

УДК 621.746.588

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПОТОКОВ СТАЛИ В ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОВШЕ

Д. Н. АНДРИАНОВ, М. Н. НОВИКОВ, А. И. СТОЛЯРОВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

Технология получения качественной непрерывнолитой заготовки представляет собой физически очень сложный, чрезвычайно энергоемкий и дорогостоящий процесс, что существенно затрудняет экспериментальные исследования в данной области. В связи с этим общепризнанной мировой практикой является экспертиза с использованием компьютерных моделей технических решений в области совершенствования конструкции и технологии непрерывного литья. Расчет такого процесса требует учета тепловых, прочностных и гидродинамических явлений и предъявляет высокие требования к возможностям используемых средств численного моделирования. Перед авторами была поставлена задача разработки расчетного алгоритма с применением системы компьютерного моделирования ANSYS/CFX [1] с целью исследования влияния расположения пористых газопродувочных элементов, расположенных в днище ковша, и режимов продувки инертным газом на гидродинамику потока расплава в промковше при непрерывной разливке.

Физическая модель

Из сталеразливочного ковша жидкий металл через стакан 1 (рис. 1) подается в промковш. Промковш служит буферной емкостью в случае разливки методом «плавка на плавку», а также для выделения неметаллических первичных примесей из металла. Истечение металла осуществляется через четыре стакана, расположенных в донной части ковша. Во время подачи металла в кристаллизатор через стакандозатор 3 и погружной стакан 4 расход регулируется изменением позиции стопора 2.

Математическая модель

Основные положения используемой математической модели были представлены в работе [2]. Исходными данными для расчета являлись: конфигурация и геометрические размеры промежуточного ковша; скорость поступления металла из основного ковша в промежуточный; уровень металла в ковше.

Начальные условия

На входе разливочного стакана задавали массовый расход металла G_{Σ} , рассчитанный для 4-ручьевого МНЛЗ, в соответствии с табл. 1. Расход являлся постоянным и определялся исходя из действующего технологического процесса разливки стали.

На выходе из погружного стакана задавали давление, пропорциональное глубине погружения погружного стакана в расплав в кристаллизаторе. Глубина погружения стакана в расплав при 100%-м заполнении кристаллизатора равнялась 220 мм.

При моделировании полагали, что: в начальный момент времени расплав неподвижен; свободная поверхность расплава плоская; уровень расплава в промковше постоянный.

Таблица 1

Массовый расход стали на 1 ручей G , кг/с

Скорость вытяжки слитка, м/мин	Сечение слитка	
	250 × 300	300 × 400
	Горячий формат	
	256 × 306	307,5 × 408
0,5	4,583	7,340
0,6	5,500	8,808
0,7	6,417	10,277
0,8	7,333	11,745

Результаты расчетов и их обсуждение

На начальном этапе был смоделирован процесс течения расплава в промковше без продувки. Фиксировали скорости течения расплава в четырех характерных сечениях (рис. 1). В сечении I поле скоростей расплава в промковше формируется в зависимости от массового расхода металла. В качестве контрольных для сечения I выбраны точки: a – середина глухой стенки бойного места; b – выход струи; v – место падения струи из стакана на днище бойного места (рис. 2). С изменением скорости вытяжки слитка от 0,5 м/мин до 0,8 м/мин скорость движения расплава в точках представлена в табл. 2.

Таблица 2

Диапазон изменения скорости расплава в контрольных точках

Скорость вытяжки слитка, м/мин	Скорость расплава в контрольных точках, м/с					
	а		б		в	
формат заготовки 250 × 300						
0,5	0,06	0,12	0,04	0,06	0,25	0,37
0,6	0,14	0,22	0,04	0,06	0,29	0,44
0,8	0,19	0,29	0,06	0,07	0,39	0,59
формат заготовки 300 × 400						
0,5	0,19	0,29	0,06	0,07	0,39	0,59
0,6	0,23	0,35	0,07	0,09	0,46	0,69
0,7	0,27	0,4	0,08	0,09	0,54	0,81
0,8	0,3	0,46	0,09	0,1	0,61	0,92

Как видно из представленных результатов, ожидаемое увеличение скоростей потока приводит изменению характера течения расплава в бойном месте ковша (рис. 2). Струя, истекающая из стакана, характеризуется значительной скоростью (0,6–1,5 м/с). Отражаясь от днища, она приводит к возникновению восходящих потоков вдоль стенок бойковой зоны ковша. Интенсивное движение расплава здесь создает условия для интенсивного износа футеровки. Дальнейшее движение расплава из бойковой зоны в ванну металла характеризуется таким же неблагоприятным воздействием на противоположную стенку ковша.

