
НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ

УДК 669.14:66.065.5

**А. Н. Смирнов, А. В. Кравченко, А. П. Верзилов,
К. Е. Писмарев**

Донецкий национальный технический университет, Донецк

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОВЕДЕНИЯ ЖИДКОЙ СТАЛИ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ СЛЯБОВОЙ МНЛЗ

Представлены результаты физического моделирования работы погружных стаканов различной конфигурации. Изучены процессы волнообразования и вихреобразования на границе шлак-металл в кристаллизаторе слябовых МНЛЗ. На основе результатов математических расчетов сформулированы основные принципы работы с переменным уровнем при различной ширине кристаллизатора слябовой МНЛЗ.

Ключевые слова: кристаллизатор, моделирование, шлак-металл, слябовые МНЛЗ.

Представлено результати фізичного моделювання роботи занурених стаканів різної конфігурації. Вивчено процеси хвилеутворення й вихроутворення на кордоні шлак-метал у кристалізаторі слябових МБЛЗ. На основі результатів математичних розрахунків сформульовані основні принципи роботи зі змінним рівнем при різній ширині кристалізатора слябової МБЛЗ.

Ключові слова: кристалізатор, моделювання, шлак-метал, слябові МБЛЗ.

Results of physical modelling of work SEN of a various configuration are presented. Processes of wave formation and vortex formation on border slag-metal in a mould slab CCM are studied. On the basis of results of mathematical calculations main principles of work with variable level are formulated at various width of a mould slab CCM.

Keywords: mold, modeling, slag-metal, slab CCM.

Современные тенденции в области процессов производства и разливки стали представляют собой совокупность инновационных решений в области повышения удельной производительности агрегатов и улучшения качества получаемой непрерывнолитой заготовки. Основным конструктивным элементом, определяющим качество сляба, является кристаллизатор, в котором происходит перемешивание металла, образование твердой фазы и ее охлаждение. Конструкция погружного стакана и его положение в кристаллизаторе коренным образом может изменить характер распределения потоков в жидкой ванне. В промышленных условиях вывод из эксплуатации корундографитовых погружных стаканов достаточно часто обуславливается эрозионным износом огнеупора в зоне шлакового пояса. Эксплуатационный ресурс погружного стакана можно повысить, изменяя глубину его погружения в кристаллизаторе. Еще одним важным параметром, определяющим процесс литья, является также ширина сляба, которая изменяется, исходя из за-

казов потребителей, и существенно влияет на характер распределения потоков в кристаллизаторе. При этом большое значение приобретают процессы волнообразования и вихреобразования на зеркале металла. Соответственно, проблематика оптимизации параметров литья и конструкции погружных стаканов при разливке на МНЛЗ слябов высокого качества представляется актуальной и имеет важное значение для промышленности [1-5].

Основной целью данных исследований является изучение характерных особенностей развития турбулентных потоков, а также влияние на их возможные траектории ширины сляба и глубины расположения погружного стакана в кристаллизаторе слябовых МНЛЗ. Это позволит сформулировать основные принципы оптимизации работы кристаллизатора слябовой МНЛЗ с изменением положения погружного стакана в жидкой ванне.

Для решения проблем, обозначенных выше, целесообразно проводить комплексные исследования, объединяющие как физическое моделирование на холодных (водных) моделях, так и математическое моделирование.

Поскольку конвективные потоки, формирующиеся в кристаллизаторе МНЛЗ, в основном регулируются воздействующими на них инерционными и гравитационными силами, то оптимизацию технологических параметров литья и изучение особенностей истечения стали из погружных стаканов различных конструкций целесообразно выполнять с привлечением методов физического моделирования. Этот подход позволяет исследовать сложные, высокоскоростные технологические операции в многофазных системах, процессы перетекания металла из промежуточного ковша в кристаллизатор при наименьших затратах временных, капитальных и трудовых ресурсов.

