

А.В. Гресс, зав. кафедрой, д.т.н., профессор
С.А. Стороженко, ассистент

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ВАННЫ ЛИТЕЙНОГО КОВША

Днепродзержинский государственный технический университет

Наведено результати фізичного моделювання гідродинаміки металу в ливарному ковші під час його продування інертним газом через донну фурму. Встановлені аналітичні залежності швидкості потоків металу від місця розташування контрольних точок в об'ємі ковша та інтенсивності продування газом.

Приведены результаты физического моделирования гидродинамики металла в литейном ковше в процессе его продувки инертным газом через донную фурму. Установлены аналитические зависимости скорости потоков металла от места расположения контрольных точек в объеме ковша и интенсивности продувки газом.

Введение. На современном этапе развития литейного производства Украины актуальным является вопрос повышения конкурентоспособности литой продукции. Выходом из создавшегося положения является усовершенствование технологий, направленных на повышение качества отечественного литья, в частности использование современных методов выпечной обработки литейных расплавов. Это предопределяет необходимость получения достоверной информации о гидродинамике металла в ковшах. Сейчас накоплен большой научный материал, посвященный изучению гидродинамики металла в ковшах большой вместимости, но научных работ, содержащих результаты исследований характера поведения металла в ковшах малой вместимости (далее – литейных ковшах) мало. Актуальность подобных исследований определяется спецификой литейных ковшей, а именно относительно высокой скоростью охлаждения в них металла и небольшой скоростью естественных конвективных потоков расплава. Увеличения интенсивности конвективных потоков достигают, чаще всего, посредством продувки металла аргоном (азотом) в ковше через специальные фурмы, установленные в днище ковша.

Постановка задачи. Задачей настоящего исследования является изучение особенностей и количественных характеристик движения гидродинамических потоков расплава при продувке газом металла в литейных ковшах.

Методика исследований. При исследовании гидродинамики стали в процессе ее продувки аргоном в литейных ковшах нами был использован метод физического моделирования (жидкий металл заменяли водой, шлак – растительным маслом). Для продувки моделирующей среды применяли воздух, подаваемый через пористую пробку, установленную в днище ковша, с возможностью ее перемещения в зависимости от задач эксперимента.

Поскольку моделируемая среда является гетерофазной (жидкость, газ), выполнение модели осуществляли в соответствии с теорией подобия [1]. Согласно положений теории подобия, масштаб таких моделей можно определить с помощью чисел Вебера

($We = \frac{\sigma_{жс}}{\rho_{жс} \cdot l \cdot W^2}$, здесь и далее σ – поверхностное натяжение, ρ – плотность, l – характерный размер, W – скорость, индекс «жс» относится к жидкости) и Лапласа ($La = \frac{\sigma_{жс}}{\rho_{жс} \cdot l^2 \cdot g}$,

где – ускорение свободного падения). Поскольку значения скоростей в натурном образце не известны, для определения масштаба модели K_l использовали число Лапласа из условия $La = idem$:

$$K_l = \sqrt{\frac{K_{\sigma_{жс}}}{K_{\rho_{жс}} \cdot K_g}}, \quad (1)$$

где $K_{\sigma_{жс}} = \frac{\sigma'_{жс}}{\sigma_{жс}}$, $K_{\rho_{жс}} = \frac{\rho'_{жс}}{\rho_{жс}}$, $K_g = 1$ – масштабы, соответственно, поверхностного натяжения, плотности и ускорения свободного падения (здесь и далее «штрих» относится к модели).

Поверхностное натяжение воды и стали находятся в диапазоне, соответственно, 0,073...0,075 Н/м и 1,20...1,865 Н/м, а их плотность - в пределах соответственно 998,2 кг/м³ и 7000...7500 кг/м³. После подстановки численных значений σ и ρ в уравнение (1) было получено значение масштаба моделирования K_l в пределах 0,53...0,69.

Масштаб времени определяли из условия постоянства критерия гомохронности:

$$K_\tau = \frac{\tau'}{\tau} = \frac{l' \cdot W}{l \cdot W'} = \sqrt{K_l}. \quad (2)$$

Расход дутья на модели рассчитывали согласно числу подобия:

$$v' = v \cdot \sqrt{K_l^5}, \quad (3)$$

где v – объемный расход газа.