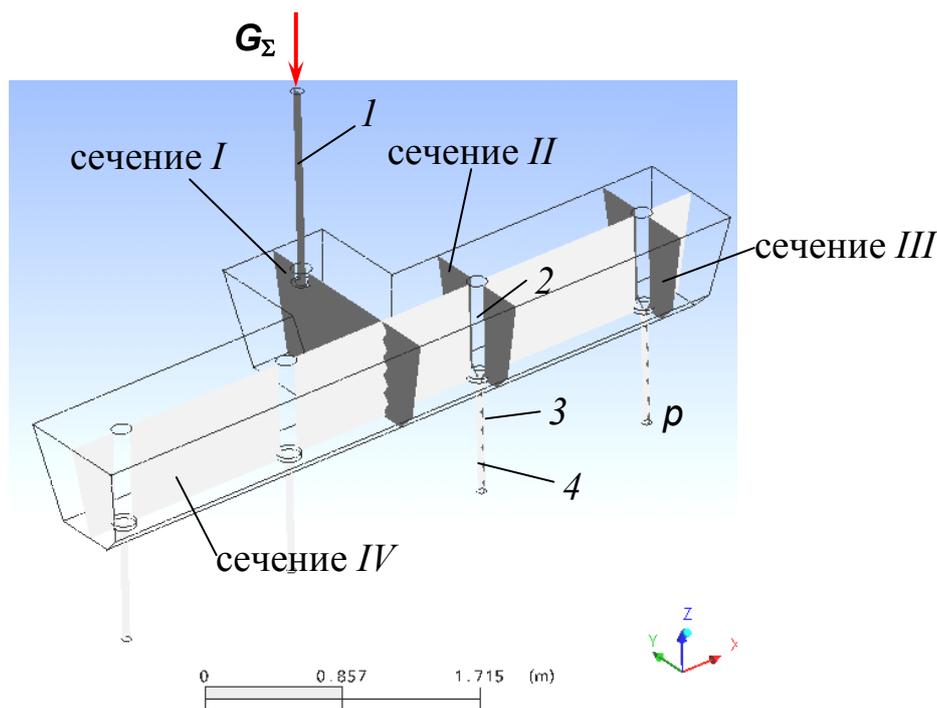


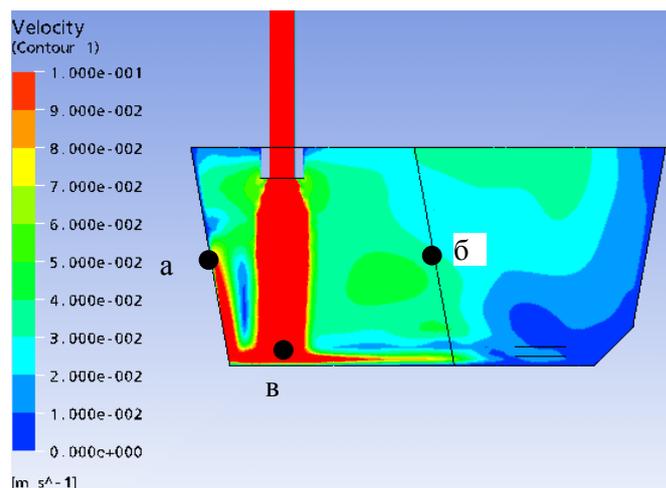
Рис. 1. Модель промковша:

1 – стакан промковша; 2 – стопор; 3 – стакан-дозатор; 4 – погружной стакан

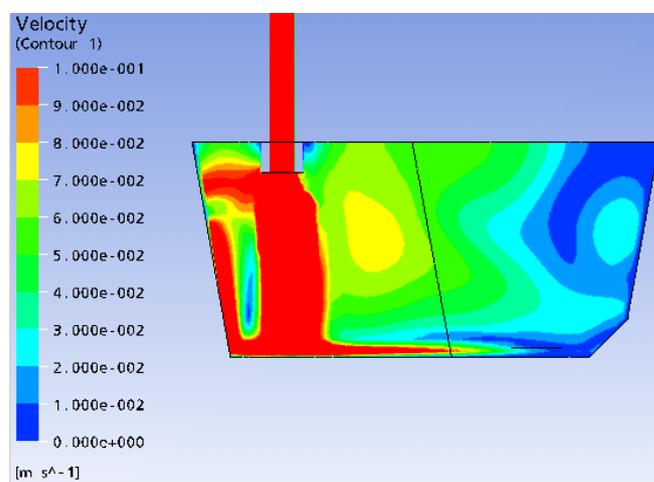
Конвективные линии тока представлены на рис. 3. Из рисунка следует, что наибольшая скорость расплава в ковше находится в бойной зоне ковша. Из этой зоны расплав истекает с уменьшающейся скоростью в ванну ковша. Например, при разливке расплава, соответствующей скорости вытяжки заготовки 0,5 м/мин, скорость уменьшается от 1 м/с до 2,5 см/с.

Проанализировав течение расплава (рис. 3), можно сделать выводы. При скорости вытяжки до 0,6 м/мин поток, исходящий из бойной зоны, не оказывает значительного влияния на скорости в ванне ковша. С увеличением скорости происходит интенсификация движения потока, оказывающая положительное влияние на развитие потоков расплава по объему металла в ковше. При этом наблюдается увеличение скорости вблизи днища ванны ковша между сталеразливочными отверстиями. При дальнейшем движении расплава из приемной камеры в разливочную часть ковша происходит затухание скорости практически до нуля, образуя вблизи «дальних» стенок ковша застойные зоны.

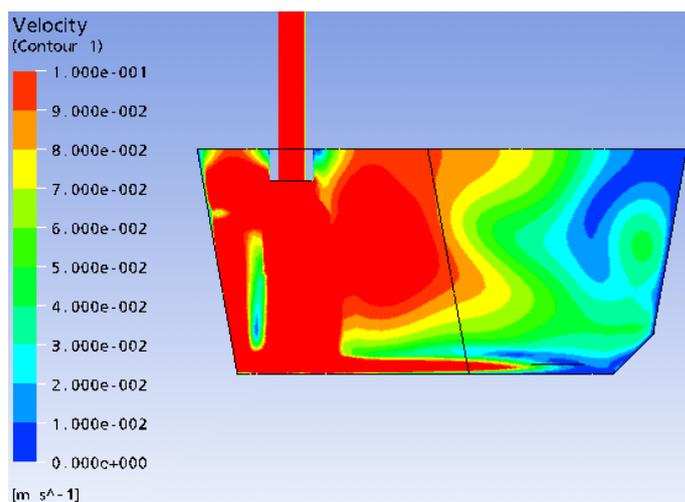
Проанализировав рассчитанные варианты, можно сделать вывод, что основная масса металла в ванне ковша практически неподвижна, что согласуется с результатами работ [3]. Таким образом, можно сделать следующий вывод: малое время пребывания и незначительные скорости движения расплава части металла в ковше не создают благоприятных условий для флотации неметаллических включений, их выносу на поверхность и ассимиляции покровным шлаком.



