, электромагнитное перемешивание, статистика, оптимизация

Подано результати фізичного моделювання гідродинаміки металу в ливарному ковші за електромагнітним перемішуванням. Знайдено регресійні залежності швидкості потоків металу в об'ємі ливарного ковша.

Ключові слова: ливарний ківш, моделювання, гідродинаміка, електромагнітне перемішування, статистика, оптимізація

There are presented results of physical modeling for hydrodynamics of metal in a casting ladle at electromagnetic mixing are brought. There are found regressive dependences of speed for metal streams in the volume of casting ladle.

Key words: casting ladle, modeling, hydrodynamics, electromagnetic mixing, statistics, optimization

Вступ. Для більш ефективного застосування ливарних ковшів як металургійних агрегатів, що дозволяють підвищити якість рідкого металу, слід, виходячи з їхньої специфіки, додатково використовувати примусове перемішування. Одним з найсучасніших методів вимушеного перемішування розплаву в ковші є використання електромагнітного поля [1]. Перевага такого методу перед іншими полягає у відсутності оголення дзеркала металу а, отже, контакту металу з атмосферою. Окрім того, під час накладення електромагнітного поля на розплав з'являються широкі можливості щодо регулювання потужності перемішування, а також змінювання напрямку руху потоків металу. На жаль, інформація щодо поведження рідкого металу в ливарних ковшах під час електромагнітного перемішування в літературних джерелах є або застарілою [1], що стосується ковшів великої місткості, або відсутньою чи такою, що спричинює ряд суттєвих зауважень [2-4]. Отже, тема даної роботи є вельми актуальною.

Постановка задачі. Метою роботи є дослідження поведження та швидкостей потоків рідини у ливарних ковшах за обробки металу під час електромагнітного перемішування.

Методика досліджень.

Під час дослідження гідродинаміки металу в процесі його електромагнітного перемішування у ливарних ковшах використовували методи фізичного моделювання. Зокрема, рідкий метал замінювали водою, шлак – органічною оливою, а пристрій електромагнітного перемішування – спеціальною установкою, яка відтворювала харак-

терний для електромагнітного перемішування контур гідродинамічних потоків.

Очевидно, що моделююче середовище є однофазним (рідина). Отже, виконання моделі здійснюється за умовами зручності моделювання [5] та масштаб моделі у цьому разі не має значення.

Тому масштаб швидкостей (W) можна розраховувати за умови $Fr = idem$:

$$W = W' \cdot \sqrt{\frac{1}{K_\ell}}, \quad (1)$$

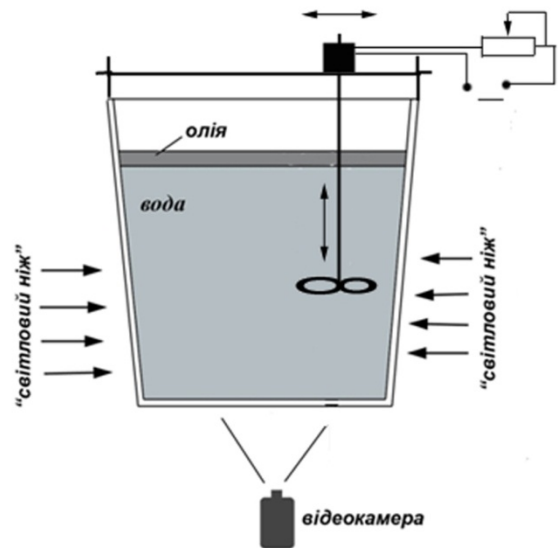
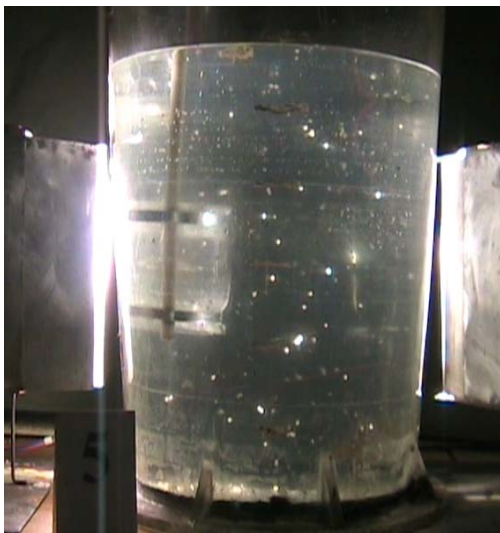
де K_ℓ – геометричний масштаб моделі; індекс «штрих» тут і далі відноситься до моделі.