С использованием теории подобия были определены основные параметры разливки, которые оказывают существенное влияние на процессы, происходящие в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ. Принимая во внимание положение, что жидкая ванна кристаллизатора МНЛЗ перемешивается с разной степенью интенсивности в различных зонах, наименее значащим критерием для поставленных задач моделирования является критерий Рейнольдса. Это объясняется тем, что сильно турбулированная область течения жидкости в кристаллизаторе, характерная для описания подобия процессов по критерию Рейнольдса, наблюдается лишь в зоне выхода струи из отверстий погружного стакана [6-9].

Система критериев подобия, полученная в результате оптимизации имеет следующий вид:

- $\left(\frac{X}{d_{ст}} \right)$ – выражает необходимость геометрического подобия модели и натурного объекта;

- $\left(\frac{V_{стп}}{V_{п}} \right)$ – выражает необходимость подобия скоростей потоков в модели кристаллизатора и самом кристаллизаторе;

- $\left(\frac{\sigma}{\rho V_{п}^2 d} \right)$ – критерий, обратный критерию Вебера, который представляет собой отношение сил инерции к силам поверхностного натяжения;

- $\left(\frac{d_{ст} g}{V_{п}^2} \right)$ – критерий, обратный критерию Фруда, физически он характеризует

влияние силы земного тяготения на процесс перетекания металла из промковша в кристаллизатор,

где $V_{п}$ – скорость потоков в кристаллизаторе; $V_{стп}$ – скорость поступления струи из

промежуточного ковша; $d_{ст}$ – диаметра струи металла, принятый равным диаметру стакана-дозатора; X – характерный геометрический размер кристаллизатора; g – ускорение силы тяжести; σ – поверхностное натяжение; ρ – плотность жидкости.

При выборе геометрического масштаба модели кристаллизатора исходили из условий $Fr = \text{item}$ и $We = \text{item}$. Для визуализации наблюдения жидкостных потоков стенки модели кристаллизатора, промковша и погружных стаканов были выполнены из светопрозрачного материала – органического стекла. Геометрический масштаб модели был принят 1:2 к выбранному натурному объекту – вертикальному кристаллизатору слябовой МНЛЗ. Такой масштаб оказывается достаточным для визуального наблюдения за всеми гидродинамическими процессами, протекающими в кристаллизаторе, в режиме реального времени и является оптимальным, исходя из трудоемкости и длительности исследований. С целью исключения эффекта «несимметричности» при истечении жидкости из погружного стакана на прозрачной модели было выполнено одно выпускное отверстие. Для моделирования выбраны две конструкции погружных стаканов: с «ловушкой» и «рассекателем», отличающиеся конструкцией его донной части.

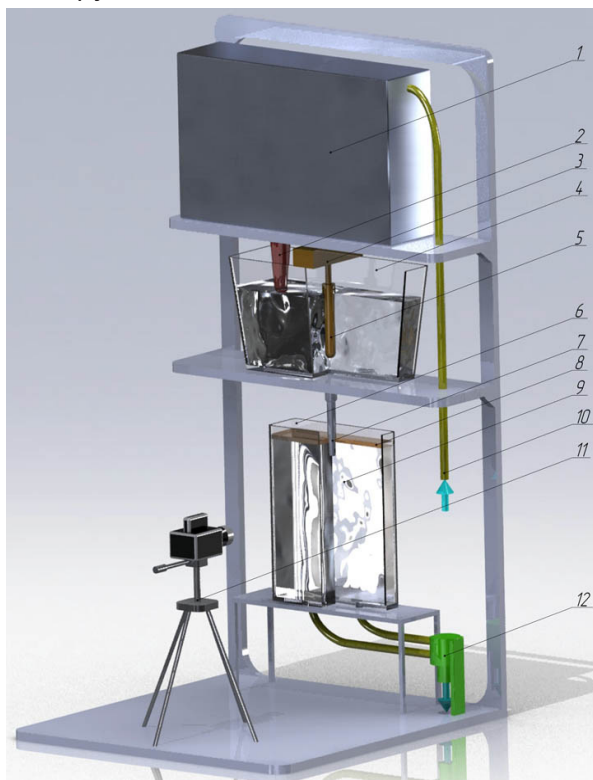


Рис. 1. Схема лабораторной установки для изучения гидродинамики потоков в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ: 1 – сталеразливочный ковш; 2 – защитная труба; 3 – электродвигатель; 4 – промежуточный ковш; 5 – стопор; 6 – кристаллизатор; 7 – погружной стакан; 8 – силиконовое масло; 9 – рабочая жидкость; 10 – система подачи воды; 11 – видеокамера; 12 – система отвода воды

