ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОЙ СТАЛИ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ ТОНКОСЛЯБОВОЙ МНРС

*В. М. САФОНОВ¹, д-р техн. наук, профессор кафедры электрометаллургии;
В. Г. БОРИСЕВИЧ¹, канд. хим. наук; В. В. КИСЛИЦА², канд. техн. наук, начальник управления
по технологии металлургического производства инженерно-технологического центра;
Д. В. МОРОВ², начальник электросталеплавильного цеха
(¹ Выксунский филиал НИТУ «МИСиС», Россия, Нижегородская обл., г. Выкса;
² АО «Выксунский металлургический завод», Россия, Нижегородская обл., г. Выкса)*

Аннотация. Промышленный опыт разлива стали на тонкослябовой МНРС выявил процессы, которые отрицательно сказываются на качестве внутренней структуры и поверхности непрерывнолитого тонкого сляба. Основные проблемы обусловлены тем, что плоские затопленные струи жидкой стали, истекающие из погружного разливочного стакана в ограниченный тупиковый объем, формируют как в жидкой сердцевине, так и на поверхности слитка циркуляционные потоки чрезмерно высокой скорости. Данное обстоятельство предъявляет особые требования к конструкции и параметрам погружных стаканов для подвода металла в кристаллизатор тонкослябовой МНРС. Несмотря на более чем 25-летний опыт совершенствования формы и геометрических параметров сталеразливочного стакана, нет единого мнения относительно его оптимального дизайна. Представлены результаты физического моделирования процессов движения жидкости в кристаллизаторе тонкослябовой МНРС (максимальная ширина сляба 1800 мм, толщина — 90 мм) литейно-прокатного комплекса АО «Выксунский металлургический завод». Приведено описание физической модели, методики эксперимента и его результатов. Измерена скорость и выявлена структура потоков жидкой стали в глубинных и подповерхностных слоях, а также шлакообразующей смеси на поверхности кристаллизатора. Осуществлено сравнение двух принципиально отличающихся вариантов ввода жидкой стали в кристаллизатор: плоской направленной вниз струей с узким центральным разделителем (прямоточный погружной разливочный стакан) и четырьмя струями, две из которых направлены вниз под углом к вертикальной оси, а остальные (около 20 % общего расхода жидкости) направлены вверх к зеркалу ванны (стакан типа «молот»). Установлено, что разливка стали с технологической скоростью через прямоточный стакан наиболее эффективна в сляб шириной 1400 мм и менее, так как в этом случае скорость подповерхностных потоков не вызывает интенсивного волнообразования, постоянного вихреобразования и вброса шлаковых частиц в глубинные слои слитка. Для разлива стали в сляб шириной более 1400 мм целесообразно применение стакана типа «молот», который позволяет организовать благоприятную устойчивую структуру циркуляции с точки зрения скорости подповерхностных потоков стали и снизить тенденцию затягивания частиц шлака в глубинные слои слитка.

Ключевые слова: непрерывная разливка стали, тонкослябовая МНРС, подвод металла в кристаллизатор, моделирование процессов движения жидкости в кристаллизаторе, сталеразливочный стакан.

Ссылка для цитирования. Сафонов В.М., Борисевич В.Г., Кислица В.В., Морев Д.В. Физическое моделирование движения жидкой стали в кристаллизаторе тонкослябовой МНРС // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 4. С. 454–459.

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-4-454-459

PHYSICAL SIMULATION OF LIQUID STEEL MOTION IN A THIN-SLAB CONTINUOUS CASTER MOLD

*V. M. SAFONOV¹, HD (Tech), Prof., Dpt of electrometallurgy; V. G. BORISEVICH¹, PhD (Chem);
V. V. KISLITSA², PhD (Tech), Head of Management Dpt on steel-making production technology,
Engineer-Technological Center; D. V. MOROV², Head of EAF shop
(¹ Vyksa branch of NITU «MISiS», Russia, Nizhny Novgorod rgn., Vyksa;
² JSC «Vyksa Steel-work», Russia, Nizhny Novgorod rgn., Vyksa)*

