

Н. И. Тарасевич, И. В. Корниец, И. Н. Тарасевич

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

Влияние интенсивности перемешивания расплава на гидродинамику жидкометаллической ванны в кристаллизаторе МНЛЗ

Методами математического и компьютерного моделирования проведен сравнительный анализ перераспределения гидродинамических потоков расплава в кристаллизаторе МНЛЗ при изменении массовой скорости разлива стали и глубины погружения разливочного стакана с боковыми соплами, расположенными вдоль широкой грани.

Ключевые слова: непрерывная разливка стали, кристаллизатор, разливочный стакан, гидродинамика, массовая скорость

Для металла, который получают в машинах непрерывного литья заготовок, растет. Поэтому вопросы, связанные с повышением качества непрерывного слитка, являются актуальными.

Процессы разлива жидкого металла, поступающего из промежуточного ковша в кристаллизатор машины непрерывного литья, оказывают существенное влияние на удаление неметаллических включений, ликвацию элементов и, как следствие, на процессы затвердевания жидкого металла. Характер гидродинамических потоков жидкого металла в кристаллизаторе тесно связан с технологическими параметрами разлива, геометрией слитка, величиной заглубления погружного стакана, а также скоростью истечения струи из него [1-4].

Проведенные исследования и литературные данные [5-8] показали, что струя жидкого металла, вытекающая из выходного отверстия разливочного стакана, движется к стенке кристаллизатора, где распадается на два контура циркуляции – верхний и нижний. Верхний контур представляет собой восходящий поток расплава, который способствует всплыванию неметаллических включений на поверхность ванны жидкого металла. Нижний контур более вытянутый по высоте слитка и его движение у изотермы ликвидус направлено вниз, а в центральной части образует восходящий поток расплава.

При непрерывной разливке стали через погружные стаканы перемещение жидкого металла обусловлено двумя составляющими скорости: скоростью струи металла, поступающего из погружного стакана в кристаллизатор, и скоростью тепловой конвекции, вызванная градиентом температур в металлической ванне, а также выделением газов в процессе кристаллизации и пр. [14, 15].

Методами математического моделирования и вычислительного эксперимента с применением пакета LVM Flow [12, 13] провели сравнительный анализ распределения гидродинамических потоков расплава в кристаллизаторе при разных массовой скорости разлива стали и глубине погружения разливочного стакана с боковыми соплами, расположенными

вдоль широкой грани. Для этого выполнили трехмерное моделирование процесса заливки стали в кристаллизатор МНЛЗ. С целью исследования гидродинамики движения расплава в кристаллизаторе выбрали центральное сечение вдоль широкой грани. При получении заготовки сечением 300×1850 мм рассмотрели 3 варианта изменения массовой скорости разлива металла (50, 100, 200 кг/с) с заглублением погружного стакана в расплав на 250, 500, 650 мм. Диаметр сопел и конструкция погружного стакана во всех вариантах не изменялись. Скорость вытягивания заготовки из кристаллизатора при этом составляла 0,8 м/мин.

На рис. I-III представлены векторные поля скоростей движения жидкого металла в центральном сечении кристаллизатора при разной массовой скорости разлива стали и заглублении погружного стакана в металл на 250 мм.

Видно, что скорость металла на выходе из сопел погружного стакана зависит от объема стали, поступающей в кристаллизатор. Так, при массовом расходе стали до 100 кг/с скорость металла на выходе из сопла составляла 0,2 м/с (рис. I, а, б), а при 200 кг/с – 0,68 м/с (рис. I, в). Увеличение скорости течения стали из погружного стакана повышает интенсивность циркуляции верхнего потока жидкого металла. Зона интенсивного движения расплава при этом также увеличивается как по горизонтали, так и по вертикали – от 150-200 до 450 мм для скоростей 50 кг/с и 200 кг/с соответственно. Скорость движения металла в центре образующихся вихрей не превышает при этом 0,1 м/с.

