

УДК 669.18

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

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ЛИТЕЙНОМ КОВШЕ, ОБОРУДОВАННОМ ФИЛЬТРУЮЩЕЙ ПЕРЕГОРОДКОЙ

Днепродзержинский государственный технический университет

Наведено результати фізичного моделювання гідродинаміки металу у ливарному ковші, що обладнано фільтруючою перегородкою, під час його продування інертним газом через донну фурму. Встановлено кількісні залежності й напрями швидкостей потоків металу залежно від місця розташування та конструктивних особливостей фільтруючої перегородки в об'ємі ковша за заданої інтенсивності продування газом.

Ключові слова: фізичне моделювання, гідродинаміка металу, фільтрувальна перегородка, ковш, донна фурма, газ

Приведены результаты физического моделирования гидродинамики металла в литейном ковше, оборудованном фильтрующей перегородкой, в процессе его продувки инертным газом через донную фурму. Установлены количественные зависимости и направления скоростей потоков металла в зависимости от места расположения и конструктивных особенностей фильтрующей перегородки в объеме ковша при заданной интенсивности продувки газом.

Ключевые слова: физическое моделирование, гидродинамика металла, фильтрующая перегородка, ковш, донная фурма, газ

The results of physical modeling for hydrodynamics of metal in the foundry ladle equipped by filter partition during its blowing by noble gas through the bottom lance are given. Quantity relations and directions of the velocities for metal flows are dependent from the place and constructive specialties of filter partition in the foundry ladle in given intensity of gas blowing are determined.

Key words: physical modeling, hydrodynamics of metal, filter partition, ladle, ground tiyere, gas

Введение. Тенденции развития современной металлургии определяют особое внимание к решению вопроса улучшения качества металлопродукции. В определяющей мере данный показатель зависит от чистоты металла по неметаллическим включениям, количество, состав и размеры которых в значительной степени определяются способами и режимами его обработки. Одним из наиболее современных методов улучшения качества металла является ковшовая металлургия, многие положения которой для больших агрегатов весьма широко освещены в печати.

Следует отметить, что среди известных способов удаления неметаллических включений в металлургических агрегатах незаслуженно мало внимания уделяется использованию такого современного технологического решения, как установка в их объеме различного рода фильтрующих перегородок. Так, например, их применение в промежуточных ковшах МНЛЗ достаточно убедительно показало эффективность решения задач рафинирования металла [1-3]. В этих же работах показано, что конструктивный характер исполнения таких устройств и их местоположение в промышленных ковшах предопределяет успех операции очистки металла. Очевидно, соответствующую

ший вывод в полной мере можно отнести и к возможному использованию фильтрующих перегородок в разливочных ковшах. Такой подход к решению проблемы повышения рафинирующей способности ковшовой обработки стали является чрезвычайно интересным и, на наш взгляд, перспективным.

Эффективность применения фильтрующих перегородок в разливочных ковшах предполагает увеличение интенсивности конвективных потоков жидкости, чего можно достичь посредством использования различного рода перемешивателей, в частности нейтрального газа, подаваемого, например, через донные продувочные устройства. В настоящее время неизвестно каким образом влияет расположение перегородки в ковше и интенсивность подачи барботирующего газа на гидродинамику жидкой ванны.

Постановка задачи. Целью данных исследований является определение рационального расположения фильтрующей перегородки в объеме разливочного ковша, а также интенсивности подаваемого снизу барботирующего газа и их влияния на гидродинамические параметры жидкой ванны, способствующие повышению рафинирующей способности внепечной обработки расплавов.

Методика исследований. Решение поставленной задачи производили использованием метода приближенного физического моделирования, основанного на положениях теории подобия. Схема и фото установки моделирования приведены на рис. 1.