Abstract. Industrial experience of steel casting at the thin-slab continuous caster (CC) revealed processes, having negative effect on the quality of internal structure and surface of CC thin slab. The main problems are as follows: flat streams of liquid steel, flowing through submerged snorkel into restricted dead volume, form circulating flows of extremely high velocity in both liquid core and on the slab surface. This circumstance makes specific requirements to the design and parameters of the submerged snorkel to supply the metal into the thin-slab CC mold. Despite the more than 25 years' experience of the snorkel form and geometric parameters development, there is no single opinion on its optimal design. Results of physical simulation of the liquid motion processes in a thin-

slab Caster mold presented (for slab maximum width 1800 mm, thickness – 90 mm) of JSC “Vyksa Steel-works” casting and rolling complex. Description of the physical model facility quoted, as well as description of the experiment methodology and its results. The speed was measured and structure of liquid steel flows revealed in depth and sub-surface layers, as well as in slag-forming mixture at the mold surface. The comparison of two principally different variants of liquid steel feeding into the mold made. The two variants were as follows: by a flat down-directed stream with a narrow central divider (direct-flow submerged snorkel) and by four streams, two of them directed down under an angle relating the vertical axe, and the other (about 20% of total liquid consumption) – directed upward to the bath mirror (the snorkel of “hammer” type). It was determined, that steel casting with technological speed through the direct-flow snorkel was most effective into the slab of 1400 mm width and less, since in this case the sub-surface flows speed did not resulted in the intensive waves formation, constant whirls formation and slag particles dragging into deep layers of the slab. For steel casting into slab of width more than 1400 mm, it is reasonable to use a snorkel of the “hammer” type, which enables to create a favorable stable structure of circulation and decrease the tendency of slag particles dragging in the deep layers of the slab.

Key words: steel continuous casting, thin-slab continuous caster, metal feeding into mold, simulation of liquid motion processes in the mold, steel casting snorkel.

For citation. Safonov V.M., Borisevich V.G., Kislitsa V.V., Morov D.V. Physical simulation of liquid steel motion in a thin-slab continuous caster mold. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2019, vol. 75, no. 4, pp. 454–459. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-4-454-459

За четверть века в мире построено около 60 тонкослябовых МНРС общей производительностью более 80 млн т/год [1]. При практически равной производительности ручья слябовой и тонкослябовой МНРС последняя отличается высокой удельной скоростью поступления металла в кристаллизатор. Отношение массовой скорости поступления металла к площади поперечного сечения кристаллизатора тонкослябовой МНРС составляет около 15–20 т/(мин·м²), что в 2–4 раза выше, чем для традиционной. Данные обстоятельства приводят к возрастанию в 2–6 раз линейной скорости разлива на тонкослябовой МНРС.

Как показывает промышленный опыт разлива тонкого сляба, высокая скорость разлива способствует развитию процессов, которые отрицательно сказываются на качестве внутренней структуры и поверхности непрерывнолитого тонкого сляба.

Во-первых, образование стоячей волны на поверхности расплава, амплитуда которой может превышать толщину жидкого шлака, вызывает неравномерное по периметру слитка затекание шлака в зазор между пластиной кристаллизатора и формирующейся коркой сляба.

Во-вторых, нестабильные потоки на поверхности металла приводят к возникновению турбулентных зон и вихреобразованию на границе шлакообразующая смесь (ШОС) – металл. В таких условиях частички ШОС затягиваются с поверхности ванны кристаллизатора в глубинные слои слитка, дальнейшее поведение которых существенным образом зависит от структуры потоков металла в кристаллизаторе МНРС.

В-третьих, асимметрия потоков относительно продольной оси кристаллизатора способствует, например, несимметричному поведению металла на границе с ШОС и возникновению эффекта вихревой дорожки [2].

В-четвертых, высокая скорость потоков жидкой стали в глубинных слоях слитка приводит к неравномерному затвердеванию корочки слитка.