а)

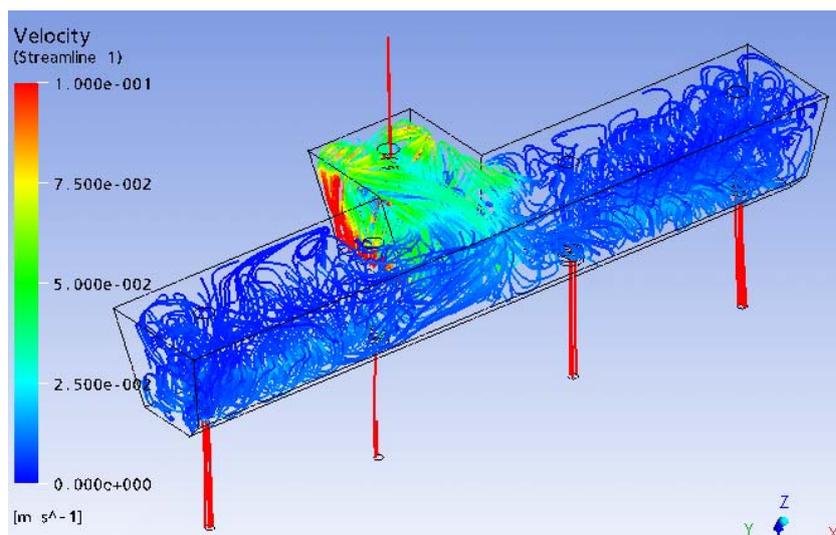


б)

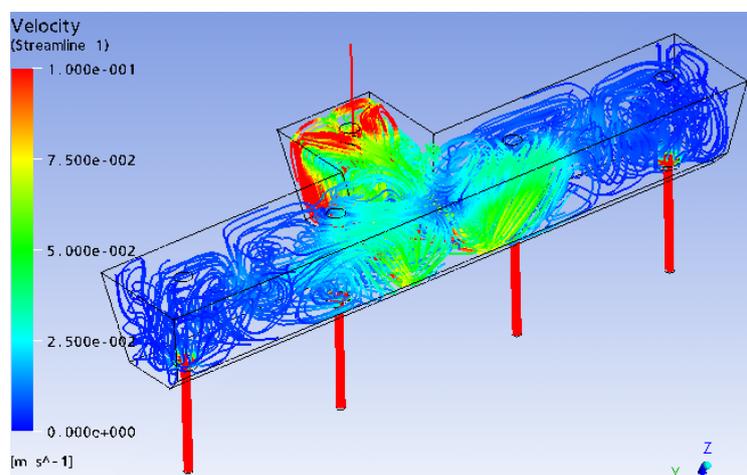


в)

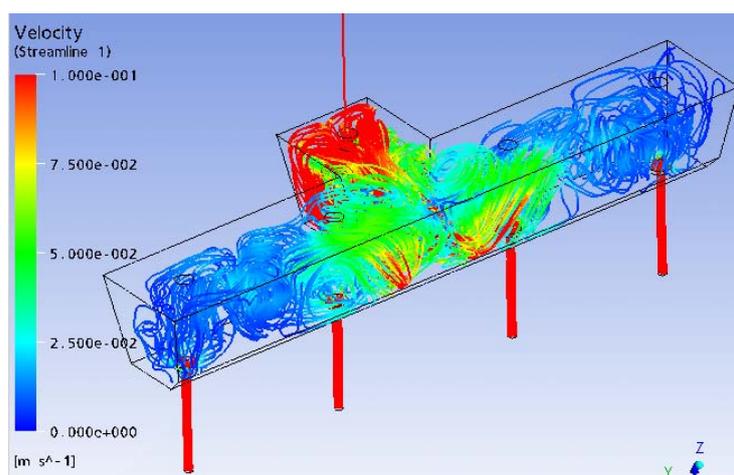
Рис. 2. Распределение поля скоростей расплава в сечении 1 ковша (м/с):
 а – формат заготовки 250×300 мм, скорость вытяжки 0,5 м/мин; б – 250×300 мм,
 $V = 0,5$ м/мин, 300×400 мм, $V = 0,8$ м/мин; в – формат заготовки 300×400 мм,
 скорость вытяжки 0,8 м/мин



а)



б)



в)

Рис. 3. Конвективные линии тока расплава в ковше (м/с): а – формат заготовки 250×300 мм, скорость вытяжки 0,5 м/мин; б – 250×300 мм, $V = 0,5$ м/мин, 300×400 мм, $V = 0,8$ м/мин; в – формат заготовки 300×400 мм, скорость вытяжки 0,8 м/мин