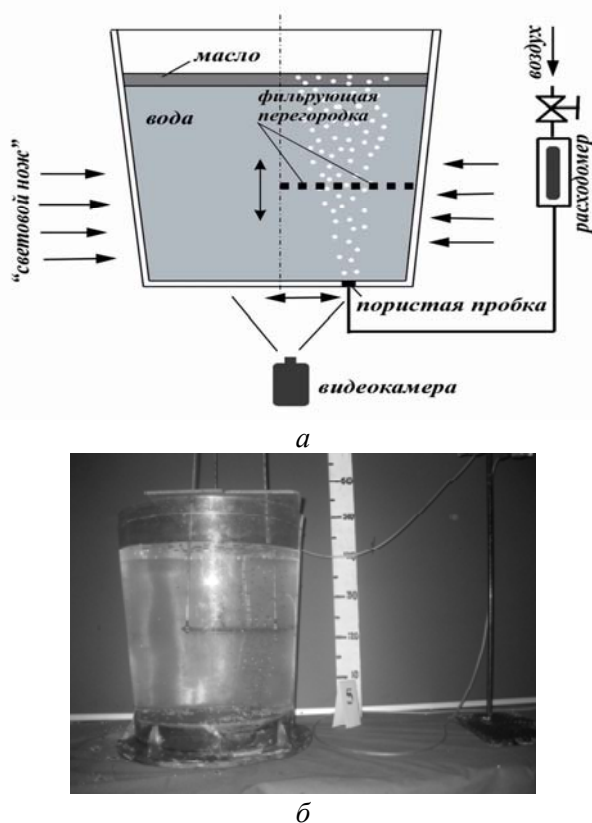


Рисунок 1 – Схема (а) и фотография (б) установки для моделирования гидродинамики металла в разливочных ковшах

Исследования гидродинамики жидкости на физической модели разливочного ковша проводили при подаче в металл нейтрального газа посредством донных продувочных фурм с расходом в диапазоне 1,2...3,2 л/(мин·т) жидкой стали. Конструктивно фурмы исполняли с возможностью их свободного перемещения по днищу модели ко-

вша. Модель фильтрующей перегородки выполняли из органического стекла с отверстиями различного размера и конфигурации.

В качестве моделирующей жидкости использовали воду, аргон имитировали воздухом. Определяющими критериями при моделировании служили числа La , Ar , Ho . Число Re находилось в области автомодельности. Основные параметры моделирования приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры моделирования

Наименование параметра	Образец	Модель
	сталь / шлак / газ	вода / масло / газ
Плотность жидкости, кг/м ³	7000 / 3000 / 1,784	1000 / 920...927 / 1,29
Поверхностное натяжение, Н/м	1,20...1,865 / 0,2...0,6	0,073...0,075 / 0,033
Динамическая вязкость, Па·с	0,005...0,0085 / 0,02...0,04	0,00089 / 0,0037
Линейный масштаб	1,0	0,6
Масштаб расхода газа	0,34	
Масштаб скоростей	0,762	

В качестве имитатора покровного шлака использовали растительное масло. Визуализацию потоков жидкости осуществляли при помощи полистироловых шариков (трассеров) диаметром 0,3...1,5 мм, имеющих нулевую плавучесть, а также посредством ввода в «глаз» пятна на поверхность воды красящей жидкости. Направление и скорости потоков определяли визуальным наблюдением и фиксацией гидродинамической картины на цифровую видеокамеру.

Исследования выполняли в защищенном от света помещении. Область наблюдения в пространстве модели ковша получали обтюрируемым пучком света. Количественные значения скоростей потоков жидкости определяли посредством расчета отношения измеренных на фотоотпечатках длин треков трассеров ко времени экспозиции с учетом коэффициентов масштабирования. Время гомогенизации жидкой ванны рассчитывали по длительности изменения электропроводности воды, в которую вводили электролит. Для обеспечения возможности определения локальных мест износа футеровки днища промышленного ковша дно модели покрывали равномерным тонким слоем серебристого графита. В областях, подверженных интенсивному воздействию потоков жидкости, графит размывался, тогда, как в застойных зонах имело место его накопление.

Результаты исследований. В процессе моделирования изучали общий характер распределения потоков жидкости и ее скорости, характер поведения жидкости и газа в однотонном разливочном ковше, что, в соответствии с положениями теории подобия, позволяет определять количественные характеристики гетерофазных потоков жидкости [4].

