

Д. т. н. К. Н. Вдовин, Василий В. Точилкин, Е. А. Мельничук,
Д. т. н. Виктор В. Точилкин (✉)

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический
университет им. Г. И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

УДК 666.76:[621.746.047:669.18.046.518

ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКАМИ СТАЛИ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОГНЕУПОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СИСТЕМЫ ПОГРУЖАЕМЫЙ СТАКАН – КРИСТАЛЛИЗАТОР МНЛЗ

Разработана конструкция модернизированного погружаемого стакана с рациональной рабочей поверхностью. Новые погружаемые стаканы, устанавливаемые в кристаллизаторах МНЛЗ, позволили уменьшить турбулентность и скорость потоков стали, снизить образование завихрений на уровне мениска. Благодаря этому частицы шлакообразующей смеси покрывают мениск, не втягиваются в сляб. Это обеспечило эффективное формирование потоков стали в кристаллизаторе и создало условия для повышения качества металла.

Ключевые слова: МНЛЗ, промежуточный ковш, кристаллизатор, неметаллические включения (НВ), шлакообразующая смесь (ШОС).

ВВЕДЕНИЕ

Кристаллизатор и огнеупорные изделия — погружаемые стаканы, формирующие потоки жидкого металла в кристаллизаторе, являются важными технологическими элементами МНЛЗ [1, 2]. При разливке стали они влияют на стабильность процесса разливки и, соответственно, качество разливаемого металла [3]. Важным показателем, определяющим качество непрерывной заготовки, является содержание неметаллических включений (НВ) в стали [4]. Существует ряд способов, позволяющих повысить чистоту металла по НВ. Один из них — использование совершенных конструкций погружаемых стаканов для работы с кристаллизатором слябовых МНЛЗ.

Элементы, определяющие прохождение жидкой стали в системе промежуточный ковш – погружаемый стакан – кристаллизатор на слябовой МНЛЗ показаны на рис. 1. Кристаллизатор и погружаемый стакан являются важнейшими компонентами системы [5], где формируется оболочка непрерывнолитой заготовки. В кристаллизаторе жидкая сталь, непрерывно подаваемая из промежуточного ковша через стакан, кристаллизуется по внутренней поверхности, и на выходе из кристаллизатора оболочка из затвердевшего металла образует объем с жидким металлом, внутри которого в направлении от стенок к центру продолжается кристаллизация. Однако форма непрерывнолитой заготовки и ее поперечные размеры уже определены формой и размерами полости кристаллизатора.

Под влиянием различных факторов шлакообразующая смесь (ШОС) с поверхности металла в кристаллизаторе увлекается в жидкую сталь и присутствует в слитке в виде НВ, что ухудшает качество заготовки [2]. На промышленной МНЛЗ исследовать явление захвата НВ жидкой сталью сложно, поэтому многие исследователи провели эксперименты на водяных моделях. Если систематизировать результаты испытаний на водяных моделях [6] и математического моделирования [7], проведенных к настоящему времени, то можно назвать следующие причины вовлечения ШОС в сталь (рис. 2):

- непрерывный захват срезающим действием обратного потока стали в зоне взаимодействия со слоем ШОС;
- нерегулярный захват срезающим действием при резком изменении направления потока;
- вовлечение вихрем Кармана, возникающим в окрестности погружаемого стакана, в результате одностороннего потока стали;

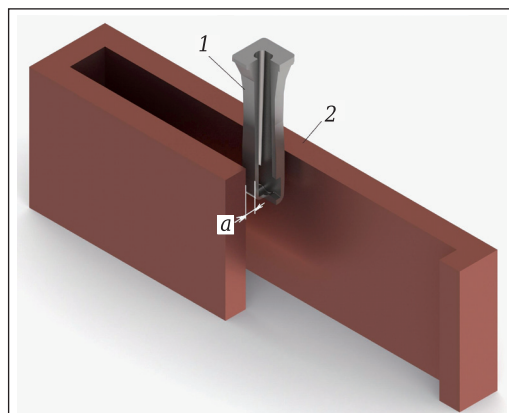


Рис. 1. Компоненки системы погружаемый стакан (1) – кристаллизатор (2); a — зазор, определяющий параметры вихря Кармана



