

НАУКОВІ ПРАЦІ ДОННТУ

Серія: **Металургія**



Випуск 102

Донецьк 2005

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕШИВАНИЯ СТАЛИ В АГРЕГАТЕ КОВШ-ПЕЧЬ

А.Н.Смирнов, И.Н. Салмаш, Е.В. Ошовская, В.С. Седуш (ДонНТУ, г. Донецк)

Представлены результаты изучения характера гидродинамических потоков, возникающих при продувке в агрегате ковш-печь, с использованием математической конечно-элементной модели, а также исследовано влияние расположения и диаметра продувочного отверстия и скорости вдуваемого газа на скорость циркуляции расплава.

На современном этапе для проведения операций по внепечной обработке стали широко используется агрегат ковш-печь. В ковше выполняются операции по легированию, раскислению, десульфурации, гомогенизации химического состава металла, модифицированию неметаллических включений, которые сопровождаются продувкой расплава. При этом помимо перемешивания металла происходит проникновение шлака в расплав, размываются и разрушаются огнеупоры, в расплаве появляются застойные зоны и неравномерное распределение температуры. В связи с этим актуальными задачами являются изучение характера гидродинамических потоков, возникающих в процессе перемешивания расплава, и оптимизация параметров обработки. В данной статье рассмотрено влияние расположения и диаметра продувочного отверстия, а также скорости продувки на характер гидродинамических потоков и интенсивность перемешивания в агрегате ковш-печь вместимостью 130 т с одним продувочным отверстием.

Исследование выполнено на математической модели, разработанной с использованием учебной версии прикладного пакета ANSYS/ED, реализующего метод конечных элементов. Рассматривалась плоская нестационарная задача с моделированием жидкой ванны металла, в которой происходит процесс перемешивания за счет естественной конвекции и вдувания инертного газа через днище ковша. В качестве начальных условий выступали температура жидкого металла 1620 °С и температура: на границе со стенками ковша 1500 °С, на границе со шлаком 1660 °С. Также учитывался процесс теплоотдачи от расплава через стенки и днище ковша в окружающую среду. Скорость жидкого расплава на границе со стенками ковша, кроме зоны продувочного отверстия, равнялась нулю. Длительность продувки составляла 600 с. Конечно-элементная модель жидкого расплава с приложением начальных и граничных условий приведена на рис.1, модель

состояла в среднем из 620 элементов. Тепло-физические характеристики жидкой стали являлись функциями температуры и описывались выражениями:

– плотность, кг/м³

$$\rho = 7386.8 + 0.188(T + 5756.8) - 2.3 \cdot 10^{-5}(T + 5756.8)^2 ;$$

– вязкость, Н·с/м²

$$\mu = 0.0035 \exp \left[6089.4 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{1200} \right) + 1.23 \cdot 10^6 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{1200} \right)^2 \right] ;$$

– теплоемкость, Дж/(кг·К)

$$c = 460 ;$$

– теплопроводность, Вт/(м·К)

$$\lambda = 27 .$$

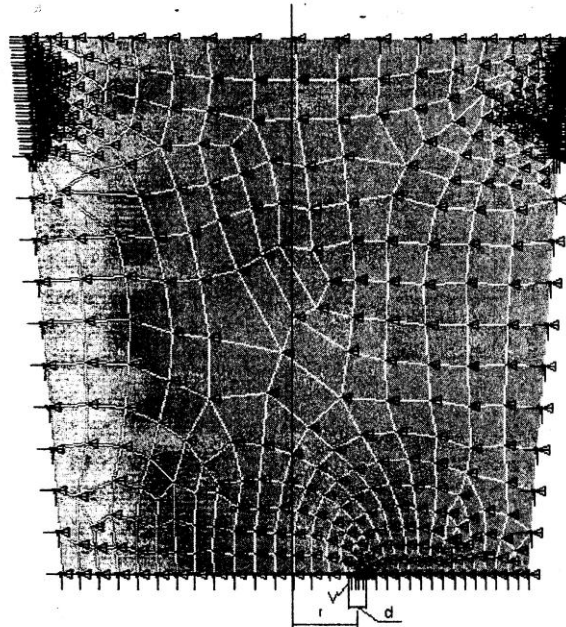


Рисунок 1 – Конечно-элементная модель расплава стали в агрегате ковш-печь с приложенными начальными и граничными условиями.