Для физического моделирования гидродинамики металла в литейных ковшах в лаборатории кафедры литейного производства черных и цветных металлов ДГТУ использовали прозрачную экспериментальную установку в масштабе 0,6 реального ковша, позволяющую получать количественные характеристики движения потоков металла в реальном образце. Для пересчета количественных характеристик скоростей перемещения моделирующей гетерофазной среды на реальные использовали число Архимеда ($Ar = \frac{W^2 \cdot \rho_g}{g \cdot l \cdot \rho_{жс}}$, индекс «g» относится к газу).

Тогда пересчетная формула для скорости будет иметь вид:

$$W = W' \cdot \sqrt{\frac{K_{\rho_g}}{K_l \cdot K_{\rho_{жс}}}}. \quad (4)$$

Визуализацию течения жидкости в модели производили с помощью полистироловых шариков диаметром 1,0...1,5 мм, обладающих нулевой плавучестью. В процессе холодного моделирования исследовали гидродинамику металлической ванны и поведение шлака при подаче в агрегат газа с удельной интенсивностью 1,2...3,2 л/(мин·т). При определении количественных значений скорости потоков жидкости использовали устройство «световой нож». Исследования проводили в затемненном помещении посредством фиксации гидродинамической картины на цифровые фото- и видеокамеры. Количественные значения скоростей потоков жидкости определяли посредством расчета отношения измеренных на фотоотпечатках длин треков трассеров ко времени экспозиции с учетом коэффициентов масштаба. Время гомогенизации жидкой ванны определяли по времени изменения электропроводности воды, в которую вводили электролит.

Для обеспечения возможности определения локальных мест износа футеровки днища промышленного ковша дно модели покрывали равномерным тонким слоем сере-

бристого графита. В областях, подверженных интенсивному воздействию потоков жидкости, графит размывался, тогда как в застойных зонах имело место его накопление.

Схема установки представлена на рис. 1.

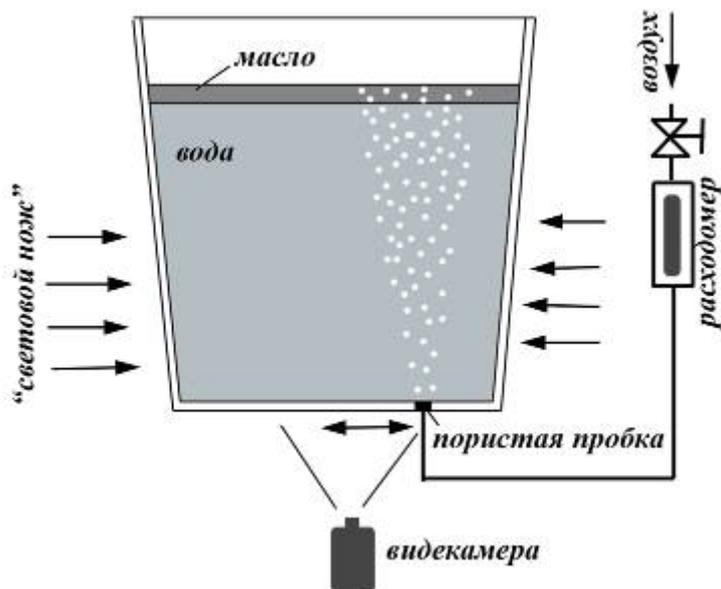


Рисунок 1 – Схема установки для моделирования гидродинамики металла в литейных ковшах

Результаты исследований. Найдено, что в объеме ковша при его продувке находится 6...8 достаточно стабильных замкнутых гидродинамических потоков, интенсивность и число которых определяются, соответственно, расходом газа и расположением продувочного узла. В результате серии экспериментов подтверждено, что, с точки зрения минимализации времени гомогенизации ванны металла, наиболее рациональным местом расположения продувочного узла, независимо от интенсивности продувки, является нахождение на участке, соответствующем 0,4...0,6 радиуса ковша от его оси [2]. Поэтому дальнейшие исследования проводили при расположении донной фурмы на расстоянии 0,5 радиуса ковша.

Установлено, что поведение металла в объеме литейного ковша не носит стабильного характера ввиду возникновения большого количества отрывных течений, приводящих к появлению турбулентных пульсаций. В процессе продувки вихри могут объединяться и разделяться в зависимости от расхода газа. При росте расхода газа флуктуации потоков увеличиваются, что, согласно результатам наших исследований, вызывает ускорение гомогенизации расплава и уменьшение объема застойных зон. Изменение положения вихрей в пространстве ковша приводит к колебаниям конической поверхности газожидкостного факела и, соответственно, к появлению пульсаций зоны выхода газа (так называемого «глаза») из жидкого металла. Так, периодичность пульсаций «глаза» при интенсивности 1,2 л/(т·мин) в пересчете на образец составила порядка 2 с с постепенным уменьшением до 1 с при расходе газа 3,2 л/(т·мин). Влияния толщины шлакового покрова на продолжительность периодичности пульсаций отмечено не было.