При массовой скорости разлива стали 50 кг/с циркуляционный поток формируется у боковой поверхности погружного стакана. Протяженность этого потока составляет 0,5 расстояния до узкой грани кристаллизатора, где он объединяется с восходящим потоком. По мере повышения расхода поступающей в кристаллизатор стали наблюдается увеличение первичного циркуляционного вихря, который перемещает восходящие потоки расплава к стенке кристаллизатора. Такое усиление интенсивности циркуляции

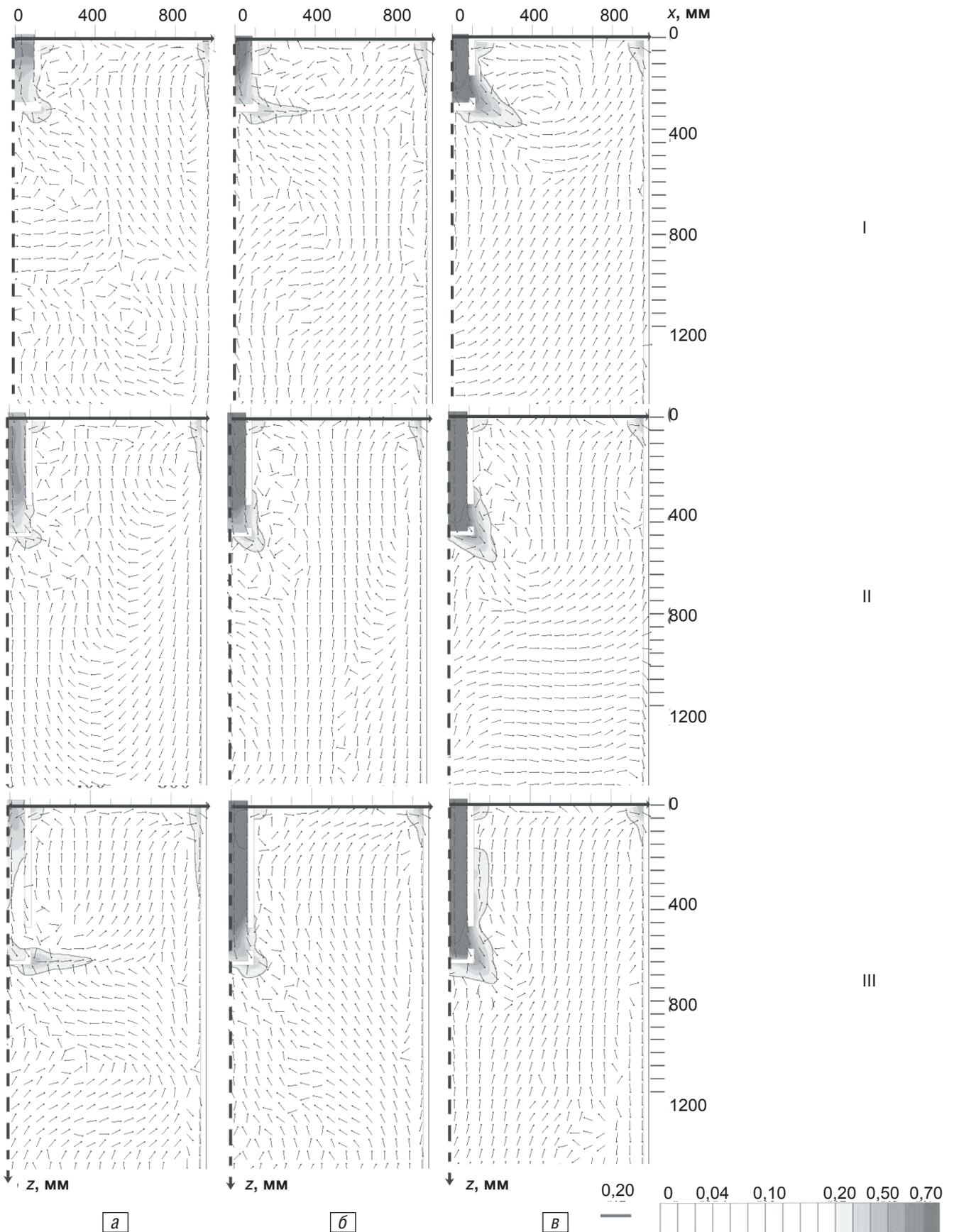


Рис. Поля скоростей движения металла в центральном сечении кристаллизатора по широкой грани слитка при заглублении погружного стакана в расплав на 250 (I), 500 (II), 650 (III) мм. Массовая скорость разливки стали, кг/с: 50 (а); 100 (б); 200 (в)

расплава вблизи зеркала жидкометаллической ванны может привести к захватыванию шлака с поверхности и замешиванию его внутрь затвердевающего металла и, как следствие, к ухудшению качества слитка.

