

УДК 669.182.4:621.86.064

**В. Г. Ефимова, Г. В. Ефимов, В.М. Симановский, И. И. Максютя,  
Ю. Г. Квасницкая**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

### **УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАФИНИРОВАНИЯ СТАЛИ НА ОАО МК «АЗОВСТАЛЬ» В ПРОЦЕССЕ ЕЕ РАЗЛИВКИ НА МНЛЗ ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОВША**

*Конструкция промежуточного ковша (ПК), существующая на ОАО МК «Азовсталь», в достаточной степени обеспечивает удаление экзогенных неметаллических включений (НВ), а также сформировавшихся эндогенных НВ. Механизм удаления НВ основан на создании существенных по величине вихреобразных гидродинамических структур металла с большими скоростями потоков в них. Условие охвата вихреобразными потоками всего объема металла позволяет затягивать жидкую часть шлаковой поверхности в свои гидродинамические структуры, что, в свою очередь, обеспечивает интенсивное перемешивание шлака с металлом во всем объеме. Такие условия можно создать в замкнутой реакционной камере.*

*Конструкція проміжного ковша (ПК), яка існує на АТ МК «Азовсталь», достатньо забезпечує видалення екзогенних неметалевих включень (НВ), а також сформованих ендогенних НВ. Механізм видалення НВ заснований на створенні суттєвих по величині вихороформуючих гідродинамічних структур металу з більшими швидкостями потоків в них. Умова охопту вихороформуючих потоків цілого об'єму металу дозволяє затягнути рідку частину шлакової поверхні в свої гідродинамічні структури, що, в свою чергу, забезпечує інтенсивне перемішування з металом по всьому об'єму. Такі умови можна створити в замкнутій реакційній камері.*

*Existing on the MC "Azovsteel" design of the intermediate scoop (IS) in sufficient degree provides removing non-metallic inclusions (NI). The mechanism of the removing (NI) is founded on creation essential in size curl hydrodynamics structures of the metal with greater velocity flow in them. The condition of the incidence curl flow of the whole volume of the metal allows delaying the fluid part a slag to surfaces in their own hydrodynamics of the structure that in turn provides intensive mix of slag with metal in all volume. Such condition possible to create in closed reactionary camera.*

**Ключевые слова:** промежуточный ковш, неметаллические включения, ортокинетическая коагуляция, вихреобразная гидродинамическая структура, многоканальная формула, газо-выделительный канал, реакционная камера, сплошные перегородки, щелевые каналы.

В результате возросших требований к качеству металла значительно возрос интерес к очистке стали от неметаллических включений путем установки перегородок в промежуточном ковше. Поэтому в металлургии появилось одно из направлений – пропускание стали через вертикальные перегородки с отверстиями, имеющими большое проходное сечение. В этом случае удаление неметаллических включений основано на создании благоприятных гидродинамических условий, способствующих выносу неметаллических включений в шлаковую зону, и на ассимиляции их последней. Для решения этой задачи необходимы правильный выбор конструкции ванны промежуточного ковша, конструкции перегородки, конфигурации и сечения переточных каналов, а также схемы расположения каналов в перегородке.

Существующая на ОАО МК «Азовсталь» конструкция промежуточного ковша (ПК)

в достаточной степени обеспечивает удаление экзогенных неметаллических включений (НВ), а также сформировавшихся эндогенные НВ. Как свидетельствует большинство теоретических и практических исследований; эндогенные НВ на стадии пребывания в ПК существуют в виде мельчайших коллоидальных сегрегаций (с размерами сегрегаций молекулярного уровня) и по своим физико-химическим характеристикам почти не отличаются от свойств стали. Для их удаления необходимы многостадийные преобразования до выделения их в виде самостоятельной фазы, имеющей достаточные размеры. Основываясь на теоретических принципах удаления НВ, этот процесс в наибольшей степени интенсифицируют коагуляция и время пребывания в ПК. Промежуточный ковш должен обеспечивать условия, интенсифицирующие процесс коагуляции, увеличивать время пребывания НВ в ПК, а также длительный контакт со шлаковой фазой [1].

