Д. т. н. **Виктор В. Точилкин**[1] (✉), к. т. н. **О. А. Филатова**[1], **В. И. Умнов**[2], **Василий В. Точилкин**[1]

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

[2] *ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, Россия*

УДК 621.746.047:669.054.2

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАЗЛИВКИ МЕТАЛЛА И КОНСТРУКЦИИ ОГНЕУПОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ КОВШ – ПОГРУЖАЕМЫЙ СТАКАН – КРИСТАЛЛИЗАТОР СОРТОВОЙ МНЛЗ

Рассмотрено огнеупорное оборудование системы промежуточный ковш (ПК) – погружаемый стакан (ПС) – кристаллизатор сортовых МНЛЗ. Рассмотрены процессы управления потоками металла в представленной системе. Отмечены особенности конструкции элементов сортовой МНЛЗ, которые обеспечивают рациональное прохождение разливаемого металла в системе ПК – ПС – кристаллизатор, эффективное формирование потоков стали в кристаллизаторе и создают условия для повышения качества металла.

Ключевые слова: *МНЛЗ, промежуточный ковш (ПК), математическое моделирование, потоки металла.*

ВВЕДЕНИЕ

Модернизация конструкций [1] и отдельных элементов сортовых МНЛЗ — важная задача современной металлургии, решение которой обеспечивает повышение производительности и качества непрерывнолитой заготовки [2, 3]. Система промежуточный ковш (ПК) – погружаемый стакан (ПС) – кристаллизатор и ее устройства [4, 5], формирующие потоки течения металла в ПК [5, 6] и далее в кристаллизаторе, — важнейшие технологические узлы МНЛЗ [7, 8]. Непрерывная разливка стали осуществляется двумя способами: открытой струей (без защитного ПС) и закрытой струей (с использованием защитного ПС) [9, 10]. Движение потока жидкой стали из ПК в кристаллизатор через ПС закрытой струей показано на рис. 1.

Оборудование разливочного отверстия ПК, ПС и кристаллизатор являются важнейшими компонентами системы [11]. В кристаллизаторе жидкая сталь, непрерывно подаваемая из ПК закрытой струей, 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, но форма непрерывнолитой заготовки и ее поперечные размеры уже определены формой и размерами полости кристаллизатора [9]. Смещение стакана и закрытой струи от центральной продольной оси кристаллизатора влияет на параметры разливки и качество непрерывнолитой заготовки [9].

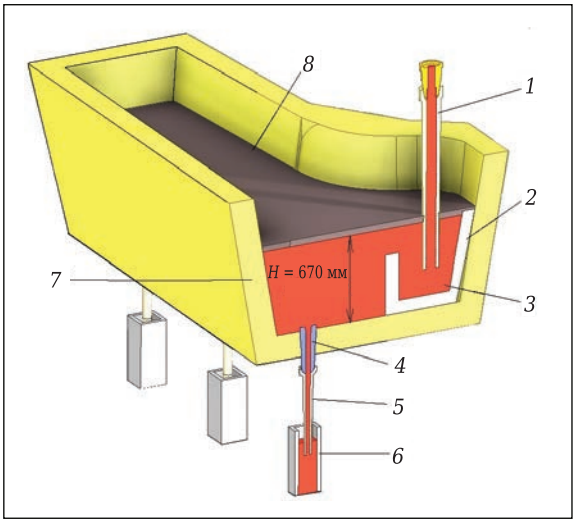

Рис. 1. Компоновка системы ПК – ПС – кристаллизатор сортовой МНЛЗ: *1* — защитная труба сталеразливочного ковша; *2* — металлоприемник; *3* — приемная камера ПК; *4* — стакан ковшевой; *5* — ПС; *6* — кристаллизатор; *7* — ПК; *8* — покровный шлак

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

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

На рис. 2 показано оборудование комплекта погружаемый стакан – кристаллизатор сортовой МНЛЗ [12]. Данный комплект обеспечивает подачу закрытой струи стали в кристаллизатор сортовой МНЛЗ; основные размеры для получения непрерывнолитой заготовки квадратного сечения и технологические параметры приведены ниже [9]:

Размер разливаемой непрерывнолитой заготовки, мм.....150×150
Радиус оси кристаллизатора, мм..... 9000
Высота кристаллизатора, мм..... 900
Высота ПС, мм.....675
Заглубление ПС в жидкий металл, мм.....50–110
Высота ковшевого стакана, мм..... 365
Скорость разливки, м/мин..... 2,8

Важнейшее требование компоновки оборудования ПС и кристаллизатора — обеспечение совпадения осей погружаемого стакана и кристаллизатора (x_i = 0) или работа оборудования ПС – кристаллизатор МНЛЗ со значениями смещений x_i в пределах, допустимых (x_d) технологическими требованиями ($x_i \le x_d$).