На практике установлено [3], что перемешивание металла приводит к значительному ускорению процесса его очищения от неметаллических включений. Потоки металла увлекают вместе с собой неметаллические включения. Последние достигают перемешиваемого, контактирующего со шлаком, слоя металла и частично переходят в него с последующей ассимиляцией шлаком. В этом случае могут всплывать включения, имеющие одинаковую плотность с металлом и даже несколько большую. Поэтому для организации флотации неметаллических включений необходимо определить условия осуществления данного процесса.

Степень очищения тонких слоев металла, оказавшихся непосредственно под шлаком, от неметаллических включений зависит от ряда причин и в конечном итоге определяется соотношением скоростей перехода включений из подслоя металла в слой, непосредственно контактирующий со шлаком, скоростью перехода (втягивания) включений в шлак и скоростью движения металла в горизонтальном направлении под шлаком.

Одним из способов управления движением и интенсификации потоков расплава в промкоше является продувка инертным газом, которая также позволяет организовать флотацию включений.

Как известно [4], скорости всплывания неметаллических включений, состоящих из глинозема в твердом состоянии и жидких алюминатов кальция в зависимости от размера включений в диапазоне 5–20 мкм, находятся в пределах 0,1–4,5 мм/с. А скорости потока металла, достаточные для выноса этих неметаллических включений, составляют 0,04–0,17 м/с. Поэтому на следующем этапе моделирования определяли скорость и месторасположение устройств для подачи аргона.

Продувка аргоном

Проанализировав конструкцию устройств подачи инертного газа в ковш, характер движения потока расплава, были рассмотрены следующие варианты расположения пористых блоков:

- в месте перехода струи расплава из бойной зоны в разливочную часть ковша, так как скорость расплава значительно уменьшается;
- между стопорами для создания дополнительной циркуляции расплава;
- в бойной зоне под стаканом разливочного ковша для гашения воздействия падающей струи расплава на футеровку.

Рассматривали варианты исполнения пористых блоков и их размещение.

Вариант 1. Пористый блок прямоугольного сечения в месте перехода струи расплава из бойной зоны в разливочную часть ковша, блок круглой формы между разливочными отверстиями (рис. 4, а).

Вариант 2. С тремя круглыми блоками расположенными симметрично относительно плоскости симметрии ковша, круглый блок – под стаканом промежуточного ковша (рис. 4, б).

Вариант 3. Кольцевая вставка возле разливочного отверстия (рис. 4, в).

Диаметр пузырька аргона был принят 0,5 мм. Диаметр круглой пробки был принят 144 мм, размер прямоугольной пробки – 140 × 440 мм, кольцевая пробка шириной 40 мм. Открытая пористость пробки принята 35 %.

Задаваемый массовый расход расплава соответствовал, следующим режимам разливки заготовки (табл. 1):

- 250 × 300 мм, скорость вытяжки 0,5 м/мин;
- 250 × 300 мм, скорость вытяжки 0,8 м/мин;
- 300 × 400 мм, скорость вытяжки 0,5 м/мин (одинаковый массовый расход расплава);
- 300 × 400 мм, скорость вытяжки 0,8 м/мин.