Предварительно проведенная серия экспериментов позволила установить, что фильтрующая перегородка должна иметь форму половины горизонтального сечения ковша и устанавливаться симметрично над донным продувочным устройством.

Во всех исследованных случаях время гомогенизации уменьшалось, как и следовало ожидать, по мере роста интенсивности подачи газа при наилучшем расположении донной фурмы на расстоянии около 0,5 радиуса ковша от его оси. Это предопределило проведение дальнейших исследований при указанном положении донной фурмы.

Определено, что характер поведения газожидкостных потоков зависит от высоты расположения перегородки над донной фурмой и размеров, а также конфигурации

отверстий в перегородке. При этом распределение гидродинамических потоков в поперечном сечении носит не столь выраженный характер, как в вертикальном, и предопределяется, в первую очередь, интенсивностью подачи газа через донную фурму. При всех исследованных режимах донной продувки и высотах расположения перегородки в объеме ковша наблюдается 6...8 достаточно стабильных замкнутых гидродинамических потоков. Разница скоростей потоков жидкости в I, IV и II, III квадрантах (рис. 2) составляла, в среднем, 9...20 %.

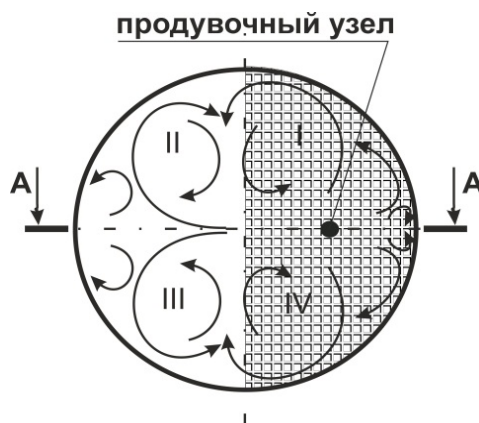
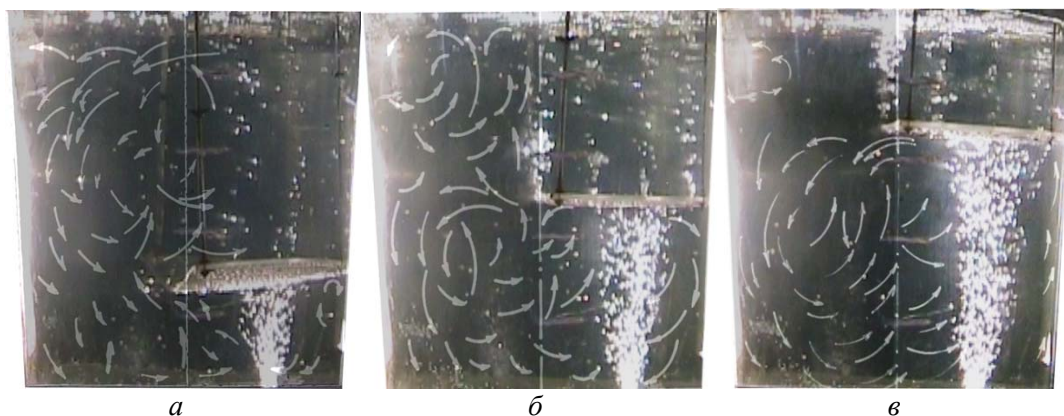


Рисунок 2 – Распределение газожидкостных потоков в поперечном разрезе надперегородочного объема ковша

Общей тенденцией во всех исследованных случаях стало появление дополнительных потоков металла, огибающих перегородку в районе вертикального осевого сечения ковша (рис. 3). Немаловажной положительной чертой было практическое отсутствие оголенной от шлака поверхности металла над донной фурмой (так называемого «глаза») и «пробойных» режимов в исследованном диапазоне расходов газа, что объясняется «рассеивающим» эффектом фильтрующей перегородки (рис. 4).