Для оценки особенностей процесса разливки в системе ПК – ПС – кристаллизатор при различных смещениях осей отверстия ПС и кристаллизатора x_i проведено математическое моделирование [12, 13]. Средствами пакета твердотельного моделирования [13, 15] была построена модель внутреннего объема металла, перемещающегося через ковшевой стакан разливочного отверстия ПК закрытой струей в верхнюю часть кристаллизатора сортовой МНЛЗ. Модель делилась на конечные элементы в зависимости от сложности конструкции рассчитываемой системы ПК – кристаллизатор [13, 14].

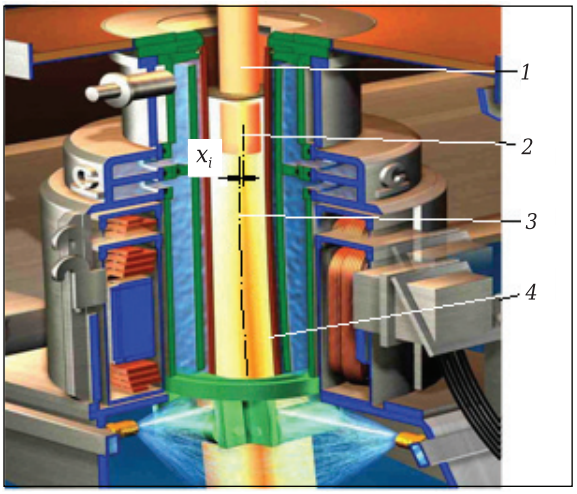

Рис. 2. Комплект оборудования ПС – кристаллизатор сортовой МНЛЗ: *1* — ПС; *2* — ось ПС; *3* — ось кристаллизатора; *4* — кристаллизатор

Модель системы ПК – кристаллизатор для анализа процесса разливки в кристаллизаторе

При составлении модели [13, 15] использованы следующие уравнения: в качестве уравнения, описывающего движение жидкости в области моделирования, принимаем уравнение Навье – Стокса для нестационарных потоков жидкости (жидкого металла), неразрывности потока [2, 12]. Геометрия модели определяется компоновкой оборудования разливочного отверстия ПК и расположением кристаллизатора относительно струи жидкой стали. Масштаб модели составлял 1 : 1. Соответствующие уравнения имеют вид [12]:

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

где $\vec{u}$ — вектор скорости жидкости; $\vec{F}$ — вектор объемных сил; ρ — плотность стали; p — давление жидкости; ∇p — градиент давления; ν — коэффициент кинематической вязкости; $\nabla^2\vec{u}$ — лапласиан $\vec{u}$.

Вектор объемных сил с учетом действующего гравитационного поля Земли определяется в выбранной системе координат как

$$\vec{F} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\rho\cdot g \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где g — ускорение свободного падения.

Допущение о постоянной плотности металла может быть сделано для разливочных устройств системы ПК – кристаллизатор в случаях, когда разница температур жидкости не слишком велика. При расчете турбулентных течений металла в кристаллизаторе используется (k – ε)-модель турбулентной вязкости [12]. При этом считается, что на основании гипотезы Буссинеска коэффициент вязкости, входящий в уравнение Навье – Стокса, включает молекулярную вязкость μ и турбулентную вязкость $\mu_т$.

В математической модели процесса разливки металла были сделаны следующие допущения:

- Считаем, что моделируемый процесс протекает в объеме, ограниченном контуром области моделирования.
- Объем, в котором происходит исследование, изначально заполнен жидкостью.
- Жидкость является вязкой и несжимаемой.
- Моделируется процесс разливки закрытой струей.
- Скорость истечения жидкости из сталеразливочного ковша в ПК постоянна и задана.
- Расход жидкости из ПК в кристаллизаторы равен расходу жидкости из сталеразливочного ковша в ПК.

Математическое моделирование осуществляли с учетом начальных и граничных условий. Начальные условия дополняют уравнения (1): температура металла в ПК 1555 °С, скорость вытягивания заготовки 2,8 м/мин, динамическая вязкость стали 0,006 Па·с.

Расчетная сетка

Каждая модель делилась на конечные элементы. Количество элементов варьировалось в зависимости от смещения осей [13]. Сеточная математическая модель системы ПК – кристаллизатор и отдельных ее элементов показана на рис. 3.