Лабораторная установка включает в себя резервуар, размещенный на 4-х колоннах на 4-метровой высоте с целью обеспечения гидростатического давления, системы подачи и отвода рабочей жидкости, моделей промковша, кристаллизатора, погружного стакана и стопора, приводимого в движение электрическим двигателем, а также защитной трубы (рис. 1). В качестве рабочей жидкости, моделирующей жидкую сталь, использовалась вода при температуре 18-25 °С, так как значения вязкости воды и стали в области температур внепечной обработки и разливки достаточно близки друг к другу. Циркуляция воды в модельной системе обеспечивалась насосом. Движение потоков жидкости, вызванных ее перемещением от выходных отверстий погружного стакана, попадающей из промежуточного ковша, фиксировалось с помощью цифровой видеокамеры, а также путем подкрашивания локальных объемов воды цветными чернилами. Имитация покровного шлака на поверхности металла в кристаллизаторе осуществлялась с помощью силиконового и трансформаторного масел, которые имеют высокое поверхностное на-

тяжение и существенно изменяют вязкость при изменении температуры.

В результате выполненных наблюдений установили, что при истечении струи жидкости из погружного стакана с «ловушкой» в жидкую ванну турбулентный поток при соприкосновении с узкой стенкой кристаллизатора делится на два циркуляционных потока, которые практически равны по интенсивности рас-

Новые методы и прогрессивные технологии литья

пределения (рис. 2, а). В результате наблюдается интенсивное перемешивание в зоне погружения стакана, что стимулирует возникновение стоячих волн в области мениска. При этом восходящий турбулентный поток, отразившись от стенки кристаллизатора, продолжает движение непосредственно под зеркалом жидкой фазы и вовлекает в перемешивание жидкую шлакообразующую смесь.

Динамика истечения струи металла из погружного стакана с «рассекателем» в ходе экспериментальных исследований показала более стабильное влияние на систему в целом (рис. 2, б). Турбулентный поток на промежутке от выпускного отверстия до узкой стенки кристаллизатора носит более направленный компактный характер, что обусловлено наличием «рассекателя». Интенсивность волнообразования для данного типа погружного стакана намного меньше, чем для стакана с «ловушкой». В зоне выхода струи из стакана обеспечивается стабильное перемешивание, при этом захват неметаллических включений и ШОС оказываются минимальными.

В целом разработанная в настоящей работе физическая модель позволяет визуально идентифицировать процессы перемешивания жидкости в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ и выполнять некоторые качественные оценки развития конвективных потоков в зависимости от положения погружного стакана и его конструкции.

С целью выполнения количественных оценок наблюдаемых процессов, а также в силу невозможности оперативного изменения отдельных рабочих параметров на физической модели, в данной работе разработана математическая модель с использованием прикладного пакета Ansys, реализующего метод конечных элементов в рамках модуля Flotran. Для описания жидкостной среды использовались три методики: определения изменяющейся плотности в квазиоднофазной или однофазной системе; двухфазный подход Эйлера; двухфазный подход Лагранжа-Эйлера [8-9].

В модели приняты следующие допущения: влияние конусности кристаллизатора и его возвратно-поступательного движения не учитывалось; влиянием расположенной на зеркале шлакообразующей смеси пренебрегали; картина течений жидкости принималась симметричной относительно вертикальной оси, что позволило использовать в расчетах четвертую часть кристаллизатора.