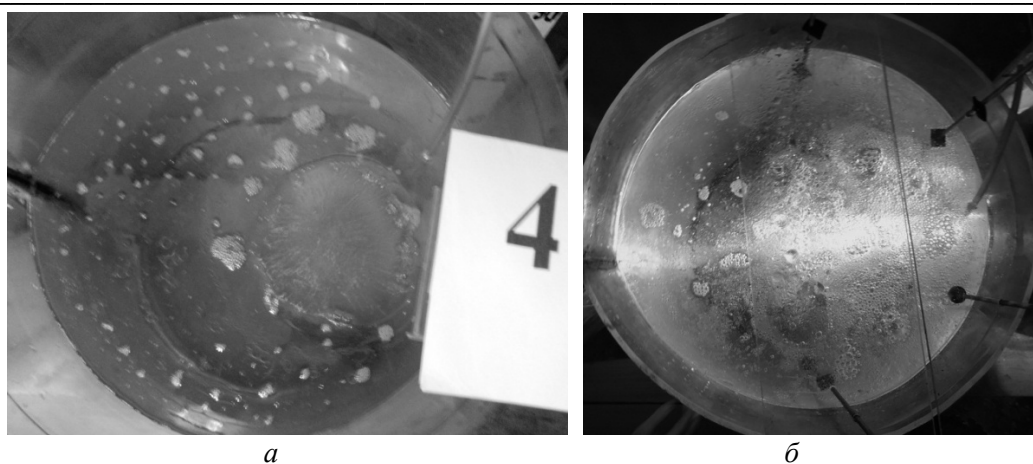


а - высота расположения фильтрующей перегородки 0,25 высоты налива металла; *б* - 0,5; *в* - 0,75

Рисунок 3 – Макрокартина газожидкостных потоков в сечении A-A (см. рис. 2) ковша (время экспозиции - 1 с)

В целом, наличие перегородки привело к более равномерному течению жидкости во всех зонах ковша при одновременном уменьшении количества и объема застойных зон по сравнению с донной продувкой ковша обычной конструкции.

При изучении вопроса рационального расположения перегородки над днищем ковша было определено, что по высоте ковш можно условно разделить на четыре области: под перегородкой, выше нее, и две области в свободном от перегородки пространстве. В целом, направление потоков металла в этих областях сохраняется, но, по мере удаления перегородки от днища ковша, интенсивность потоков жидкости снижается при одновременном росте объемов циркуляционных потоков.



а - без фильтрующей перегородки; б - с фильтрующей перегородкой

Рисунок 4 – Поведение шлака в ковше с донной продувкой газом интенсивностью 3,2 л/(т·мин) и расположением фильтрующей перегородки на 0,5 высоты налива ковша (б)

В табл. 2 приведены абсолютные значения скоростей потоков металла в вертикальной плоскости исследованного литейного ковша, проходящей через ось ковша и ось фурмы, при подаче в агрегат газа с удельной интенсивностью 1,2...3,2 л/(мин·т) и различным положением фильтрующей перегородки.

Таблица 2 – Абсолютные значения скоростей потоков металла

Положение фильтрующей перегородки (доля от номинальной высоты налива ковша)	Интенсивность продувки, л/(мин·т)	Скорости потоков металла, м/с
0,25	1,2	0,019...0,081
	2,2	0,025...0,096
	3,2	0,041...0,154
0,5	1,2	0,025...0,093
	2,2	0,031...0,112
	3,2	0,053...0,173
0,75	1,2	0,022...0,087
	2,2	0,027...1,104
	3,2	0,045...0,151

Подтверждено, что по мере увеличения удельной интенсивности продувки время перемешивания уменьшается с одновременным ростом скоростей потоков металла. Увеличение относительной площади отверстий в перегородке также положительно сказывается на уменьшении времени гомогенизации жидкости.