Виктор В. Точилкин
E-mail: toch56@mail.ru

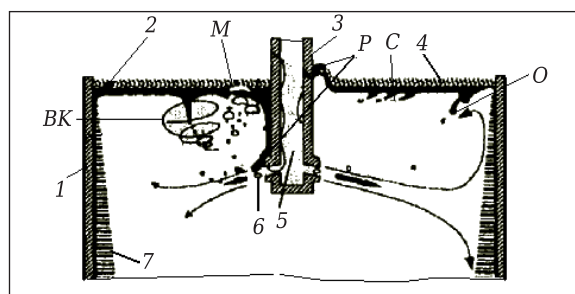


Рис. 2. Схема захвата НВ в кристаллизаторе: 1 — кристаллизатор; 2 — жидкая ШОС; 3 — погружаемый стакан; 4 — ШОС; 5 — металл; 6 — пузырьки газов (аргона); 7 — оболочка слитка; ВК — вихрь Кармана; М — захват ШОС при возмущении межфазной поверхности двух жидкостей пузырьками аргона; Р — захват ШОС при возникновении нестационарного перепада давления вблизи стакана; С — нерегулярный захват внезапным сдвигающим потоком; О — регулярное срезание обратным потоком

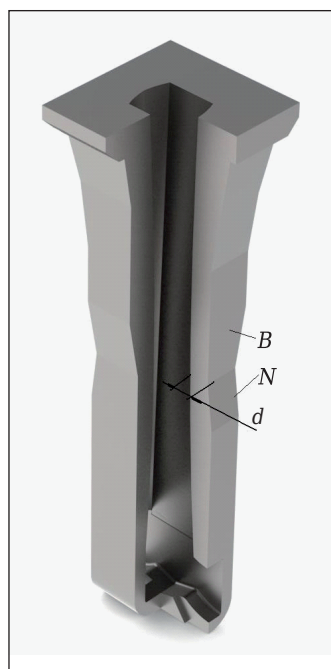


Рис. 3. Модернизированный погружаемый стакан: В, N — верхняя и нижние боковые поверхности стакана и d — минимальная толщина стенки стакана, измененные в процессе модернизации

– вовлечение при разрушении пузырьков аргона, выходящих из отверстий стакана и всплывающих в стали;

– вовлечение вследствие пониженного давления у тыльной стороны погружаемого стакана при обтекании стакана сталью с постоянной скоростью.

С увеличением скорости разливки повышается и скорость потока стали в кристаллизаторе. В связи с этим становятся еще важнее проведение анализа механизма захвата НВ и разработка методов управления потоком стали в кристаллизаторе. Если внезапно образуется односторонний поток, то на стороне погружаемого стакана, где усили-

лось истечение, резко усиливается и обратный приток металла. Вследствие такого нестационарного течения на противоположных сторонах стакана возникает перепад давления гораздо более сильный, чем в условиях нормального истечения. Под влиянием этого перепада ШОС опускается вдоль поверхности стакана. Если ШОС опускается до уровня выходных отверстий стакана, то истекающая струя стали дробит ее и вовлекает в объем металла. Таким механизмом вполне можно объяснить присутствие мелких НВ в слитке. Перепад давления, возникший из-за резкого одностороннего потока стали, служит движущей силой для перемещения ШОС вниз по погружаемому стакану. Анализ движения потоков стали из промежуточного ковша в кристаллизатор показал, что использование погружаемого стакана в виде трубы с фланцем, глухим дном и расположенными диаметрально боковыми выпускными отверстиями, примыкающими ко дну, имеет ряд недостатков. Высокая скорость выпуска жидкой стали через боковые выпускные отверстия приводит к тому, что струи жидкой стали достигают кристаллизатора и разъедают его узкие боковые стенки, что вызывает расплавление корки формирующегося сляба и создает возмущения, которые препятствуют образованию и росту этой корки. Это приводит к появлению дефектов поверхности сляба (трещин, раковин, вмятин), а также включений частиц ШОС.

Для повышения качества слитков за счет существенного снижения циркуляционных потоков жидкого металла в кристаллизаторе и стабилизации условий разливки разработан ряд кристаллизаторов и погружаемых стаканов [8, 9].