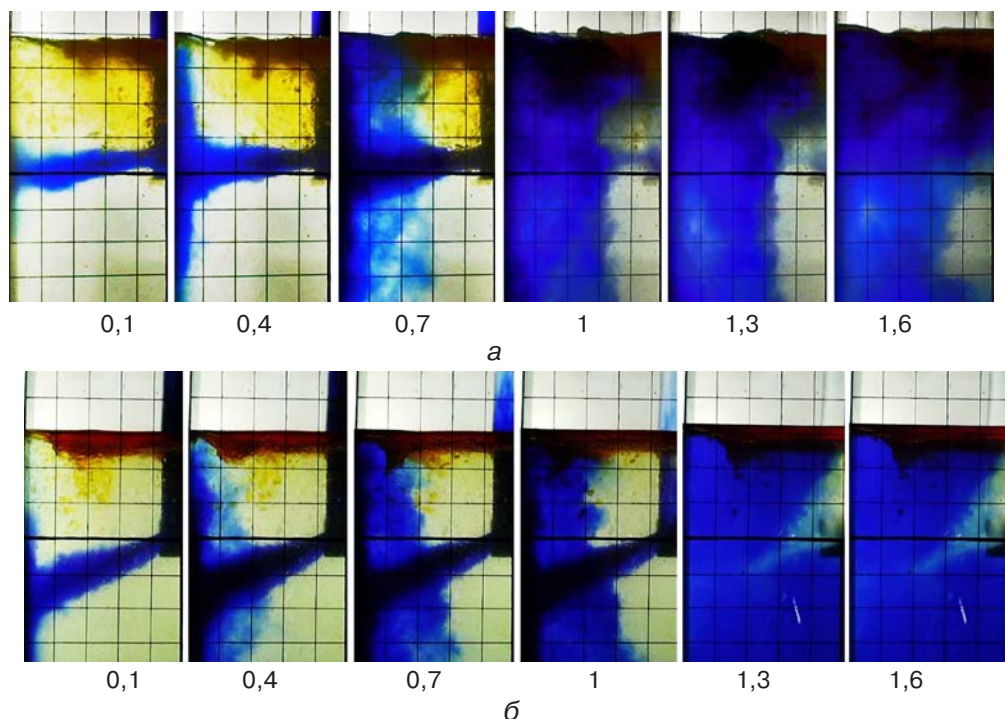


Рис. 2. Кинограмма распределения свободной струи при использовании стакана с «ловушкой» (а) и «рассекателем» (б), с

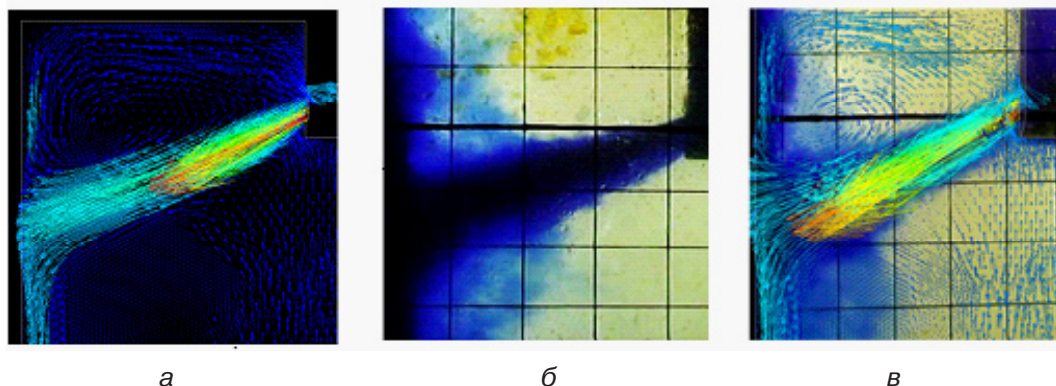
В качестве расчетной области при создании геометрической модели был принят внутренний объем погружного стакана и кристаллизатора, занимаемый жидкой сталью. После этого в модуле Flotran был выбран тип конечных элементов 3D FLOTTRAN 142, применяемый в трехмерной постановке задачи. Генерация конечно-элементной сетки проводилась следующим образом: для каждой линии, образующей расчетную область, в ручном режиме задавалось количество делений, соответствующий числу элементов; в отдельных случаях использовалось произвольное разбиение на конечные элементы. В результате этого была сформирована конечно-элементная модель расчетной области, содержащая более 500 тыс. узлов. Расчеты выполнялись в постановке термической, нестационарной задачи для несжимаемой жидкости с турбулентным течением. Количество итераций, используемых при решении системы уравнений, принималось равным 90.