Обнаружено, что с ростом расхода продувочного газа наблюдается устойчивая тенденция к отклонению (до 10°) оси газожидкостной струи от вертикали в сторону оси ковша, что объясняется влиянием гидродинамических потоков, «отжимающих» струю от стенки ковша (рис. 2).

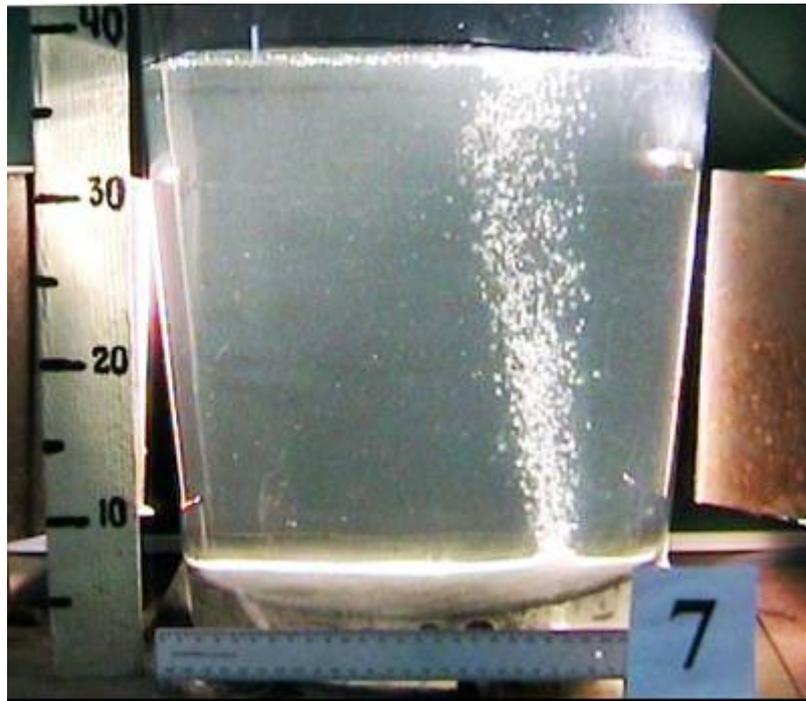
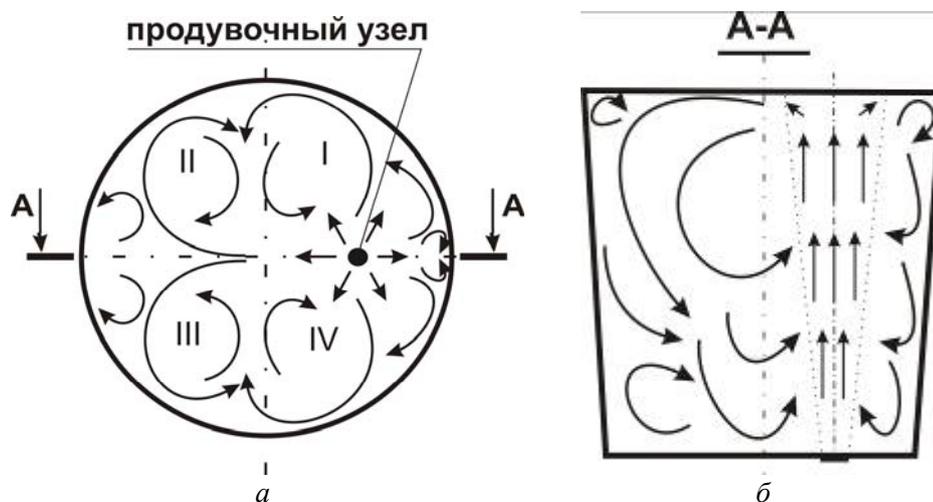


Рисунок 2 – Расположение газожидкостного потока в объеме ковша

Следует отметить, что в районе выхода газа из металла наблюдается вспенивание шлака. Концентрация газа в шлаке снижается по мере удаления от «глаза». Немаловажно, что накопление газа происходит в верхней и нижней частях шлакового покрова, что предполагает активную дегазацию металла не только в зоне действия струи, но и на границе «шлак-металл».