Первый этап исследований заключался в изучении влияния расположения продувочного отверстия на скорость циркуляции, температуру и интенсивность перемешивания расплава. При этом было принято, что ско-

Скорость вдуваемого газа V равна 1 м/с, диаметр продувочного отверстия $d=100$ мм. Расположение продувочного отверстия характеризовалось расстоянием его центра по отношению к вертикальной оси симметрии ковша (r) и варьировалось от 0 до 1,15 м. Так как в настоящее время известно несколько зависимостей разных авторов [1-3], приводящих к различным численным значениям данного параметра, то интенсивность перемешивания расплава оценивалась по двум формулам.

Согласно формуле Наканиши [1, 2] интенсивность перемешивания (Вт/т) равна:

$$\dot{\epsilon} = 6.18q \left(\frac{T}{G} \right) \ln \left(1 + \frac{H}{1.48} \right), \quad (1)$$

где q – расход газа, м³/мин;
 T – температура расплава, К;
 G – масса металла в ковше, т;
 H – высота металла, м.

Интенсивность перемешивания при вдувании аргона по формуле Сандберга (Вт/т) вычисляется так:

$$\dot{\epsilon} = 6.18q \left(\frac{T}{G} \right) \left\{ \left(1 - \frac{273}{T} \right) + \ln \left(\frac{p_1 + \rho g H}{p_1} \right) \right\}, \quad (2)$$

где q – расход газа, м³/мин;
 T – температура расплава, К;
 G – масса металла в ковше, т;
 p_1 – атмосферное давление, Па;
 ρ – плотность металла, кг/м³;
 H – высота металла, м.

Авторами [1-3] показано, что интенсивность перемешивания обуславливается гидродинамическими явлениями, протекающими в жидком металле в процессе продувки.

На рис.2 приведены поля скоростей расплава для случая, когда продувочное отверстие располагалось в центре днища ковша, для различных моментов времени.

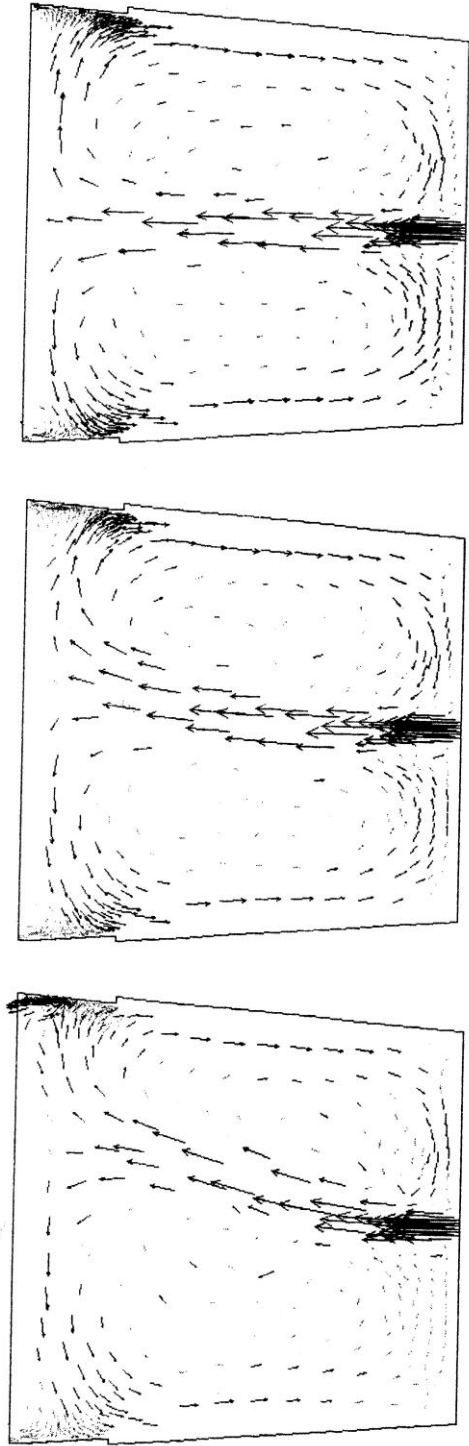
Как видно из полученных картин в ковше происходит циркуляция расплава, причем в начальный период времени (до 150 с) зоны циркуляции не одинаковы. Установлено, что центральный факел смещается вправо и, поднимаясь вверх, ударяется в футеровку шлакового пояса со скоростью 0,3 ... 0,4 м/с. При этом поток делится на два, один из которых опускается вниз к днищу, а второй направлен вверх в зону расположения шлака. Такая картина свидетельствует о том, что в начале продувки потоки расплава будут увлекать в перемешивание слои шлака, расположенные справа, и ак-