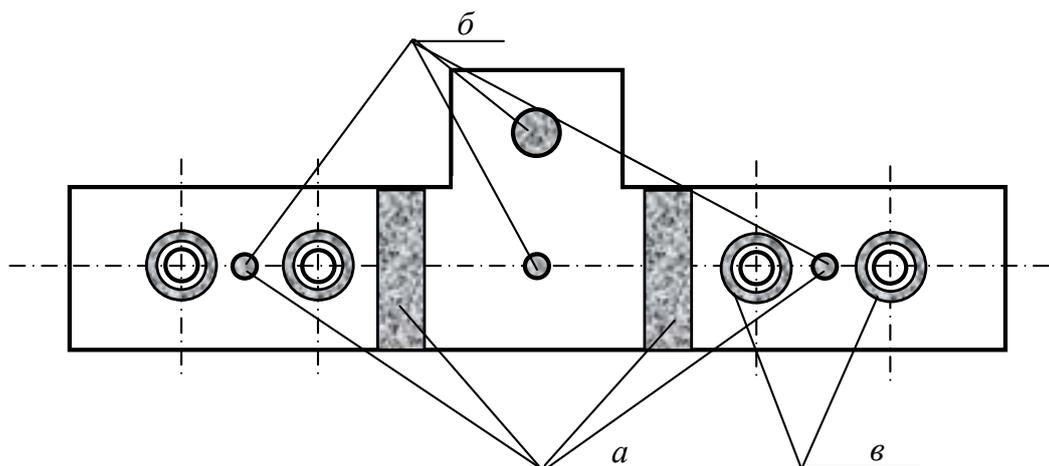


Рис. 4. Варианты исполнения пористых блоков для вдува аргона и схема их размещения:
 а – вариант 1; б – вариант 2; в – вариант 3

Для варианта 1 расход аргона при скорости подачи 0,1 м/с составил 0,0031 кг/с, при скорости подачи 0,2 м/с – 0,0062 кг/с.

Для варианта 2 расход аргона через три пробки 1 составил 0,00096 кг/с, пробку 2 – 0,00055 кг/с. Рассчитывали динамику потоков расплава при продуве аргоном через пробку 1 со скоростью 0,1 м/с и через пробку 2 – 0,2 м/с.

Через кольцевые пробки расход аргона составил: при скорости 0,1 м/с – 0,016 кг/с; 0,2 м/с – 0,0032 кг/с.

Свойства аргона задавали в соответствии с [5]: плотность – 0,559 кг/м³; молекулярная вязкость – $7,4 \cdot 10^{-5}$ кг/м · с; коэффициент поверхностного натяжения газ–металл – 0,0096 Н/м.

Анализ движения потоков расплава при обработке аргоном в промковше проводили в той же последовательности, что и без продувки. Рассматривались те же характерные сечения и контрольные точки.

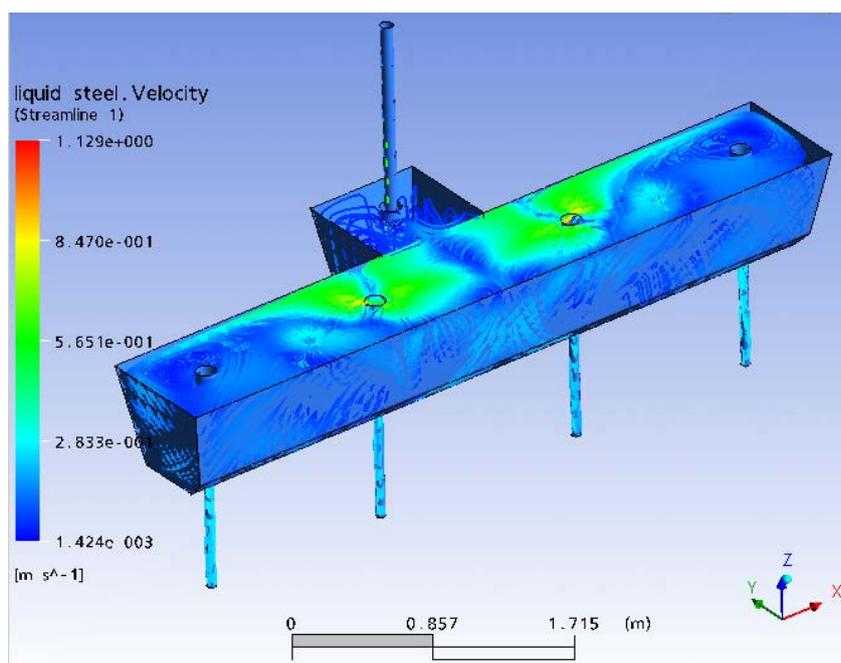


Рис. 5. Конвективные линии тока расплава в ковше (м/с). Вариант 1. Формат заготовки 250 × 300 мм, скорость вытяжки 0,5 м/мин, скорость вдува аргона 0,1 м/с

Из рис. 5–7 видно, что независимо от мест расположения пористых блоков, их геометрии и расхода аргона (в рассмотренных диапазонах) характер движения потоков расплава свидетельствует об интенсификации перемешивания.