Граничные условия

На входе расчетной области системы (вход защитной трубы сталеразливочного ковша) задается начальная скорость потока металла, для сечения заготовок 150×150 мм скорость будет равна $\vec{u}_0 = 1{,}11$ м/с, где $\vec{u}_0$ — вектор начальной скорости металла на входе в ПК, м/с.

На жидкую сталь, находящуюся вблизи твердых поверхностей (стенок), действует пристеночное прилипание (см. рис. 3):

$$\vec{u} = 0. \quad (3)$$

Данное граничное условие устанавливается на все внутренние стенки ПК (боковые стенки и дно), поверхности ПС, стакана-дозатора и разливочного отверстия.

Вдоль плоскости симметрии, проходящей через ось центрального ручья ПК, задается условие $\vec{n}\cdot\vec{u} = 0$, где $\vec{n}$ — орт, перпендикулярный к свободной поверхности или плоскости симметрии.

На свободной поверхности (зеркало металла в ПК, см. рис. 3) задается условие прилипания:

$$\vec{n}\cdot\vec{u} = 0. \quad (4)$$

На выходе расчетной области целесообразно задавать давление жидкости, как правило, нулевое давление p_0 = 0 Па.

Результаты моделирования потоков металла в системе ПК – кристаллизатор

При описании результатов численного моделирования [11] в качестве параметров течения представлены векторы и поля скоростей в окрестности плоскости симметрии и стенок кристаллизатора. На рис. 4 показаны картины векторов и скоростей потоков металла в продольном сечении кристаллизатора при различных смещениях его осей и струи стали [14, 16]. При отсутствии смещения осей поток металла равномерно перемещается вдоль кристаллизатора, линии тока симметричны относительно его оси. При смещении осей линии тока сдвигаются в противоположную сторону от стенки кристаллизатора, что приводит к возникновению скоростных потоков у стенок и размыву корочки слитка [16]. При больших линейных смещениях значительно увеличивается разность величин скоростей у правой и левой стенок кристаллизатора.

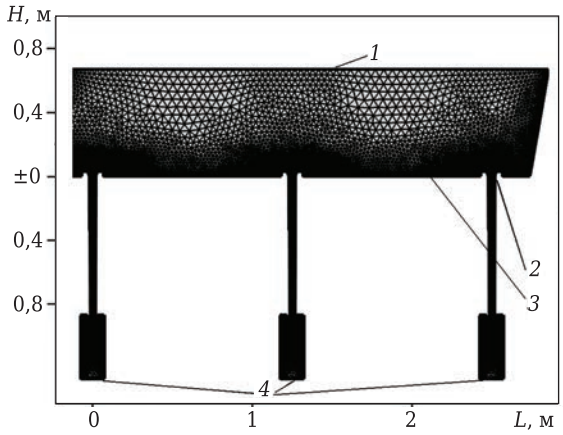

Рис. 3. Сеточная математическая модель системы ПК – ПС – кристаллизатор: *1* — свободная поверхность (зеркало металла в ПК); *2* — область нахождения жидкой стали вблизи твердой поверхности — дна ПК; *3* — область нахождения жидкой стали вблизи твердой поверхности (стенок) — элементов разливочного отверстия; *4* — выход из расчетной области

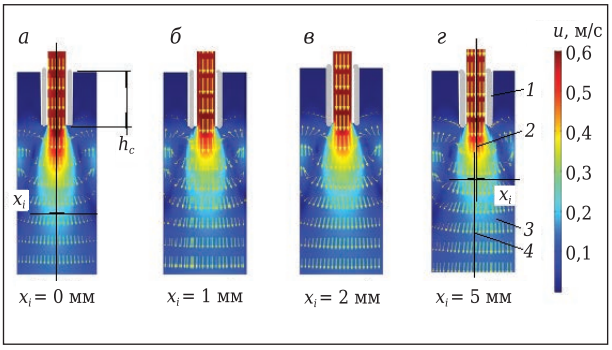

Рис. 4. Векторы и поля скоростей потоков стали при отсутствии смещения осей ПС и кристаллизатора (*а*) и при смещении $x_i > 0$ (*б*, *в*, *г*); h_c — глубина погружения ПС в кристаллизатор; *1* — ПС; *2* — ось ПС; *3* — кристаллизатор; *4* — ось кристаллизатора

При дальнейшей разработке технологии непрерывной разливки стали на сортовых МНЛЗ одним из вариантов усовершенствования элементов системы ПК – ПС – кристаллизатор является создание новых конструкций системы [16], например применение стенда для выставки оборудования ПК на стадии его монтажа. Это обеспечивает установку оборудования разливочного отверстия и затем ПС относительно оси кристаллизатора сортовой МНЛЗ с минимальными смещениями в пределах допустимых значений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрена конструкция системы ПК – ПС – кристаллизатор для подвода металла в кристал-

лизатор с рациональной установкой погружаемого стакана в кристаллизаторе, что позволяет повысить качество сортовой непрерывнолитой заготовки за счет уменьшения турбулентности потоков стали.