Течение жидкой стали в кристаллизаторе рассматривалось как пространственный установившийся поток. В качестве нагрузок и граничных условий для данной задачи гидродинамики выступили: скорости движения потоков (м/с); температура металла (К); тепловые потоки (Вт/м²); коэффициенты конвективной теплоотдачи (передачи) (Вт/м²); давление (Па) и др. Для каждого из рассчитываемых параметров задавались методы решения системы уравнений и погрешность для поиска их сходимости. После чего автоматически выполнялось решение систем уравнений для каждого временного шага.

Для всей области вычислений применяли следующие граничные условия: скорость потока на входе в канал погружного стакана задается соответственно массовому расходу металла на выходе из кристаллизатора; на выходе из отверстий погружного стакана массовый расход соответствовал расходу его на входе; давление в погружном стакане принималось постоянным; в вертикальной плоскости симметрии узкой и широкой стенок кристаллизатора приняты нулевым нормальный градиент всех переменных, кроме скорости, перпендикулярной поверхности, которая принималась равной нулю.

Результатами расчета являлись значения векторов скорости и суммарной скорости потоков, температуры, теплового потока в каждой узловой точке расчетной области для каждого временного шага, представленные в виде векторных или контурных диаграмм. На рис. 3 приведено сравнение расчетных полей перемещения жидкости в кристаллизаторе с данными физического моделирования. Выполненное с привлечением дополнительного пакета графических редакторов наложение изображения, полученного компьютерным моделированием, на аналогичную картину, снятую при проведении опытов методами физического моделирования, позволяет говорить о хорошем соответствии полученных данных.

Математическое моделирование в целом позволяет расширить качественные и количественные оценки, что дает возможность найти рациональное положение



Риск. 3. Результирующие картины распределения потоков: а – математическое моделирование; б – физическое моделирование; в – совмещенная модель

погружного стакана в жидкой ванне кристаллизатора. Так, модель позволяет выполнить оптимизацию конструкции погружного стакана в части его глубины погружения, угла наклона и сечения выходных отверстий. Общая оценка результатов математического моделирования для 16-ти случаев (глубина погружения стакана составляет 110, 160, 210, 260 мм, ширина сляба – 1100, 1300, 1500, 1700 мм) представлена на рис. 4.

Установлено, что при фиксированной ширине кристаллизатора с увеличением глубины погружения разливочного стакана с 160 до 260 мм зоны турбулентности смещаются в более глубокие области жидкой ванны и их влияние на подповерхностные

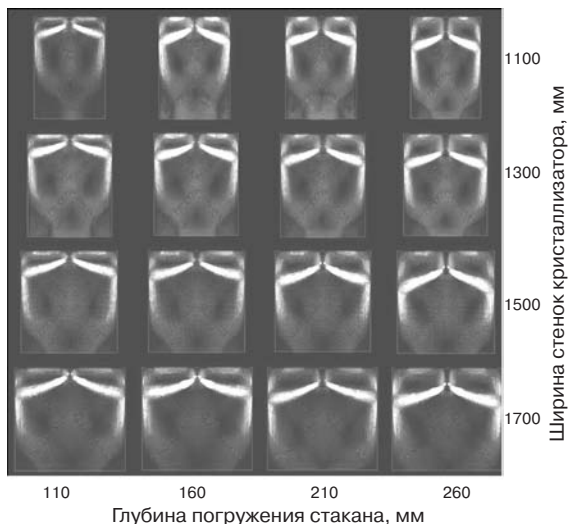


Рис. 4. Вектора скоростей в объеме кристаллизатора при различной глубине погружения и ширине

слои жидкости минимизируется. При этом зона циркуляционных потоков в верхней части кристаллизатора увеличивается, а траектория движения соответственно удлиняется. В то же время при глубине погружения стакана менее 160 мм достаточно большая часть потоков направляется непосредственно вверх, где при определенных условиях способствует формированию дополнительных вихревых течений в углах кристаллизатора и развитию волн на зеркале металла. Наиболее гармоничное отношение восходящих и нисходящих потоков, по нашим оценкам, устанавливается при погружении стакана на глубину 210 мм.