Для формата заготовки 250×300 мм и скорости вытяжки 0,5 м/мин наблюдается ожидаемое увеличение скоростей потоков расплава, причем наиболее эффективной является продувка аргоном со скоростью 0,2 м/с по варианту 1. В случае превышения скорости движения расплава на поверхности более 0,5 м/с возможен разрыв шлака и оголение зеркала металла.

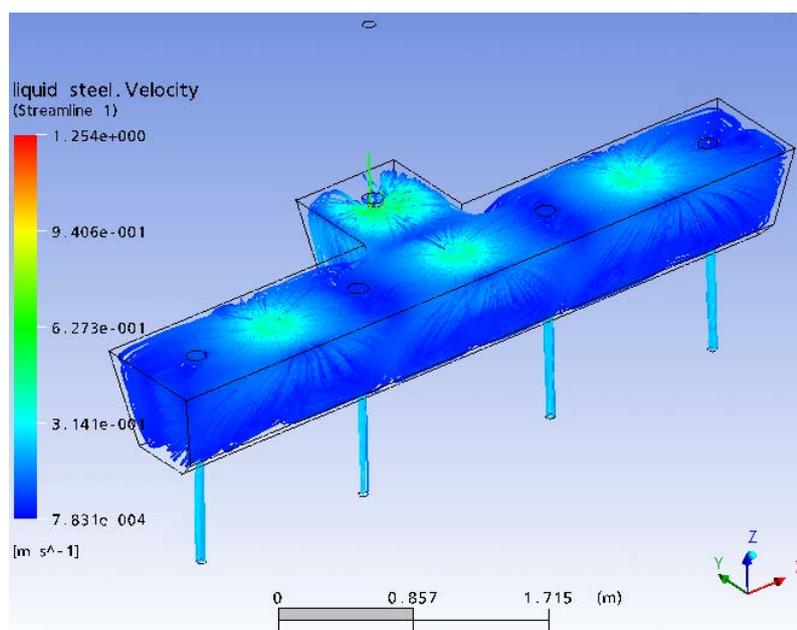


Рис. 6. Конвективные линии тока расплава в ковше (м/с). Вариант 2. Формат заготовки 250×300 мм, скорость вытяжки 0,5 м/мин

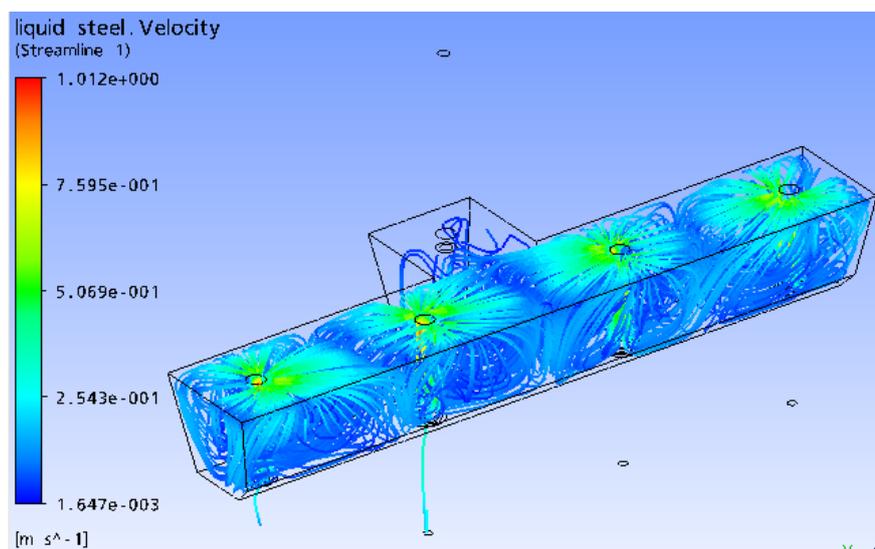


Рис. 7. Конвективные линии тока расплава в ковше (м/с) при продувке аргоном. Вариант 3. Формат заготовки 250×300 мм, скорость вытяжки 0,5 м/мин, скорость ддува аргона 0,1 м/с

Для формата заготовки 250×300 мм и скорости вытяжки 0,8 м/мин (300×400 мм, скорость вытяжки 0,5 м/мин) наиболее равномерное распределение скоростей расплава обеспечивается при продувке аргоном со скоростью 0,2 м/с.