2. Уменьшение турбулентности потока стали приводит к снижению скоростей струй жидкой стали у стенок кристаллизатора в области кристаллизующегося слитка, что обеспечивает благоприятные условия для формирования затвердевающей непрерывнолитой сортовой заготовки, имеющей небольшие сечения. Это также обеспечивает формирование прочной корки сортовой заготовки и уменьшает возможность аварийных ситуаций.

Библиографический список

1. ***Точилкин, В. В.*** Модернизация промежуточного ковша МНЛЗ для обеспечения повышения качества разливаемой стали / *В. В. Точилкин* // Ремонт, восстановление, модернизация. — 2007. — № 2. — С. 5–7.

2. ***Вдовин, К. Н.*** Применение пластичных огнеупоров усовершенствованной конструкции для защиты струи металла при разливке на сортовых МНЛЗ / *К. Н. Вдовин, В. В. Точилкин, О. А. Марочкин* // Новые огнеупоры. — 2014. — № 1. — С. 3–5.

3. ***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.] // Refract. Ind. Ceram. — 2014. — Vol. 55, № 4. — P. 318–320.

4. ***Вдовин, К. Н.*** Технологии управления потоками стали и разработка огнеупорных конструкций для промежуточного ковша четырехручьевой МНЛЗ / *К. Н. Вдовин, Василий В. Точилкин, Виктор В. Точилкин* // Новые огнеупоры. — 2016. — № 2. — С. 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, Vasilii V. Tochilkin, Viktor V. Tochilkin* // Refract. Ind. Ceram. — 2016. — Vol. 57, № 1. — P. 6–8.

5. ***Вдовин, К. Н.*** Разработка систем подачи аргона для промежуточного ковша сортовой МНЛЗ / *К. Н. Вдовин, С. Н. Ушаков, О. А. Марочкин, В. В. Точилкин* // Технология металлов. — 2013. — № 6. — С. 38–40.

6. ***Вдовин, К. Н.*** Анализ работы системы сталеразливочный ковш – промежуточный ковш сортовой МНЛЗ и совершенствование огнеупорных конструкций приемной камеры промежуточного ковша / *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* // Refract. Ind. Ceram. — 2016. — Vol. 57, № 3. — P. 221–223.

7. ***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* // Refract. Ind. Ceram. — 2016. — Vol. 56, № 6. — P. 569–573.

8. ***Точилкин, В. В.*** Методика расчета металлоприемника промежуточного ковша МНЛЗ / *В. В. Точилкин* // Ремонт, восстановление, модернизация. — 2008. — № 6. — С. 44–47.

9. ***Ячиков, И. М.*** Моделирование роста корочки металла в сортовом кристаллизаторе при смещении струи относительно его оси / *И. М. Ячиков, К. Н. Вдовин, О. А. Марочкин, В. В. Точилкин* // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. — 2017. — Т. 60, № 1. — С. 24–29. DOI: 10.17073/0368-0797-2017-1-24-29

10. ***Вдовин, К. Н.*** Сравнительный анализ применения различных систем быстрой замены стаканов-дозаторов при разливке стали на сортовых МНЛЗ / *К. Н. Вдовин, В. В. Точилкин, Р. И. Абдрахманов* [и др.] // Новые огнеупоры. — 2014. — № 10. — С. 62–64.

11. ***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.

12. ***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.

13. ***Зекели, Дж.*** Компьютерное конструирование (CAD–CAM-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.

14. ***Вдовин, К. Н.*** Проектирование цехов сталеплавильного производства : учебник / *К. Н. Вдовин, В. Ф. Мысик, В. В. Точилкин* [и др.]. — Магнитогорск : Изд-во Магнитогор. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2016. — 505 с.

15. ***Antsupov, A. V.*** Energy-mechanical concept of the durability prediction of friction units on the wear resistance criterion of elements / *A. V. Antsupov, V. P. Antsupov, M. G. Slobodianskii, V. A. Rusanov* // Journal of Friction and Wear. — 2016. — Vol. 37, № 5. — P. 494–499. DOI: 10.3103/S1068366616050032

16. ***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. ■

Получено 30.05.17
© Виктор В. Точилкин, О. А. Филатова, В. И. Умнов, Василий В. Точилкин, 2018 г.