тивно воздействовать на футеровку шлакового пояса, что отчасти объясняет интенсивный износ огнеупоров в этой зоне, кроме того шлак будет перемешиваться с расплавом. По мере увеличения времени продувки происходит стабилизация и выравнивание циркуляции в обеих частях ковша, потоки расплава в зоне шлакового пояса направлены вниз и их скорость составляет 0,1 ... 0,2 м/с. На границе контакта со шлаком скорость потоков равна 0,1 ... 0,15 м/с, и они направлены от центра к стенкам ковша. В зоне днища скорость составляет около 0,1 м/с.

Вследствие излучения тепла через стенки и дно ковша, а также зеркало металла происходит изменение температуры расплава. Распределение температуры металла по объему ковша неравномерно (рис.3). Наименьшую температуру (1598..1610 °С) имеет расплав у стенок и днища, а также вдоль факела вдуваемого газа. В нижней и средней зоне ковша температура левой части расплава выше на 15..20 °С, чем правой, что объясняется меньшими скоростями циркуляции. В зоне шлакового пояса перепад температур расплава равен 5..8 °С. К окончанию продувки (через 600 с) разность температур по всему ковшу составляет около 15 °С.

Следует отметить, что при дальнейшем моделировании для различных вариантов расположения продувочного отверстия описанные тенденции движения потоков в целом сохраняются. Однако наряду с этим, в ковше возникают зоны расплава, в которых отсутствует циркуляция, т.е., так называемые «мертвые» зоны. На рис.4 приведены картины полей скоростей при различных положениях продувочного отверстия через 600 с от начала продувки. При смещении продувочного отверстия к стенке ковша «мертвые» зоны располагаются в районе днища между основным факелом и правой стенкой ковша. Причем скорость расплава в этих зонах достигает 0,3 ... 0,8 м/с, а направление потоков свидетельствует об интенсивном воздействии на футеровку днища и нижней части стенок ковша, что может приводить к ее размыванию. Это явление особенно четко наблюдается в диапазоне размещения отверстия $r=0,7... 1,15$ м. Поэтому целесообразным с точки зрения стойкости футеровки днища можно считать расположение продувочного отверстия в диапазоне от 0 до 0,65 м.

Расположение продувочного отверстия влияет на картину распределения температуры расплава, особенно в нижней части ковша (рис.5). При смещении продувочного отверстия к правой стенке ковша наблюдается небольшое уменьшение перепада температур расплава между правой и левой частями ковша. Кроме того происходит более быстрое понижение температуры во всем объеме ковша. При расположении отверстия в диапазоне $r=0,1..0,75$ м перепад температуры к моменту времени окончания продувки составляет 40..60 °С, а для диапазона $r=0,85..1,15$ м наблюдается практически полное выравнивание температуры по объему металла.