Основываясь на принципах ортокинетической коагуляции, обеспечивающей направленное движение частиц неметаллических включений, их слияние, укрупнение и подачу к шлаковому покрову, были определены наиболее подходящие условия распространения затопленных струй и их основные гидродинамические параметры. Этими условиями являются достаточно высокие скорости затопленных потоков, превышающие скорость опускания металла в ковше; прохождение траекторий распространения струй выше опасных зон затягивания неметаллических включений в выпускной стакан; создание вынужденной конвекции во всем объеме металла, направленной к зеркалу металла в промежуточном ковше; образование вихреобразной гидродинамической структуры в расплаве металла. Последнее условие является наиболее решающим для удаления неметаллических включений с количественной точки зрения ввиду того, что порции металла в промежуточном ковше находятся очень непродолжительное время. Поэтому вынос неметаллических включений в шлаковую зону, быстрое прохождение и краткое пребывание в контакте со шлаком (а также и без контакта) не всегда приводят к ассимиляции их покровным шлаком. Вероятность перехода неметаллических включений в шлак пропорциональна их количеству, размерам и длительности контакта со шлаком. Вихревая структура объемов металла позволяет в наилучшей степени и максимально быстро укрупнять неметаллические включения и создавать условия для выноса их в шлаковую зону. Распределение усилий в вихревой структуре показано на рис. 1. Скорость увеличения концентрации и укрупнения частиц пропорциональна величине центробежной силы  $F_{ц}$ , которая зависит от угловой скорости вихря  $\omega$ .

$$F_{ц} = \omega^2 (m_{м} - m_{ч}), \quad (1)$$

где  $m_{м}$  и  $m_{ч}$  — удельная масса металла и частицы.

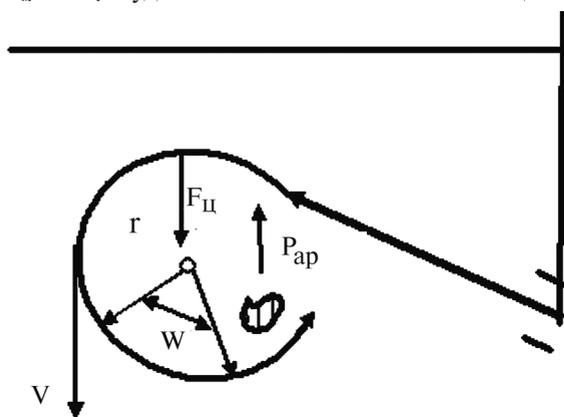


Рис. 1. Схема воздействия скоростных потоков и усилий на частицу неметаллического включения, находящегося в вихре

Частицы неметаллических включений под действием центробежной силы устремляются к центру вихря, поскольку имеют меньшую плотность по сравнению с расплавом стали. Там они при многократном соприкосновении укрупняются и при достижении определенных размеров под воздействием увеличивающейся архимедовой силы всплывают. Центробежная сила, как и угловая скорость, пропорциональна скорости потока  $U$  и радиусу его закручивания  $r$ . Поэтому очевидно, что для увеличения скорости коагуляции частиц неметаллических

включений и скорости их всплывания  $\omega = rU / 2$  необходимо увеличивать скорость истечения затопленной струи и диаметр вихря.

При подаче свободных затопленных струй из перегородки в промежуточном ковше под углом к покровному шлаку происходит межфазный массоперенос примесей в струе к шлаку на открытой поверхности металла в ковше. Это случай квазистационарного состояния, то есть верхний уровень, занимает заданное положение. При этом происходят ассимиляция неметаллических включений в жидкой фазе покровного шлака и переход в него сернистых соединений, оксидов и других примесей. Главными параметрами, вызывающими перенос вещества через межфазную поверхность, являются молекулярная и турбулентная диффузии примесей на границе фаз.

При соприкосновении затопленной струи жидкой стали с покровным шлаком у поверхности раздела фаз возникает пара сил, приводящая к образованию вихрей и вращению микрообъемов стали и шлака. Эти вихри все глубже проникают в толщину обеих фаз и тем самым усиливают интенсивность массопереноса. При этом диффузионный поток на единицу площади струи и шлака составляет

$$I = -(D + \xi / \nu) dc/dx, \quad (2)$$

где  $D$  - коэффициент молекулярной диффузии;  $\xi / \nu$  - коэффициент вихревой диффузии, равный

$$\xi / \nu = \frac{2,5 \cdot 10^{-4} \nu}{\text{Re}^{0,2} \text{Pr}^{0,65}}, \text{ м}^2/\text{с}, \quad (3)$$

$\text{Re}$  - критерий Рейнольдса;  $\nu$  - скорость потока;  $\text{Pr}$  - критерий Прандтля для диффузионных процессов;  $dc/dx$  - градиент концентрации веществ;  $\nu$  - размер частиц.

Коэффициент турбулентной диффузии обычно на 5-6 порядков больше молекулярной, поэтому последний при расчетах не учитывают. Общее количество вещества, подведенного к поверхности взаимодействия двух фаз за время протекания вдоль нее струи, равно

$$I = \xi / \nu \Delta C S \tau, \quad (4)$$

где  $\Delta C$  - разница концентраций диффундируемых веществ между соприкасающимися фазами;  $S$  - площадь взаимодействия затопленных струй с покровным шлаком;  $\nu$  - ширина промежуточного ковша;  $\tau$  - время.