Рассмотрена система промежуточный ковш – погружаемый стакан – кристаллизатор одноручевой комбинированной криволинейной слябовой МНЛЗ. Кристаллизатор имеет следующие технические характеристики: базовая ширина 2530 мм, толщина 300 мм, высота 900 мм. Исследование выполняли для двух конструкций погружаемых стаканов. На рис. 3 показаны конструкция погружаемого стакана и параметры, измененные в процессе его модернизации. Основное отличие модернизируемого стакана — уменьшение размеров образующей поверхности, обеспечивающих увеличение рабочего зазора а (см. рис. 1). Разработана модель движения потоков стали в системе промежуточный ковш – погружаемый стакан – кристаллизатор. При ее составлении использованы уравнения Навье – Стокса, неразрывности потока, конвективной диффузии. Соответствующие уравнения имеют вид [3]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{v}, \\ \nabla \vec{v} = 0, \\ \vec{u} \nabla C - D \nabla^2 C = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где \vec{v} — вектор скорости жидкости; \vec{F} — объемные силы; p — давление жидкости; ∇p — градиент дав-

ления; ν — коэффициент кинематической вязкости; $\nabla^2 \vec{v}$ — лапласиан \vec{v} ; ρ — плотность стали; \vec{u} — вектор скорости движения частиц включений; C — концентрация примеси; D — коэффициент диффузии.

Геометрия модели принята в зависимости от конструкции и глубины погружения выбранного стакана и параметров кристаллизатора. Масштаб модели 1:1. При расчете турбулентных течений металла в кристаллизаторе используется $(k - \epsilon)$ -модель турбулентной вязкости [2, 10]. При этом считается, что на основании гипотезы Буссинеска коэффициент вязкости, входящий в уравнения Навье – Стокса, включает молекулярную вязкость μ и турбулентную вязкость μ_t . При составлении математической модели приняты следующие допущения: объем промежуточного ковша [11, 12], из которого подается сталь, изначально заполнен; вязкость стали зависит от ее агрегатного состояния; скорость истечения металла из промежуточного ковша в кристаллизатор постоянна и задана.

Математическое моделирование осуществляли с использованием CAD-системы SolidWorks, пакет Flow Simulation, при начальных и граничных условиях. Начальные условия дополняют уравнения (1): температура металла в промежуточном ковше 1527 °С, скорость вытягивания заготовки 1,0 м/мин, динамическая вязкость стали 0,006 Па·с. Граничные условия учитывают темпе-

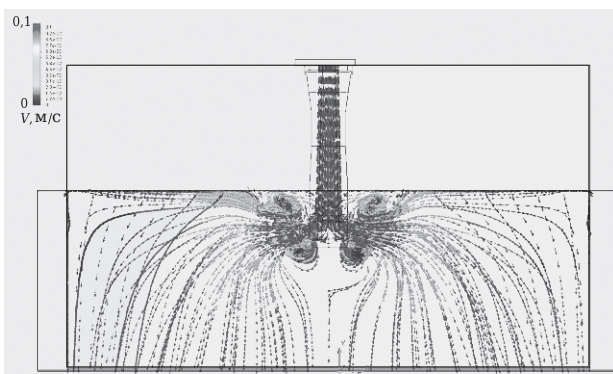


Рис. 4. Траектории движения потоков металла в кристаллизаторе при использовании модернизированного погружаемого стакана

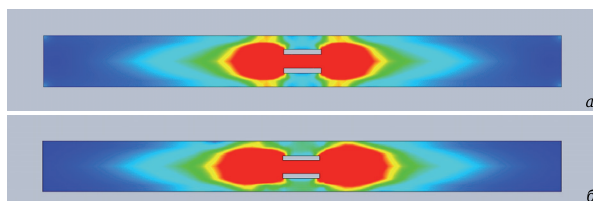


Рис. 5. Скорость движения потоков стали в кристаллизаторе (поперечные разрезы) при использовании существующего погружаемого стакана (а) и модернизированного (б)

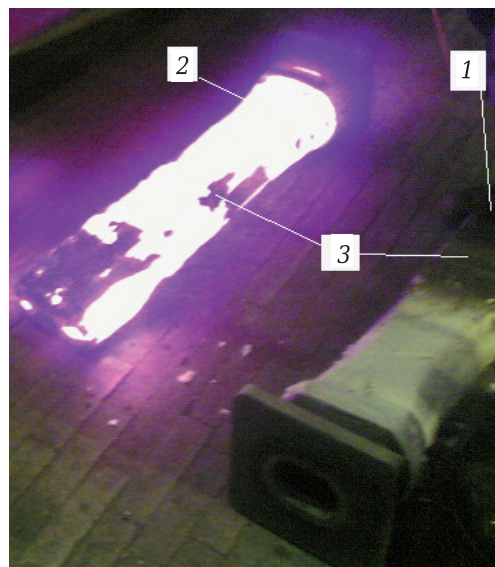


Рис. 6. Погружаемый стакан до (1) и после испытаний (2); 3 — плоскость стакана, измененная в процессе модернизации