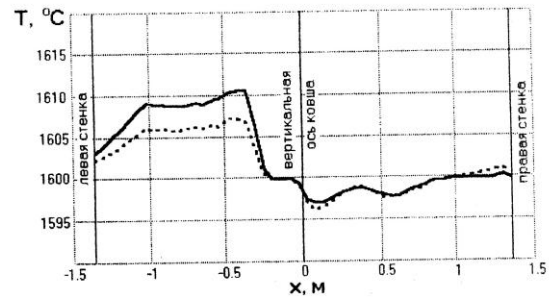


а

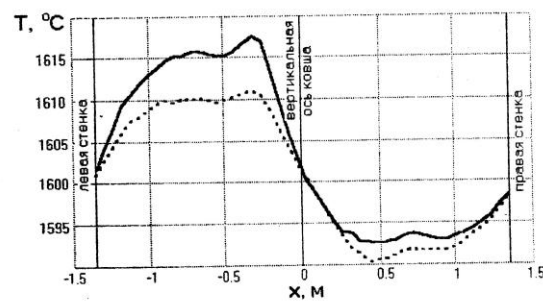
б

в

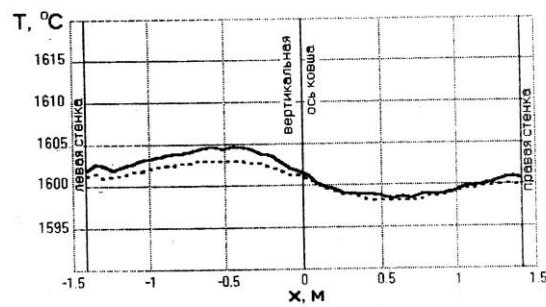
Рисунок 2 – Поля скоростей расплава при центральном расположении продувочного отверстия через: а) 60 с; б) 120 с; в) 600 с после начала продувки.



а



б



в

Рисунок 3 – Изменение температуры расплава во времени по диаметру ковша при центральном расположении продувочного отверстия на разной глубине от дна: а) 0,1 м; б) 1,5 м; в) 2,8 м;

————— – через 60 с; – через 600 с.

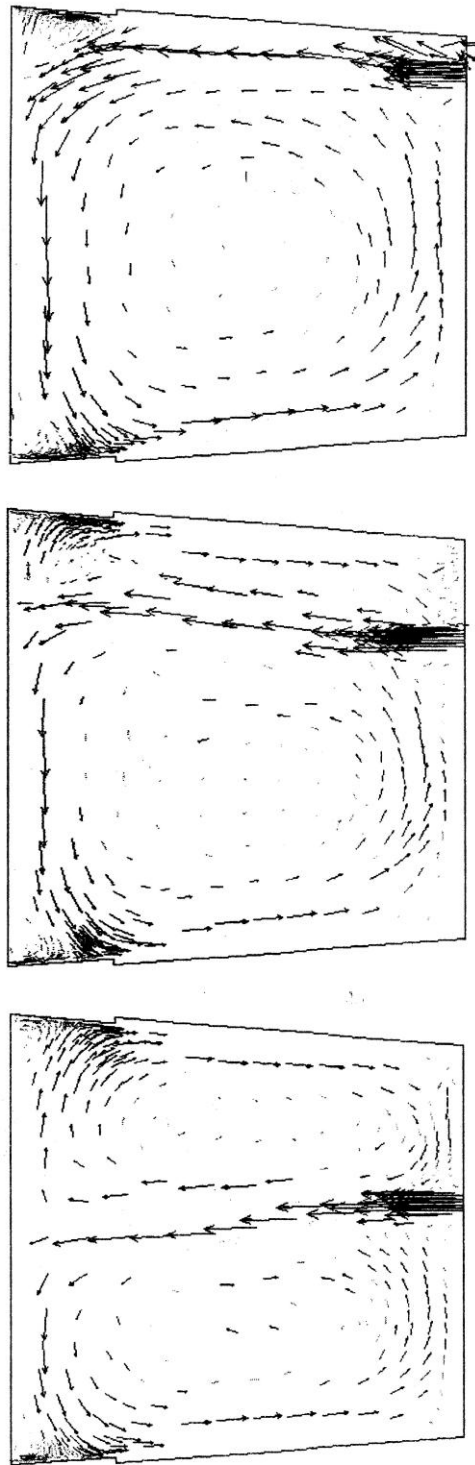
Количественная оценка интенсивности перемешивания расплава, выполненная по формулам (1) и (2), показала, что значение данной вели-