Из приведенных уравнений следует, что увеличение ширины ковша и протяженности вихревого взаимодействия способствует удалению вредных примесей и неметаллических включений из стали.

Увеличение скорости истечения затопленной струи также усиливает эффект рафинирования. Для осуществления эффективного удаления неметаллических включений помимо рассмотренных условий необходимо задействовать путем вихреобразования весь объем жидкого металла, что обеспечит контакт со всей площадью шлакового покрова без образования застойных зон.

Исходя из этого, механизм удаления НВ основан на создании существенных по величине вихреобразных гидродинамических структур металла с большими скоростями потоков в них. В этом случае НВ втягиваются в эти структуры и продолжительное время вращаются на орбитах вихрей. При этом НВ неоднократно сталкиваются, укрупняются за счет их слияния и интенсивного перемешивания [2]. Такой механизм при условии охвата вихреобразными потоками достаточного объема металла и непосредственно жидкой части шлаковой поверхности должен затягивать эту жидкую часть в свои гидродинамические структуры. Это должно обеспечивать интенсивное перемешивание шлака с металлом во всем объеме. Таким образом, создаются наиболее благоприятные условия рафинирования металла. Как показывают исследования и мировая практика, такие условия можно создать наилучшим образом в замкнутой реакционной камере [3].

Таким образом, при физическом моделировании визуальными критериями оценки эффективности той или иной гидродинамической структуры с точки зрения удаления неметаллических включений являлись углы расположения каналов в перегородке; размеры зоны вихреобразования; количество вихрей; характер вихреобразования (устойчивый, неустойчивый); распространение затопленных потоков относительно затягивающего не-

металлического включения скоростного потока, возникающего при истечении струи из разливочного стакана в кристаллизатор; величина и количество застойных зон; величина охвата шлаковой поверхности воздействием направленных гидродинамических потоков.

Для интенсификации процессов удаления неметаллических включений, исходя из теоретических предпосылок, необходимо увеличивать скорость всплывания, которая практически будет зависеть от давления газа в магистрали подводящего газопровода. Поэтому на первых этапах гидромоделирование сводилось к изучению влияния давления газа на межфазное структурообразование в газожидкостной среде.

Для осуществления этих целей в данной работе была изготовлена гидромодель ПК в масштабе 1:3 с соблюдением равенства критериев подобия Фруда и автомодельности по числу Рейнольдса. Для моделирования была изготовлена многоканальная фурма (блок из оргстекла с газораспределительным каналом диаметром 7 мм и газовыми каналами диаметром 0,5 мм). Размеры каналов и расстояния между мелкими газовыделительными каналами соответствовали натуральным в соответствующем масштабе. Через такую фурму подавался воздух при различных избыточных давлениях. При малых давлениях при высоте уровня жидкости, соответствующего уровню налива металла в проковше, не достигается критическая скорость всплывания. Газ (воздух) в этом случае в виде пузырьков с различным их количественным содержанием содержится поднимаемая к открытой поверхности без образования газожидкостной эмульсии. С повышением давления увеличивается скорость всплывания газовых пузырей и при больших давлениях образуется сплошная газожидкостная эмульсия. Следует отметить, что при избыточном давлении 127 кПа наблюдается переходной режим, при котором уже частично образуется газожидкостная эмульсия. Диаметр газовыделительных каналов должен составлять 1,5–2,0 мм.

Методика моделирования заключалась в введении индикаторов потоков, фиксации времени пребывания порции гранул в ПК, фиксировании размеров вихревых структур и скоростей потоков в них. Индикаторами потоков служили гранулы полистирола плотностью 0,7–0,9 г/см<sup>3</sup> размером частиц 1–2 мм. Изменяя конструкции реакционных камер перегородок и интенсивность продувки, создавали возможность варьирования гидродинамических структур, скоростей потоков и времени пребывания порции гранул в ПК.

Как показали исследования, наиболее эффективны конструкции реакционных камер, состоящие из двух сплошных перегородок с щелевыми каналами у днища ковша. Перегородка со стороны приемной камеры должна иметь щель под наклоном в сторону торцевой стенки ПК. Фурма должна располагаться у перегородки со стороны раздаточной камеры.

Такая конструкция обеспечивает создание направленного потока жидкости, образующего две вихревые циркуляционные гидродинамические структуры. Одна из них существует в реакционной камере, а другая – в раздаточной (рис. 2, а). Эта схема конструкции ПК обеспечивает увеличение времени пребывания порции гранул в 4–6 раз больше, чем это имеет место при существующей конструкции ПК. Сечение щелей и место их расположения обеспечивают минимальные теплотери и гарантируют отсутствие их зарастания.