Между тем, зона направленной циркуляции в центре кристаллизатора (ниже погружного стакана) для каждой фиксированной ширины сляба несколько уменьшается с увеличением глубины погружения разливочного стакана. Это объясняется характером столкновения циркуляционных потоков, которые формируются при истечении из левого и правого отверстий. При этом зоны циркуляционных потоков в областях, прилегающих к верхним углам жидкой ванны кристаллизатора, несколько увеличиваются по площади, но приобретают более стабильный характер движения. На наш взгляд, это объясняется расширением области восходящих циркуляционных потоков.

По мере увеличения ширины сляба наблюдается рост величины скорости истечения металла из выходных отверстий погружного стакана, что обуславливает повышение значений скорости движения в верхних циркуляционных потоках. Так, для потоков, движущихся вдоль стенки кристаллизатора вверх, расчетная скорость восходящего потока для ширины 1100 мм составила 0,95-1,12 м/с, а для ширины 1500 мм – 1,18-1,40 м/с. Следовательно, при увеличении ширины сляба воздействие восходящих потоков на подповерхностные слои металла возрастает, что может служить дополнительной причиной развития волн на поверхности металла в кристаллизаторе.

Для количественной оценки состояния жидкости в подповерхностных слоях проведено сравнение скорости движения горизонтальных потоков у зеркала жидкой ванны. Показано, что при высоких скоростях перемещения горизонтальных потоков могут происходить турбулентные волнения, распространяющиеся на поверхность, что приведет к захвату потоками металла определенного количества шлаковых включений. В то же время подповерхностные слои металла должны участвовать в

Новые методы и прогрессивные технологии литья

перемешивании, поскольку в этом случае достигается усреднение стали по температуре, то есть происходит так называемый «подогрев» верхних слоев. Немаловажным фактором отсутствия достаточного перемешивания подповерхностных слоев являются также высокая вероятность переохлаждения зеркала металла и появление твердых участков, которые впоследствии могут являться источниками дефектов при прокатке. Следует отметить, что для сталей с низким и сверхнизким содержанием углерода вероятность появления твердой фазы на зеркале металла возрастает.

Для упрощения расчетной схемы в настоящем исследовании было принято, что граница зеркала металла в процессе разлива не деформируется, то есть выступает как «жесткая» неподвижная стенка, поверхность которой имеет скорость движения 0. Это позволило сформулировать задачу идентификации тех слоев жидкости, в которых скорость перемещения потоков достигает максимума. Для этого, начиная от свободной поверхности (с координатой $z = 0$ мм), было выделено несколько горизонтальных плоскостей в направлении оси z с шагом 2 мм. Далее, используя метод интерполяции, были рассчитаны максимальные значения скорости для каждой выбранной плоскости.

Сравнение характерных результатов выполненных расчетов, приведенное в табл. 1, показывает, что максимальная скорость потоков расплава наблюдается уже на глубине 6-10 мм под свободной поверхностью. Такая глубина расположения быстро движущихся потоков фактически соизмерима с вертикальными волновыми движениями поверхности металла. Можно предположить, что при достаточно сильном развитии волновых процессов шлаковые включения будут вовлекаться в глубь металлической ванны. Дополнительно следует отметить, что абсолютные значения скоростей горизонтальных потоков при прочих равных условиях возрастают при уменьшении ширины сляба.