чины незначительно зависит от места расположения продувочного отверстия (рис.6). Для любого варианта расположения продувочного отверстия максимальное значение интенсивности перемешивания находится в диапазоне 43,4 ... 45,0 Вт/т (формула Наканиши) и 80,0 ... 83,5 Вт/т (формула Сандберга). Среднее значение интенсивности перемешивания расплава имеет тенденцию к некоторому снижению при смещении продувочного отверстия к правой стенке ковша и лежит в диапазонах 17,5...19,3 Вт/т и 54,2...54,8 Вт/т при расчете по формуле (1) и (2) соответственно. Таким образом, можно считать, что только интенсивности перемешивания не достаточно для выбора места расположения продувочного отверстия в агрегате ковш-печь, необходимо также при решении данной задачи основываться на картинах движения потоков расплава и значениях скоростей циркуляции.

На следующем этапе исследований рассматривалось влияние диаметра продувочного отверстия и скорости вдуваемого газа на характер движения гидродинамических потоков расплава в ковше.

На рис.7 приведены картины полей скоростей для продувочных отверстий диаметром 0,2 м и 0,1 м. Анализируя представленные картины, можно сказать, что увеличение диаметра отверстия приводит к возрастанию скоростей циркуляции расплава стали на 10...15 % по всему объему ковша. Причем повышается скорость движения расплава в зоне контакта со шлаком, в зоне шлакового пояса и днища ковша. Повышение скорости вдуваемого газа (от 0,5 м/с до 2 м/с) также приводит к увеличению скорости циркуляции расплава, однако, картины гидродинамических потоков не изменяются. Картины распределения температур расплава в ковше также изменяются незначительно. При повышении скорости вдуваемого газа изменение температуры расплава составляет 5...30 °С.

Количественные оценки интенсивности перемешивания расплава для рассмотренных диапазонов изменения диаметра продувочного отверстия и скорости вдуваемого газа аналогичны полученным на первом этапе исследований. При этом отмечалось незначительное (на 1,5..4,2 %) увеличение интенсивности перемешивания расплава при уменьшении диаметра продувочного отверстия. Однако полученные отклонения не превышают 5 % уровня ошибки и могут быть связаны с погрешностью конечно-элементной модели. Отмеченная на первом этапе исследований тенденция к понижению интенсивности перемешивания при смещении продувочного отверстия к стенке ковша проявилась также и при изменении диаметра продувочного отверстия и скорости вдуваемого газа.



а

б

в

Рисунок 4 – Поля скоростей расплава через 600 с после начала продувки при расположении продувочного отверстия:

а) $\Gamma=0,25$ м; б) $\Gamma=0,65$ м; в) $\Gamma=1,05$ м.