Общепризнано, что условиями, обеспечивающими направленное движение неметаллических включений, их слияние, укрупнение и подачу к шлаковому покрову, является создание принудительной конвекции во всем объеме металла, направленной к зеркалу металла ковша и образование вихреобразной гидродинамической структуры в расплаве металла. Вихревая структура объемов металла позволяет максимально быстро укрупнять неметаллические включения и не только создавать условия для выноса в шлаковую зону, но и способствовать задержанию их фильтрующей перегородкой. Желательно задействовать вихреобразованием как можно больший объем металла, чтобы обеспечить контакт со шлаковым покровом и уменьшить вероятность образования застойных зон. Рассредоточение выделения газовой фазы из объема металла, увеличение длительности пребывания пузырьков в жидкости, уменьшение площади оголенного зеркала металла однозначно положительно повлияют на качество стали, в частности, на удаление газовых и неметаллических включений.

Таким образом, для более полного и интенсивного процесса рафинирования металла от неметаллических включений следует увеличить путь движения металла до шлакового покрова. Определено, что для этого в фильтрующей перегородке, относительная площадь сечения отверстий в которой составляет около 40 %, должны быть выполнены отверстия с углами наклона к оси ковша от 0 до 45°, которые определяются местонахождением относительно вертикальной плоскости симметрии ковша и расстоянием от его днища.

Экспериментами найдено, что установка фильтрующей перегородки по варианту *a* (рис. 3) является самым неблагоприятным с точки зрения разрушения футеровки и времени контакта металла с адсорбирующей поверхностью перегородки. Здесь при истечении газожидкостного факела образуются достаточно сильные вихри, которые отжимаются перегородкой к стенке ковша, ближайшей к продувочному узлу, тем самым создавая условия для размывания футеровки. Исходя же из близости расположения перегородки ко дну ковша, не в полной мере реализуется принцип ортокинетической коагуляции и, соответственно, адсорбирующая функция перегородки.

При установке перегородки по варианту *b* (рис. 3) положительным фактором является то, что включения, суспензированные в стали, проходят больший путь, количество крупных включений увеличивается и значительная их часть задерживается на поверхности перегородки. Однако перегородка гасит восходящие потоки, снижая интенсивность перемешивания, и у дна ковша со стороны противоположной продувочному узлу возникает объемная застойная зона.

Наилучшим оказалось размещение фильтрующей перегородки приблизительно на расстоянии 0,5 высоты налива металла (рис. 3,б). В этом случае возникает достаточная объемная реакционная зона с развитой вихревой гидродинамической структурой, что обеспечивает интенсификацию рафинирования стали от неметаллических включений.

Выводы. При помощи метода физического моделирования исследованы особенности гидродинамики металла в литейном ковше, оборудованном фильтрующей перегородкой, при заданной интенсивности продувки инертным газом через донное фурменное устройство. Найдены рациональное место расположения фильтрующей перегородки в объеме разливочного ковша и относительная площадь отверстий в ней, позволяющие ускорить удаление из расплава неметаллических включений и газов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моделирование современных процессов внепечной обработки и непрерывной разливки стали [Текст] : монография // *О. Б. Исаев, Е. А. Чичкарев, В. В. Кислица* [и др.] ; под общ. ред. *Е. Х. Шахпазова*. – М. : Металлургия, 2008. – 376 с. – Библиогр. : с. 344-373. – ISBN 978-5-902194-32-3.
2. Усовершенствование технологии рафинирования стали на ОАО МК «Азовсталь» в процессе ее разливки на МНЛЗ путем изменения гидродинамики промежуточного ковша [Текст] / *В. Г. Ефимова, Г. В. Ефимов, В. М. Симановский* [и др.] // *Процессы литья*. – 2009. – № 3. – С. 69-73.
3. *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.
4. *Гресс, О. В.* Дослідження, моделювання та оптимізація ливарних систем [Текст] : навч. посібник / *О. В. Гресс, А. П. Огурцов, Ф. В. Недопьокін*. – Дніпродзержинськ: ДГТУ, 2012. – 287 с. – Бібліогр. : с. 285-286. – ISBN978-966-175-066-0.

Стаття надійшла до редакції 26.04.2013 р.
Рецензент, проф. М.Ф. Колесник