При малом расходе подачи стали в кристаллизатор (рис. I, а) практически отсутствует реакционная зона затопленной струи в расплаве, который перемещается со скоростью 0,2 м/с. С повышением скорости разливки металла до 100 кг/с (рис. I, б)

реакционная зона затопленной струи увеличивается и ее длина достигает 200 мм при ширине 50 мм. При скорости разливки стали 200 кг/с (рис. 1, в) наблюдается увеличение области высоких скоростей ($> 0,2$ м/с) движения расплава к свободной поверхности вдоль стенки погружного стакана.

Скорость нижних циркуляционных потоков металла находится в пределах 0,03-0,07 м/с, а в прилегающих к поверхности кристаллизатора слоях она достигает 0,1 м/с.

В процессе заглабления погружного стакана до 500 мм (рис. 11) на выходе из сопла скорость металла составляет 0,19; 0,32 и 0,52 м/с при массовых скоростях разливки стали 50, 100 и 200 кг/с соответственно. Между стенкой кристаллизатора и погружным стаканом при минимальной скорости разливки металла 50 кг/с в кристаллизаторе образуются две зоны его турбулентности. Первая зона находится у стенок погружного стакана, где скорость перемещения расплава составляет $\approx 0,16$ м/с, вторая – у поверхности кристаллизатора, где скорость движения металла $\approx 0,25$ м/с. В нижней части кристаллизатора вблизи его стенок скорость движения металла уменьшается до 0,1 м/с, а в центре – до 0,07. При скорости разливки стали 50 кг/с (рис. 11, а) в жидкометаллической ванне кристаллизатора расплав перемещается с относительно низкими скоростями. Увеличение массового расхода стали, поступающей в кристаллизатор (рис. 11, б, в), приводит к выравниванию скоростей движения расплава.

При дальнейшем увеличении заглабления погружного стакана (рис. 111) в нижней части кристаллизатора у его боковой поверхности образуются турбулентные зоны движения расплава. В центральной части кристаллизатора скорость восходящих потоков 0,03-0,05 м/с. В результате этого области металла ниже погружного стакана интенсивно перемешиваются, что способствует снижению температурной и химической неоднородности жидкой стали. У зеркала жидкометаллической ванны скорость движения металла составляет $\approx 0,35$ м/с и не зависит от массовой скорости разливки.

С увеличением заглабления погружного стакана зоны турбулизации металла смещаются вглубь кри-

сталлизатора, что уменьшает интенсивность перемешивания стали на поверхности ванны.

Обобщив полученные результаты методами регрессионного анализа, определили изменение скорости движения металла на выходе из сопла при разных скоростях разливки стали и заглаблении погружного стакана в металл в виде

$$\begin{cases} w = -0,00032048H + 0,332587, & v = 50 \text{ кг/с;} \\ w = -0,00039184H + 0,532586, & v = 100 \text{ кг/с;} \\ w = -0,00077755H + 0,972857, & v = 200 \text{ кг/с,} \end{cases} \quad (1)$$

где w – скорость движения расплава на выходе из сопла, м/с; H – заглабление погружного стакана в жидкий металл, мм; v – массовая скорость разливки жидкой стали в кристаллизатор, кг/с.

Система уравнений (1) может быть преобразована к виду

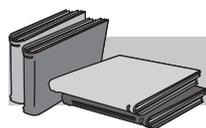
$$w = 0,00428571v - 0,0001275H - 0,00000316Hv + 0,112857. \quad (2)$$

Уравнение (2) справедливо при заглаблении погружного стакана (H) в расплав на 250-650 мм и массовой скорости разливки стали (v) 50-200 кг/с и может быть использовано при анализе технологических режимов непрерывной разливки стали.

Таким образом, представленные результаты исследований свидетельствуют о том, что в верхней части кристаллизатора вдоль узкой грани сохраняется зона локального вихря, скорость движения расплава в которой более 0,2 м/с. Наличие такого вихревого движения металла может привести к эрозии и преждевременному износу этой части кристаллизатора.

Увеличение заглабления погружного стакана приводит к локализации интенсивного движения расплава у его торца и снижению скоростей циркуляционных потоков в верхней части кристаллизатора, что, в свою очередь, обеспечивает температурную и химическую однородность стали при затвердевании.