Визуальные наблюдения показали, что поверхность шлака при исследованных режимах продувки практически не имеет волн, в то время как граница раздела «шлак-металл» находится в постоянном движении. В результате продувки возникают concentric waves, расходящиеся радиально от центра «глаза» к стенкам ковша. Амплитуда волн увеличивается по мере роста интенсивности продувки, достигая значений, при которых происходит отрыв капель шлака и их «запутывание» в объеме металла.



a - вид сверху; *б* - вертикальное сечение ковша

Рисунок 3 – Система «газ-шлак-металл»:

Вместе с тем, для решения технологических задач можно принять, что расположение вихрей в полости ковша носит практически симметричный характер относительно вертикальной плоскости, проходящей через оси продувочного узла и ковша. Установлено, что в объеме металла находится 6...8 относительно стабильных замкнутых гидродинамических потоков (рис. 3). С увеличением расхода газа интенсивность потоков увеличивается при практически постоянном их количестве.

Скорость передвижения металла в газожидкостной струе при исследованных «допробойных» режимах продувки ванны не зависит от интенсивности подачи дутья. С ростом интенсивности подачи дутья возрастает количество жидкости, присоединенной к струе, что приводит к увеличению интенсивности перемешивания. В зоне выхода газа в атмосферу потоки металла расходятся радиально, затухая по мере приближения к стенкам ковша. У стенок ковша металл перенаправляется к днищу либо практически вертикально, либо под некоторым углом атаки. На стороне, противоположной месту нахождения продувочного узла, образуется два больших симметричных относительно вертикальной плоскости, проходящей через оси ковша и продувочной пробки, замкнутых гидродинамических вихря. Нижняя граница вихрей достигает 2/3 высоты металла в ковше. Ниже вихрей в направлении от продувочного узла формируется застойная зона, геометрические параметры которой определяются интенсивностью продувки. Небольшие застойные зоны образуются у днища ковша в I и IV квадрантах.

Найдено, что скорости потоков металла в объеме исследованного литейного ковша при интенсивности продувки 1,2 л/(мин·т) находятся в диапазоне 0,023...0,097 м/с, при 2,2 л/(мин·т) – в диапазоне 0,030...0,121 м/с, при 2,2 л/(мин·т)) – в пределах 0,055...0,189 м/с при средней скорости подъема пузырей газа в газожидкостной струе около 0,7 м/с.

На основании статистического анализа (доверительная вероятность всех статистических расчетов принята равной 95 %) результатов обработки фото- и видеоматериалов найдены регрессионные зависимости скорости (W , м/с) потоков жидкости в плоскости, проходящей через оси ковша и фурмы, от интенсивности продувки (i , л/(т·мин)) и местоположения контрольных точек в ковше (R – расстояние от оси ковша (со знаком «+» – в левую сторону, со знаком «-» – в правую, см. рис. 3,б), м; Z – расстояние от днища ковша, м). Параметры уравнения расположены в порядке убывания t -критерия, R^2 – коэффициент детерминации, Δ – ошибка определения:

$$W = 4,59 - 4,42 \exp(R) + 114,57R^3 + 0,0052 \exp(i) + 0,347Z, R^2 = 0,67, \Delta = 0,18. \quad (5)$$

В дальнейшем полученные данные послужили для доказательства адекватности разработанной нами сопряженной математической модели тепло- и массообменных процессов в литейных ковшах.

Выводы. При помощи метода физического моделирования исследованы особенности гидродинамики металла в литейном ковше при различной интенсивности продувки инертным газом через донное фурменное устройство, позволяющие наметить пути интенсификации обработки литейных расплавов. Аналитические зависимости скоростей потоков металла от координат контрольных точек и интенсивности продувки позволяют установить адекватность соответствующих сопряженных математических моделей тепло- и массообмена в объеме литейных ковшей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Огурцов А. П. Непрерывное литье стали / А. П. Огурцов, А. В. Гресс. – Днепропетровск : Системные технологии, 2002. – 675 с.

2. Некоторые вопросы оценки интенсивности перемешивания при продувке металла в ковше инертным газом. Сообщение 2 / *А. Н. Смирнов*, Е. В. Ошовская, И. Н. Салмаш [и др.] // Процессы литья. – 2008. – № 5. – С. 30–35.

Стаття надійшла до редакції 08.04.2011 р.
Рецензент, проф. С.Є. Самохвалов