Масштаб часу (τ) визначали за умови рівності критерію гомохронності як:

$$K_\tau = \frac{\tau'}{\tau} = \frac{\ell' \cdot W}{\ell \cdot W'} = \sqrt{K_\ell}, \quad (2)$$

де ℓ – геометричний розмір.

Для фізичного моделювання гідродинаміки металу в ливарних ковшах лабораторії кафедри ливарного виробництва чорних і кольорових металів Дніпродзержинського державного технічного університету використовували прозору експериментальну установку у вигляді зворотного усіченого конусу (рис. 1,а). Геометричні розміри ємності, яка моделює ківш, були вибрані наступні: верхній діаметр – 0,36 м, нижній діаметр – 0,31 м, висота – 0,45 м. Згідно положень теорії подоби така модель дозволяє одержати кількісні характеристики потоків рідини для реальних ковшів незалежно від їх ємності.



а

б

а - фото установки; б - схема установки

Рисунок 1 – Установка для моделювання гідродинаміки металу в ливарних ковшах під дією електромагнітного поля.

Вимушене переміщення рідини в моделі ковша забезпечували за рахунок використання спеціального пристрою, що встановлювали у задане місце порожнини ковша за допомогою розроблених механічних кріплень згідно завдань експерименту. Пристрій сконструйовано таким чином, що дозволяє змінювати напрямки потоків рі-

дини. Живлення електродвигуна приладу виконували за допомогою постійного струму, що регулюється (рис. 1,б).

Візуалізацію плинну рідини в моделі виконували за допомогою полістиролових кульок (трасерів) діаметром 1,0...1,5 мм, які мають нульову плавучість (метод «треків»). Під час визначення кількісних значень швидкостей потоків рідини використовували обладнання «світловий ніж», яким обтюрували осьову площину моделі ковша. Дослідження проводили в затемненому приміщенні шляхом фіксації гідродинамічної картини на цифрові фото- та відеокамери. Кількісні значення швидкостей потоків рідини визначали за допомогою розрахунків відношення довжини треків трасерів, що виміряно на фотовідбитках, до часу експозиції з урахуванням коефіцієнтів масштабування:

$$W' = \frac{S' \cdot M}{\tau'} \quad (3)$$

де S' – довжина треку трасера на фотовідбитку, м; τ' – час руху трасера, с; M – масштаб фотовідбитка ($M = D_e / D_e^o$, де D_e^o – діаметр моделі ливарного ковша на фотовідбитку, м; D_e – діаметр моделі ковша, м).

Одержанні значення швидкості потоків рідини та часу її гомогенізації перераховували за допомогою формул (1) та (2) на реальний зразок.

Результати досліджень.

Змінювання положення зони накладення однакових сил примусового перемішування дозволило встановити, що найкращі результати щодо зменшення часу гомогенізації спостерігаються під час розташуванні її на відстані 0,4...0,6 радіуса ковша. Тому подальші дослідження виконували відповідно до таких умов.

У всіх досліджених випадках під час перемішування рідкої ванни виникала значна циркуляційна зона, спрямована в об'ємі ковша уздовж вектора швидкості потоків рідини. Ця зона залежно від інтенсивності перемішування та розташування зони примусового накладення електромагнітних полів, розділялася на декілька (4...6) вихорів, розмір яких залежить від швидкості рідини, а, отже, і від дисипації енергії вихорів.