Изменение массовой скорости разливки жидкого металла (от 50 до 200 кг/с) приводит к росту скорости на выходе из сопла погружного стакана до 0,7 м/с и, как следствие, к перегреву корки затвердевшего металла у стенки кристаллизатора и возможному ее подплавлению.



ЛИТЕРАТУРА

- 1 World Survey: Continuous Casting Machines for Steel. – Zurich: Concast Standard, 2001. – 216 p.
- 2 Цифровое моделирование процессов течения и затвердевания металла в МНЛЗ для литья тонких слябов / К. Олер, Х.-Ю. Оденталь, Г. Пфайфер, И. Леманович // Чер. металлы. – 2002. – Август. – С. 22-30.
- 3 Scheller P. R., Spaccarotella A. Development of High Speed Casting in Conventional CC Stainless Steel Slab Production // Proc. 58-th Electric Furnace Conference. – Orlando (USA), 2000. – P. 832-837.
- 4 Тепломассообменные процессы при разливке стали на МНЛЗ / А. П. Огурцов, Ф. В. Недопекин, А. В. Гресс, И. А. Павлюченков // Тепломассообменные процессы финишных операций обработки стали. Кн. 2. – Днепропетровск: Изд-во ДГТУ, 2007. – 301 с.
- 5 Численный анализ структуры течений в затвердевающем расплаве непрерывнолитого слитка / А. Н. Черепанов, В. Н. Попов, В. П. Камшуков, Д. Б. Фойгт // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 2007. – № 10. – С. 41-45.

6. *Мохаддам Б. С., Шелер П.-Р., Волкова Е.* Взаимосвязь между гидродинамическими потоками и температурными полями в кокиле МНЛЗ для разливки слябов // *Металлургическая и горнорудная пром-сть.* – 2006. – № 7. – С. 306-313.
7. *Gupta D., Lahiri A. K.* Water Model Study of the Flow Asymmetry inside a Continuous Slab Casting Mold // *Metallurgical and Materials Transactions B.* – 1996. – V. 27 B. – P. 757-764.
8. *Thomas B. G., Shang L.* Mathematical Modeling of Fluid Flow in Continuous Casting // *ISIJ International.* – 2001. – V. 41, № 10. – P. 1181-1193.
9. <http://lvm.mkmssoft.ru>
10. Сравнительный анализ систем компьютерного моделирования металлургических и литейных процессов / Н. И. Тарасевич, И. В. Корниец, И. Н. Тарасевич, А. В. Дудченко // *Металл и литье Украины.* – 2010. – № 5. – С. 20-26.
11. *Ефимов В. А.* Разливка и кристаллизация стали. – М.: Металлургия, 1976. – 552 с.
12. *Huang X., Thomas B. G., Najjar F. M.* // *Metallurgical Transactions B.* – 1992. – V. 23 B. – P. 339-356.

Анотація

Тарасевич М. І., Корнієць І. В., Тарасевич І. М.

Вплив інтенсивності перемішування розплаву на гідродинаміку рідкометалевої ванни в кристалізаторі МБЛЗ

Методами математичного та комп'ютерного моделювання проведено порівняльний аналіз розподілу гідродинамічних потоків в кристалізаторі МБЛЗ при зміні масової швидкості розливання сталі та глибини занурення розливного стакану з боковими соплами, що розташовані вздовж широкої грані.

Ключові слова

безперервне розливання сталі, кристалізатор, розливний стакан, гідродинаміка, масова швидкість

Summary

Tarasevich N., Korniyets I., Tarasevich I.

Effect of Intensive mixing of the melt on the hydrodynamics of liquid metal into the mold continuous casting machine

There is presented the comparative analysis of the distributing of hydrodynamic flow of the melt in the mould continuous casting machine at the change of mass rate of the casting and depth of submerging of casting glass with the lateral nozzles located along a wide verge by methods of mathematical and computer modeling.

Keywords

continuous casting of steel, mould, casting glass, hydrodynamics, mass flow rate

Поступила 08.11.11

Продолжается подписка журнала на 2012 год

Для того чтобы подписаться на журнал через редакцию, необходимо направить письмо-запрос или факс в адрес редакции. Счет-фактура согласно запросу высылается письмом или по факсу.

Редакция готова предоставить электронную версию журнала.

Стоимость одного журнала – 30 грн.
 Годовая подписка – 360 грн. (для Украины).
 Годовая подписка для зарубежных стран – 90 \$.