Таблица 1. Максимальные скорости перемещения потоков (м/с) в разных горизонтальных плоскостях под свободной поверхностью металла при глубине погружения разливочного стакана 210 мм

Ширина кристаллизатора, мм	Глубина под свободной поверхностью, мм						
	2	4	6	8	10	12	14
1100	0,6852	0,1331	0,1743	0,1752	0,1759	0,1752	0,1741
1300	0,0733	0,1526	0,1901	0,1910	0,1917	0,1913	0,1909
1500	0,0854	0,1911	0,2264	0,2284	0,2296	0,2292	0,2287
1700	0,0999	0,2187	0,2576	0,2588	0,2594	0,2592	0,2589

Влияние глубины погружения разливочного стакана на развитие горизонтальных потоков (табл. 2) проявляется вполне объяснимо – по мере увеличения глубины погружения величина значений скорости горизонтальных потоков уменьшается.

Таблица 2. Максимальные скорости перемещения потоков (м/с) в разных плоскостях под свободной поверхностью металла при ширине кристаллизатора 1500 мм

Глубина погружения стакана, мм	Глубина под свободной поверхностью, мм						
	2	4	6	8	10	12	14
110	0,0986	0,2298	0,2702	0,2719	0,2726	0,2723	0,2718
160	0,0978	0,2174	0,2524	0,2531	0,2543	0,2535	0,2530
210	0,0854	0,1911	0,2264	0,2284	0,2296	0,2292	0,2287
260	0,0741	0,1532	0,1918	0,1926	0,1956	0,1951	0,1946

Таким образом установлено, что при прочих равных условиях повышение скорости перемещения горизонтальных потоков металла наблюдается при увеличении

ширины кристаллизатора и уменьшении глубины погружения разливочного стакана. Наиболее гармоничное соотношение восходящих и нисходящих потоков в жидкой ванне кристаллизатора (для исследуемых условий), по нашим оценкам, устанавливается при погружении стакана на глубину 210 мм. Что же касается развития горизонтальных потоков в подповерхностных слоях жидкой ванны, то их максимальные значения наблюдаются уже на глубине 6-10 мм, что требует учета их влияния на возможность захвата неметаллических включений из шлакового слоя.

Установленные закономерности позволяют рассматривать глубину погружения разливочного стакана в качестве управляющего элемента с точки зрения предотвращения загрязнения стали шлаковыми включениями. Применительно к промышленным условиям работы кристаллизатора слябовой МНЛЗ рациональным диапазоном погружения стакана является глубина погружения 185-210 мм. Это позволяет увеличить эксплуатационную стойкость погружных стаканов путем изменения глубин их погружения в процессе разливки. Представляется целесообразным начинать разливку с меньшей глубины погружения стакана, а затем (по мере износа стенки) увеличивать ее с шагом 25–30 мм.



Список литературы

1. Процессы непрерывной разливки / А. Н. Смирнов, В. Л. Пилюшенко, А. А. Минаев и др. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 536 с.
2. World Survey: Continuous Casting Machines for Steel. – Zurich: Concast Standard, 2001. – P. 216.
3. Cai Ning Measures for high efficiency continuous slab casting - a review // Steel Millenium. – London. – 2002. – P. 120-122.
4. Аксельрод Л. М. Повышение стойкости графитосодержащих погружных стаканов для МНЛЗ // Огнеупоры. – 1996. – № 6. – С. 27-30.
5. Линдорфер Б., Хедль Х., Мервальд К. Технологические модульные узлы для высокоэффективного литья слябов // МРТ. – 1999. – № 3. – С. 32-41.
6. Єронько С. П., Биховських С. В. Фізичне моделювання процесів позапічної обробки та розливання сталі. – Киев: Техніка, 1998. – 136 с.
7. Кутателадзе С. С. Анализ подобия и физические модели. – Новосибирск: Наука, 1986. – 294 с.
8. Szekely J. The Physical and Mathematical Modelling of the Flow Field in the Mold Region of Continuous Casting Systems. Part II. The Mathematical Representation of the Turbulence Flow Field // Metal. Mater. Trans. – 1973. – Vol. 4 (5). – P. 1379-1388.
9. Thomas B. G., Yuan Q., Zhang L. Flow Dynamics and Inclusion Transport in Continuous Casting of Steel // NSF Design, Service, and Manufacturing Grantees and Research Conf. Proc. – 2003, P. 2328-2362.

Поступила 27.04.2010