ратуру нагрева погружаемого стакана до 930 °С, изменение температуры стенок кристаллизатора от 250 до 150 °С вдоль фронта движения заготовки и температуру ШОС на поверхности зеркала металла в кристаллизаторе 1230 °С.

Анализ изменения траекторий потоков и скоростей стали в кристаллизаторе (рис. 4, 5) свидетельствует о наличии вихревых потоков, направленных к границе раздела сталь – ШОС. Это приводит к захвату составляющих ШОС и последующему снижению качества непрерывнолитой заготовки по содержанию НВ. Модернизированный стакан создает меньшую степень завихрения вблизи границы металл – ШОС. Модернизированный погружаемый стакан после испытаний показан на рис. 6. Стакан отработал полный цикл разливки на слябовой МНЛЗ без замечаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена конструкция модернизированного погружаемого стакана с рациональной рабочей поверхностью для подвода металла в кристаллизатор. Новые погружаемые стаканы позволяют повысить качество слябов за счет уменьшения турбулентности потоков стали и, соответственно, снизить глубину проникновения струй металла в область кристаллизующегося сляба, что обеспечивает благоприятные условия для формирования затвердевающего слитка.

Снижение скорости выпуска жидкой стали через боковые выпускные отверстия стакана приводит к тому, что уменьшается сила столкновения струй жидкой стали при достижении боковых стенок кристаллизатора. Это обеспечивает формирование прочной корки сляба.

Снижается интенсивность циркуляции потоков расплавленной стали, обеспечивая обогрев ШОС без возмущений на уровне мениска кристаллизатора. Уменьшение турбулентности и скорости потоков стали приводит к снижению образования завихрений на уровне мениска, благодаря чему частицы разливочной смеси, покрывающей мениск, не втягиваются в слаб. Это уменьшает число дефектов его поверхности и по-

вышает качество получаемых слитков стали.

Результат проведенных модельных и промышленных исследований и внедрения новых погружаемых стаканов — снижение количества НВ в разливаемом металле на протяжении всего цикла работы системы промежуточный ковш — погружаемый стакан — кристаллизатор и, как следствие, повышение качества разливаемого металла.