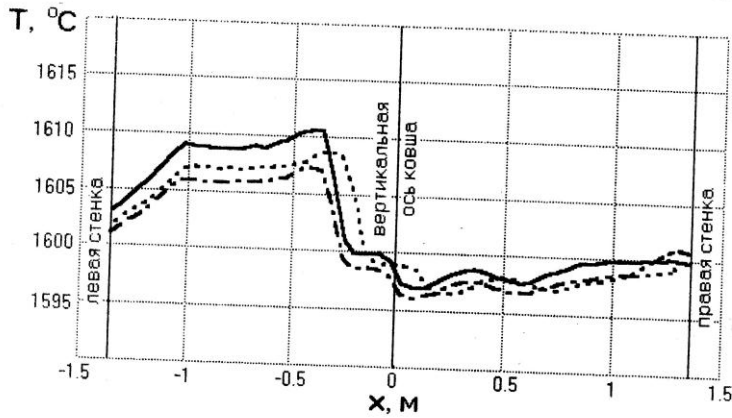


Рисунок 5 – Изменение температуры расплава по диаметру ковша на глубину от дна 0,1 м к моменту времени 600 с при различном расположении продувочного отверстия:

— $r=0,25$ м; $r=0,65$ м; · - · - $r=1,05$ м.

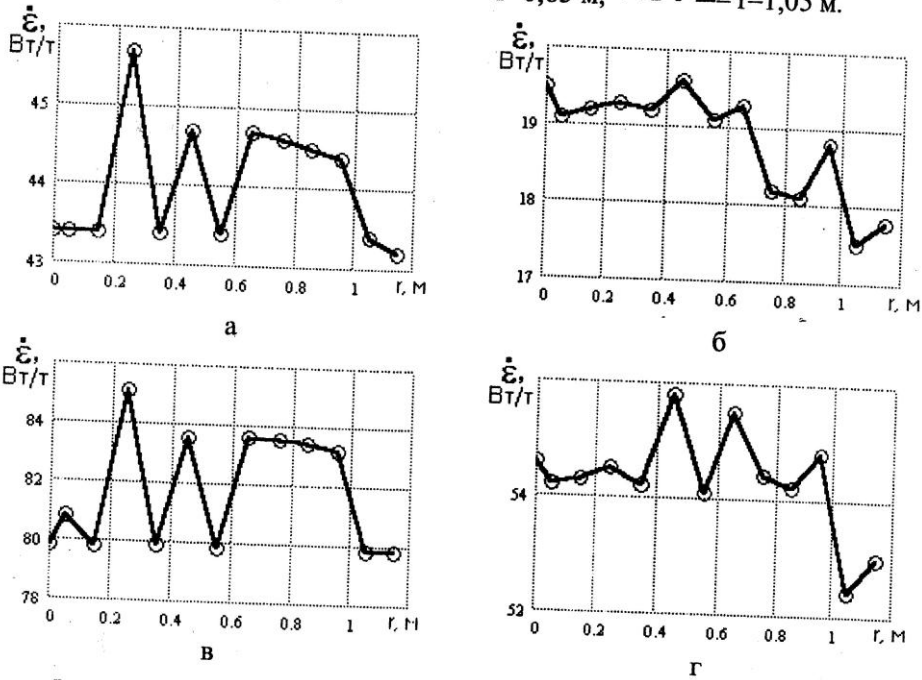


Рисунок 6 – Изменение максимального (а, в) и среднего (б, г) значений интенсивности перемешивания в зависимости от расположения продувочного отверстия: а, б – формула (1); в, г – формула (2).