Переміщення зони накладення сил примусового перемішування у вертикальному напрямі показало наступне. Під час розташування місця впливу електромагнітної дії на висоті 0,25 від днища ковша на протилежній стороні агрегату утворюється незначна застійна зона об'ємом 1/8 від загального об'єму металу. Проте зазначена зона зникає по мірі збільшення швидкості рідини більше, ніж у два рази.

До того ж ефекту призводить переміщення місця прикладення зовнішніх сил на 0,5 висоти наливання металу. У цьому разі створюється більш стійкий контур обертання металу з відносно великими швидкостями рідини. Причиною є зменшення дисипації енергії вихорів за рахунок деякого віддалення потоків рідини від стінок агрегату.

Підняття зони накладення зусиль на висоту 0,75 глибини ванни призведе до оголення дзеркала металу, його надмірного коливання та утворення декількох застійних зон об'ємом до 1/3 від загального об'єму металу в ковші у районі днища та дзеркала металу в частині агрегату, яка є симетричною до зоні накладення примусового перемішування.

Як результат обробки фото- та відеоматеріалів встановлено, що швидкості потоків металу за різної потужності перемішування знаходяться у межах 0,018...0,24 м/с (місце прикладання електромагнітної дії - 0,25 висоти ковша), 0,029...0,256 м/с місце

прикладання електромагнітної дії - 0,50 висоти ковша) та 0,026...0,218 м/с (місце прикладання електромагнітної дії - 0,75 висоти ковша).

Отже, найбільш раціональним є прикладення сил зовнішньої дії на відстані 0,4...0,6 радіуса ковша та половини висоти наливання до нього металу. Загальну схему напрямів потоків металу в ковші у цьому разі наведено на рис. 2.

Очевидно, що введення додаткових реагентів до об'єму рідкого металу слід виконувати у місцях з найбільшими абсолютними швидкостями потоків металу, які обов'язково спрямовано донизу. Безперечно, таким критерієм відповідає область, розташована симетрично зоні накладення електромагнітних сил (рис. 2,б, зліва від осі ковша). На рис. 3 наведено відповідну графічну залежність розподілу абсолютних значень швидкостей потоків рідкого металу (W , м/с) у ливарному ковші (тут і далі r - відстань від осі ковша, H - відстань від днища ковша, відносні одиниці).

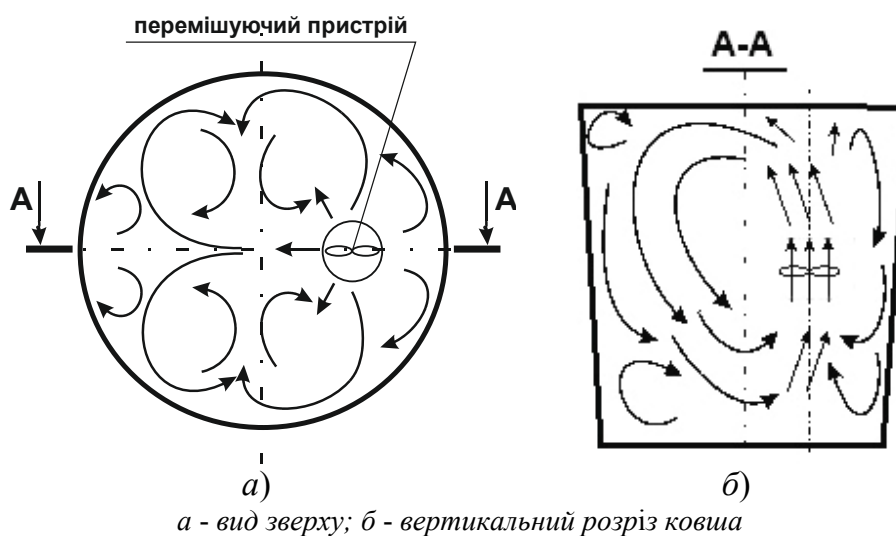


Рисунок 2 – Загальна схема потоків металу в ковші:

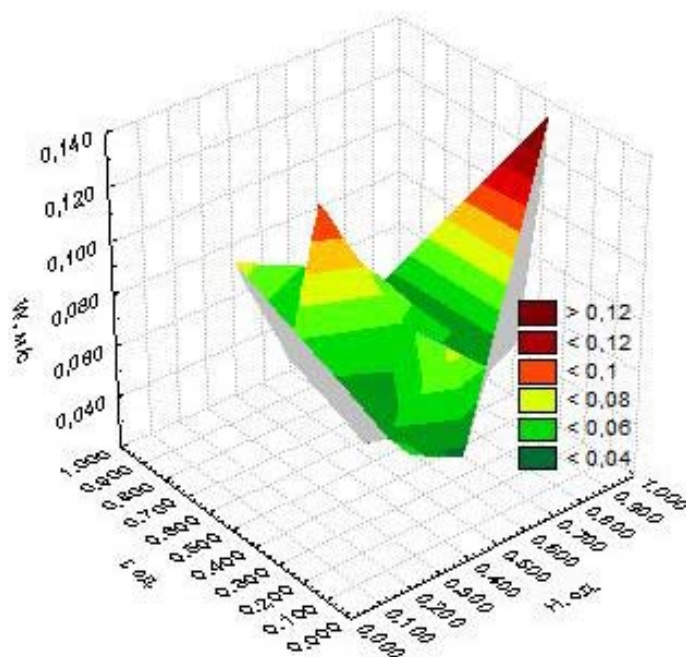


Рисунок 3 – Розподіл швидкостей потоків металу в половині ковша

Встановлено, що, зважаючи на турбулентний рух потоків, поведінка рідини не носить стабільного характеру: спостерігається виникнення значної кількості відривних течій. В процесі перемішування такі течії можуть об'єднуватися, розділятися залежно від швидкості руху рідини та місця їх знаходження в об'ємі металевої ванни. Більша дисипація енергії є характерною для вихорів, що розташовано на границі із застійними зонами. Аналіз результатів експериментів даного випадку дозволив встановити, що в порожнині ковша знаходиться 4...6 досить стабільних замкнутих гідродинамічних потоків, швидкість обертання яких збільшується з підвищенням інтенсивності електромагнітного перемішування. Кількість вихорів зростає з підвищенням інтенсивності перемішування. Швидкість переміщення потоків рідини підбиралася таким чином, щоб забезпечити відсутність виникнення оголеного дзеркала металу над зоною примусового перемішування.

За результатами статистичних розрахунків (довірчий інтервал вірогідності для всіх розрахунків 95 %) знайдено регресійну залежність швидкостей потоків металу W у площині, що проходить через вісь ковша у області, яка є вільною від накладення сил електромагнітного перемішування, від положення зони накладення впливу за висотою агрегату місця розташування контрольних точок в ковші. Тут і далі параметри рівняння розташовано за порядком убудування вагових критеріїв:

$$W = 0,102 - 0,520H^2 + 0,378H^3 + 0,169H + 0,110P^2 - 0,002r; \quad (4)$$

$$R = 0,46; \quad R^2 = 0,21; \quad F(6,183) = 8,22; \quad \Delta = 0,025,$$

де P – частка від рівня металевої ванни, од.; R – коефіцієнт кількісної кореляції; R^2 – коефіцієнт детермінації; F – критерій Фішера; Δ – похибка визначення.

Вочевидь, на функцію відгуку найбільше впливає висота розташування контрольних точок. Найменша швидкість спостерігається на половині висоти ковша за практичної відсутності залежності від радіуса ковша. Відзначимо, що, в середньому, абсолютна швидкість потоків біля днища агрегату декілька вище, ніж поблизу поверхні металу. Така ж тенденція спостерігається і щодо положення в агрегаті зони накладення електромагнітного впливу.

Загальновідомо, що швидкість засвоєння додаткових реагентів зменшується із зростанням інтенсивності потоків металу й, отже, вельми залежить від розташування зони накладення сил електромагнітного перемішування та місця введення домішок.