Библиографический список

1. **Самойлович, Ю. А.** Влияние конфигурации разливочного стакана на течение расплава в затвердевающем тонком слябе / Ю. А. Самойлович // *Металлург.* — 2009. — № 6. — С. 51–56.
2. **Вдовин, К. Н.** Непрерывная разливка стали. Гидромеханика машин непрерывного литья заготовок : монография / К. Н. Вдовин, В. В. Точилкин, И. М. Ячиков. — Магнитогорск : Изд-во Магнитогор. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2014. — 348 с.
3. **Вдовин, К. Н.** Технологии управления потоками стали и разработка огнеупорных конструкций для промежуточного ковша четырехручьевого МНЛЗ / К. Н. Вдовин, Василий В. Точилкин, Виктор В. Точилкин // *Новые огнеупоры.* — 2016. — № 5. — С. 3–5.
- Vdovin, K. N.** Analysis of operation of a steel-pouring ladle-tundish system for a section CBCM and improved refractory structures for the tundish receiving chamber / K. N. Vdovin, Vasilii V. Tochilkin, Viktor V. Tochilkin // *Refractories and Industrial Ceramics.* — 2016. — Vol. 57, № 3. — P. 221–223.
4. **Вдовин, К. Н.** Анализ работы системы сталеразливочный ковш — промежуточный ковш сортовой МНЛЗ и совершенствование огнеупорных конструкций приемной камеры промежуточного ковша / К. Н. Вдовин, Виктор В. Точилкин, Василий В. Точилкин // *Новые огнеупоры.* — 2016. — № 2. — P. 3–5.
- Vdovin, K. N.** Technologies for controlling flows of steel and the development of refractory structures for the tundish of a four – strand continuous caster / K. N. Vdovin, Viktor V. Tochilkin, Vasilii V. Tochilkin // *Refractories and Industrial Ceramics.* — 2016. — Vol. 57, № 1. — P. 6–8.
5. **Вдовин, К. Н.** Разработка элементов приемной камеры промежуточного ковша слябовой МНЛЗ / К. Н. Вдовин, Е. А. Мельничук, А. В. Нефедов, В. В. Точилкин // *Изв. вузов. Черная металлургия.* — 2014. — № 3. — С. 23–27.
- Vdovin, K. N.** Intake chamber of the tundish in a continuous slab-casting machine / K. N. Vdovin, E. A. Melnichuk, A. V. Nefedov, V. V. Tochilkin // *Steel in Translation.* — 2014. — Vol. 44, № 3. — P. 186–189.
6. **Вдовин, К. Н.** Разработка огнеупорных конструкций для промежуточного ковша сортовой МНЛЗ / К. Н. Вдовин, В. В. Точилкин, И. М. Ячиков // *Новые огнеупоры.* — 2015. — № 11. — С. 3–7.
- Vdovin, K. N.** Designing refractories for the tundish of a continuous caster / K. N. Vdovin, V. V. Tochilkin, I. M. Yachikov // *Refractories and Industrial Ceramics.* — 2016. — Vol. 56, № 6. — P. 569–573.
7. **Зекели, Дж.** Компьютерное конструирование (CAD–
- САМ-метод) промежуточного разливочного устройства / Дж. Зекели, Н. Эль-Кадах // *Инжекционная металлургия'86 : труды конференции ; пер. с англ. под ред. В.А. Кудрина.* — М. : Металлургия, 1990. — С. 134–146.
8. **Вдовин, К. Н.** Создание имитатора рабочей среды для повышения износостойкости огнеупоров при разливке стали на сортовых МНЛЗ / К. Н. Вдовин, О. А. Марочкин, В. В. Точилкин // *Новые огнеупоры.* — 2013. — № 11. — С. 10–13.
- Vdovin, K. N.** Creating a stream simulator to improve the wear resistance of refractories during the casting of steel on continuous section casters / K. N. Vdovin, O. A. Marochkin, V. V. Tochilkin // *Refractories and Industrial Ceramics.* — 2014. — Vol. 54, № 6. — P. 435–437.
9. **Пат. 33526 Российская Федерация.** Устройство для подвода металла в кристаллизатор / Рашников В. Ф., Тахаудинов Р. Ф., Вдовин К. Н., Точилкин В. В., Корнеев В. М., Осипов В. М., Мацко Е. Ю. ; заявл. 07.07.03 ; опубл. 27.10.03, Бюл. № 30.
10. **Вдовин, К. Н.** Совершенствование процесса разливки стали на сортовых МНЛЗ / К. Н. Вдовин, О. А. Марочкин, В. В. Точилкин // *Металлург.* — 2014. — № 4. — С. 80–82.
- Vdovin, K. N.** Improvement of steel pouring in section CBCM / K. N. Vdovin, O. A. Marochkin, V. V. Tochilkin // *Metallurgist.* — 2014. — Vol. 58, № 3/4. — P. 306–309.
11. **Вдовин, К. Н.** Новые вставки из пластичных огнеупоров для защиты струи металла при разливке на МНЛЗ / К. Н. Вдовин, В. В. Точилкин, О. А. Марочкин [и др.] // *Новые огнеупоры.* — 2014. — № 7. — С. 41–43.
- Vdovin, K. N.** New plastic refractory linings for protecting a metal stream during pouring into a CBCM / K. N. Vdovin, V. V. Tochilkin, O. A. Marochkin [et al.] // *Refractories and Industrial Ceramics.* — 2014. — Vol. 55, № 4. — P. 318–320.
12. **Семенов, М. В.** Методика расчета работоспособности элементов промежуточного ковша МНЛЗ / М. В. Семенов, В. В. Точилкин // *Вестник машиностроения.* — 2007. — № 6. — С. 41–43.
- Semenov, M. V.** Technique for calculating the effectiveness of the elements of the intermediate ladle of a CBCM / M. V. Semenov, V. V. Tochilkin // *Russian Engineering Research.* — 2007. — Vol. 27, № 6. — P. 347–349. ■

Получено 28.11.16

© К. Н. Вдовин, Василий В. Точилкин,
Е. А. Мельничук, Виктор В. Точилкин, 2017 г.