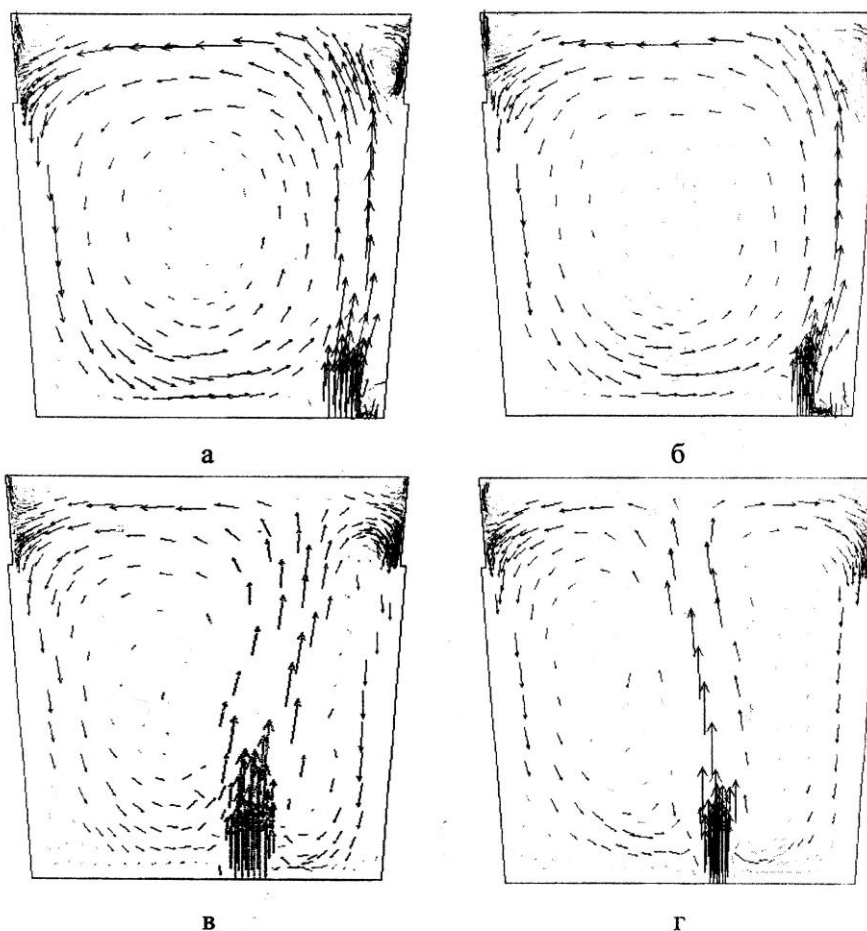


Рисунок 7 – Поля скоростей расплава через 600 с после начала продувки для скорости вдуваний газа 0,8 м/с при диаметре и расположении продувочного отверстия:
а) $d=0,2$ м, $r=0,9$ м; б) $d=0,1$ м, $r=0,9$ м; в) $d=0,2$ м, $r=0,2$ м; г) $d=0,1$ м, $r=0,2$ м.

Таким образом, проведенные исследования на математической модели позволили установить характер движения потоков расплава в агрегате ковш-печь при донной продувке инертным газом. Определено, что расположение продувочного отверстия в диапазоне 0,7 ... 1,15 м от вертикальной оси ковша приводит к возникновению в расплаве «мертвых» зон в области дна и является не допустимым. Интенсивность перемешивания расплава не может выступать в качестве единственного критерия при выборе

диаметра и места расположения продувочного отверстия. Увеличение диаметра продувочного отверстия вызывает повышение скорости циркуляции расплава. Ограничением на увеличение диаметра отверстия может выступать скорость расплава в зоне контакта со шлаком, при которой шлак увлекается в глубь ванны металла. Кроме того, следует учитывать явление интенсивного размыва огнеупоров футеровки шлакового пояса, особенно характерное для начального периода продувки.

Список литературы

1. Die von dispergierten Gasblasen induzierte Leistung und Flüssigkeitsbewegung an einer Stahlschmelze / Saffet Turkan und Klaus W. Lange – Steel Research, 1986.– P. 495 – 502 .
2. Перемешивание жидкого металла продувкой азотом в ковше: применение, ограничения и контроль / Шахин М.А., Эль-Никхайли А., Эль-Зеки М. // Инжекционная металлургия'86. – М.: Металлургия, 1990. – С. 146–156.
3. Развитие процесса дефосфорации стали в ковше на фирме NKK / Кикучи И., Такахаша К., Каваи И. и др.// Инжекционная металлургия'83. – М.: Металлургия, 1986. – С. 67–78.

© Смирнов А.Н., Салмаш И.Н.
Ошовская Е.В., Седуш В.С. 2005