Вирішення задачі пошуку глобального екстремуму багато екстремальної функції (4) дозволило визначити, що максимальна швидкість досягається на осі агрегату поблизу меніска металу під час розташування зони впливу біля футерівки днища ковша, що не є прийнятним з точки зору технологічності та може призвести до швидкого зношення вогнетривів.

Більш прийнятно, на наш погляд, розташування такої зони приблизно на 0,5 висоти наливання металу в ковші. Аналіз одержаної відповідної регресійної залежності, що має вигляд

$$W = -0,241 + 1,886I - 0,316r - 3,251H^2 + 0,601r^2 + 1,772H^3 - 0,338r^3; \quad (5)$$

$$R = 0,65; \quad R^2 = 0,42; \quad F(6,140) = 1,683; \quad \Delta = 0,022,$$

показав, що за таким розташуванням зони впливу швидкість потоків металу є вищою біля його поверхні, ніж біля днища, але є дещо меншою у середині. Але, як і слід було

очікувати, швидкість потоків металу на половині радіусу була більша, ніж на осі та біля стінок ковша.

Вирішення задачі оптимізації багато екстремальної функції (5) [7,8] дозволило визначити, що найбільше значення (0,16 м/с) абсолютна швидкість потоків металу має на осі ковша біля його поверхні. Також визначено, що реагенти недоцільно вводити на глибині ванни 0,25 висоти металу та на відстані 0,37 від осі ковша.

Висновки.

Виконані дослідження дозволили визначити кількісні характеристики поведінки металу в об'ємі ливарного ковша при дії на нього електромагнітного поля, розташування активних і застійних зон, їх геометричні параметри залежно від інтенсивності перемішування та розташування місця прикладання електромагнітної дії, бажані та небажані місця введення додаткових реагентів.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Внепечное вакуумирование стали [Текст] : монография / А. Н. Морозов, М. М. Стрелкаловский, Г. И. Чернов, Я. Е. Кацнельсон. – М. : Металлургия, 1975. – 288 с. – Библиогр. : с. 279-285.
2. Моделирование тепло- и массообменных процессов при продувке стали в разливочных ковшах малой вместимости [Текст] / С. П. Еронько, И. Н. Салмаш, Е. В. Штепан, А. Ю. Цупрун // Металл и литье Украины. – 2005. – № 3-4. – С. 111-112.
3. Модельные исследования гидродинамики процессов перемешивания стали в ковшах малой вместимости [Текст] / С. П. Еронько, А. Н. Смирнов, А. Ю. Цупрун, И. Н. Салмаш // Металл и литье Украины. – 2006. – № 3-4. – С. 31-35.
4. Некоторые аспекты организации производства в условиях современного микро-завода [Текст] / А. Н. Смирнов, А. Ю. Цупрун, Е. В. Штепан, Е. В. Новикова // Металл и литье Украины. – 2009. – № 1-2. – С. 16-20.
5. Исследование гидродинамических процессов в ковшах малой вместимости при различных способах перемешивания стали [Текст] / А. Ю. Цупрун, Е. В. Штепан, О. В. Антыкуз, Е. В. Новикова // Металургія : наукові праці Донецького національного технічного університету. – 2008. – № 10 (141). – С. 20-24.
6. Гресс, О. В. Дослідження, моделювання та оптимізація ливарних систем [Текст] : навч. посібник / О. В. Гресс, А. П. Огурцов, Ф. В. Недопьокін. – Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2012. – 287 с. – Бібліогр. : с. 285-286. – ISBN978-966-175-066-0.
7. Исаев, С. Популярно о генетических алгоритмах [Электронный ресурс] : Режим доступа : \www/ URL: <http://algotlist.manual.ru/ai/ga/ga1.php>. – Загл. с экрана.
8. Применение генетических и эволюционных алгоритмов оптимизации. Нейронные сети и анализ данных. Материалы из сайта В. Царегородцева NeuroPro [Электронный ресурс] : Режим доступа : \www/ URL: <http://www.neuropro.ru/memo314.shtml>. – Загл. с экрана.

Стаття надійшла до редакції 20.12.2013 р.
Рецензент, проф. М.Ф. Колесник

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