Для формата заготовки 300×400 мм и скорости вытяжки 0,8 м/мин нельзя однозначно определить наиболее эффективный вариант продувки, однако для варианта 2 требуется значительно меньший расход аргона.

Таким образом, удаление крупных (размером более 20 мкм) неметаллических включений из стали можно организовать рациональным распределением пористых блоков в ковше. При прохождении металла из приемной камеры через области струйно-пузырькового течения аргона возникает ряд затопленных турбулентных струй, содержащих дисперсные включения огнеупоров и продуктов раскисления стали. Удаление из стали мелких неметаллических включений (менее 20 мкм) достигается путем создания сплошной завесы (вариант 1) из газа, подаваемого вертикально через пористый блок. Переменное распределение кинетической энергии между жидким металлом и газовой фазой приводит к тому, что вертикальная двухфазная струя в процессе истечения состоит из очень большого количества мельчайших пузырьков, всплывающих сплошным потоком в виде газожидкостной эмульсии.

На рис. 5–7 показаны конвективные линии тока расплава при продувке аргоном. Движение потоков характеризуется наличием завихрений в зоне стопоров. Наиболее интенсивное движение аргона наблюдается в зоне прямоугольных пористых блоков. Это связано с большим расходом аргона по сравнению с круглой пробкой. Аналогичным образом распределены и вертикальные составляющие скорости потока аргона. Высокая скорость движения расплава увлекает за собой в погружной стакан пузырьки аргона. Часть пузырьков аргона, обладающих достаточной подъемной силой, всплывая, скапливаются у стопора и находятся в динамическом равновесии. Подобную картину наблюдали авторы работы [4]. Наибольшая концентрация аргона в расплаве находится вблизи центральных стопоров, а также вдоль стенки ковша, примыкающей к бойковой зоне. Между крайними стопорами и дальней стенкой движение расплава осуществляется за счет инерционного движения потока расплава. Общее движение жидкости под воздействием газовой струи приобретает кругообразный замкнутый характер: снизу вверх вдоль струи газа, вдоль поверхности стенки ковша и далее вниз. В этом замкнутом объеме возникает различного рода вихреобразные потоки (рис. 5–7).

Заключение

В результате численного исследования определен рациональный вариант расположения пористых вставок для продувки инертным газом. Достигнутые скорости движения потока расплава при продувке аргоном позволяют организовать условия для удаления неметаллических включений, так как средняя скорость по объему промковша превышает необходимое расчетное значение достаточное для флотации.

На основании полученных результатов можно считать целесообразным продувку аргоном со скоростью не более 0,1 м/с.

Литература

1. ANSYS/CFX Theory Manual, 2009.
2. Моделирование процессов течения металла в кристаллизаторе МНЛЗ при подаче стали через прямоточный стакан / А. И. Столяров [и др.] // Литье и металлургия. – 2008. – № 1. – С. 85–89.

3. Рафинирование стали инертным газом / К. И. Баканов [и др.]. – Москва : Металлургия, 1975.
4. Кудрин, В. А. Теория и технология производства стали : учеб. для вузов / В. А. Кудрин. – Москва : Мир ; Изд-во АСТ, 2003. – С. 347.
5. Bai, H. and B. G. Thomas, «Two Phase Flow in Tundish Nozzles During Continuous Casting of Steel», Materials Processing in the Computer Age III, V. Voller and H. Henein, eds., TMS Annual Meeting, Nashville, TN, March 12–16, 2000, pp. 85–99.

Получено 23.04.2010 г.