Исследования показали, что гидродинамические процессы, возникающие в ПК с исследуемыми вариантами конструкций, в определенной степени зависят от гидродинамического (механического) силового воздействия газового потока, создаваемого при продувке. Сила воздействия, обусловленная перепадом уровней приемной и раздаточной камер, практически несоизмерима с воздействием продувки. Эффективность воздействия продувки на создание требуемых гидродинамических структур обратно пропорциональна объему металла, подвергнутому обработке газом. Поэтому создание больших по объему реакционных камер нецелесообразно. Наиболее оптимальными следует считать камеры небольшого объема. Исследования свидетельствуют, что в камерах такого размера содержится достаточный объем металла, который обеспечивает полномасштабное перемешивание металла со шлаком, коагуляцию и удаление неметаллической фазы из порций металла, проходящего через ПК. Силовое (механическое) воздействие газа на объемные массы жидкости при пузырьковом режиме наиболее эффективно из-за большей площади контакта пузырьков газа с массой жидкости. Поэтому давление газа, как показало моделирование, должно обеспечивать пузырьковый режим [4].

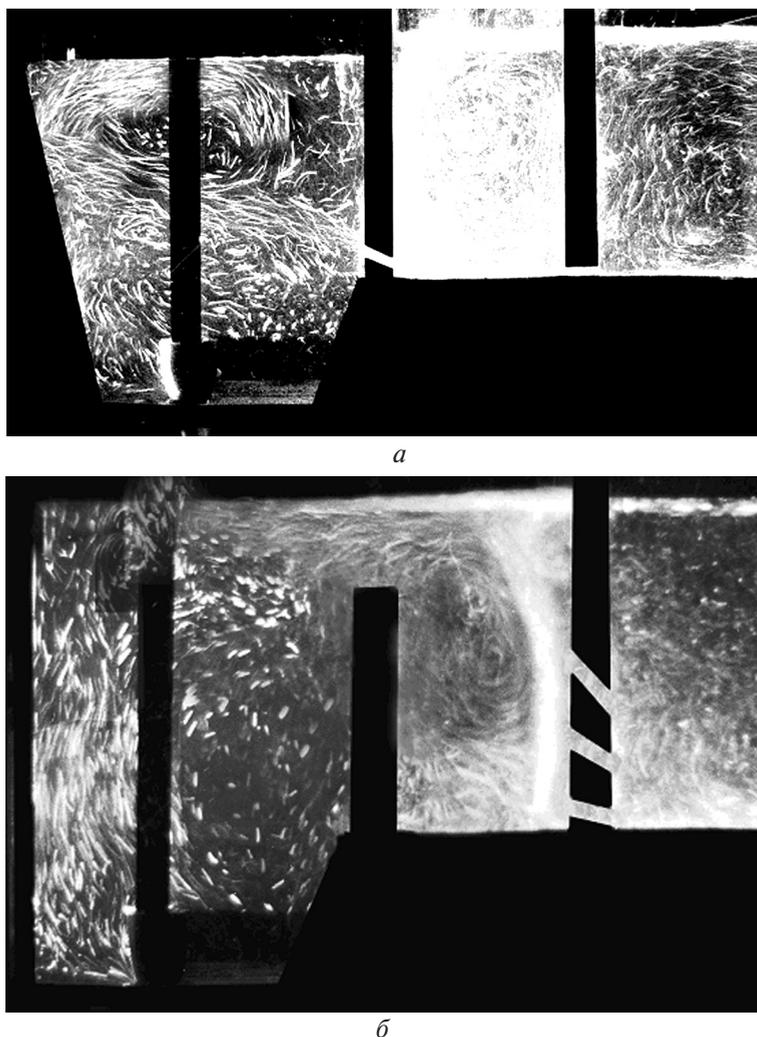


Рис. 2. Схемы силового воздействия фурмы на образование гидродинамических структур в реакционной камере

На наш взгляд, возможность создания реакционной камеры за счет применения порога и перегородки малоэффективна. Такая конструкция не обеспечивает получение активных циркуляционных структур, она создает гидродинамику потоков в направлении раздаточной камеры, чем вызывает существенное снижение эффекта рафинирования (рис. 2, б).



### Список литературы

1. *Heaslip L. J., McLean A., Sommerville I. D.* Chemical and Physical Interaction During Transfer Operation // *Cont. Casting. ISS – AIME.* - 1983 - V. 1. - P. 67-112.
2. *Ефимова В. Г.* Разработка эффективных методов рафинирования стали в промежуточных ковшах МНЛЗ путем формирования гидродинамических потоков расплава: Дис. ... канд. техн. наук. - Киев, 2004. - 196 с.
3. Процессы непрерывной разливки / А. Н. Смирнов, В. Л. Пилюшенко, А. А. Минаев и др. – Донецк: ДонНТУ, 2002. - 536 с.
4. *Хоблер Т.* Массопередача и адсорбция. - М.: Химия, 1962. - С. 52-54.

Поступила 26.02.09