Учитывая вышеизложенное, можно сделать заключение, что основные проблемы вызваны тем, что плоские затопленные струи жидкой стали, истекающие из погружного разливочного стакана в ограниченный тупиковый объем, формируют как в жидкой сердцевине, так и на поверхности слитка циркуляционные потоки чрезмерно высокой скорости [3]. Поэтому данное обстоятельство накладывает особые требования при выборе конструкции и параметров погружных стаканов для подвода металла в кристаллизатор тонкослябовой МНРС.

Несмотря на более чем 25-летний опыт совершенствования формы и геометрических параметров сталеразливочного стакана, нет единого мнения относительно его оптимального дизайна.

Одной из распространенных конструкций погружных стаканов для разлива тонких слябов является прямоточный погружной стакан (рис. 1, а). Через плоское сопло погружного разливочного стакана, которое имеет узкий центральный разделитель, две плоские струи жидкого расплава направляют преимущественно вглубь кристаллизатора под небольшим углом к вертикали. При истечении в жидкий металл струя постепенно расширяется, а ее движение усложняется. На границе струи формируется пограничный слой жидкости, часть которой струя увлекает за собой. Явление усложняется возникновением циркуляционных зон. При встрече с узкой стенкой кристаллизатора струя растекается, формируя верхний и нижний циркуляционные потоки. Верхний циркуляционный поток проходит вдоль узкой стенки, а затем продолжает движение под зеркалом металла, формируя его профиль. Конструкция данного стакана обеспечивает интенсивный подвод достаточного количества горячего металла с высокой скоростью в верхнюю часть кристаллизатора, а структура потоков жидкости существенным образом зависит от условий взаимодействия струи с узкой стенкой кристаллизатора. Таким образом, изменение ширины

кристаллизатора тонкослябовой МНПС требует адаптации параметров конструкции погружного стакана [1, 3].

Второй тип конструкции погружного стакана для разливки тонких слябов предполагает формирование структуры потоков металла в кристаллизаторе МНПС уже на выходе из отверстий. К данной концепции конструкции можно отнести погружной стакан типа “молот” (см. рис. 1, б). Основной особенностью работы такого погружного стакана является то, что заложенная конфигурация выпускных отверстий обеспечивает как дозированный подвод горячего металла в верхнюю часть кристаллизатора, так и равномерное распределение жидкого расплава по сечению кристаллизатора под достаточно большим углом к вертикали. Подача металла через погружной стакан типа “молот” позволяет свести к минимуму зависимость процесса формирования структуры циркуляционных потоков от результата взаимодействия высокоскоростных горячих потоков с узкими стенками кристаллизатора и, как следствие, создает благоприятные условия, в том числе, для более быстрого формирования твердой корочки [4].

Рис. 1. Конструкция погружных сталеразливочных стаканов

Fig. 1. Design of the submerged snorkel

В лаборатории физического моделирования Выксунского филиала НИТУ “МИСиС” на холодной модели МНПС литейно-прокатного комплекса АО “Выксунский металлургический завод”, которая выполнена в масштабе 1:2 (рис. 2), проведен ряд работ по изучению движения жидкой стали в кристаллизаторе.

Рис. 2. Схема лабораторной установки для исследования потоков стали в кристаллизаторе тонкослябовой МНПС

Fig. 2. Diagram of laboratory facility for studying steel streams in thin-slab continuous caster mold

Лабораторная установка размещена на стенде 6 и включает в себя емкость с запасом воды для обеспечения циркуляции жидкости по контуру 2. Внутренний диаметр трубопровода 5 составляет 50 мм. Жидкость подают в кристаллизатор через погружной разливочный стакан заданной конфигурации. Удаление жидкости из кристаллизатора происходит снизу равномерно по площади горизонтального сечения слитка через два отверстия, над которыми располагается перегородка с отверстиями. Циркуляцию жидкости в системе обеспечивает погружной водяной насос 1. Расход жидкости регулируют кранами 3 и 9 и контролируют индукционным расходомером 4. Замер скорости потоков жидкости в кристаллизаторе 8 проводят с помощью гидрометрической микровертушки с лопастным винтом малого размера. Погружные стаканы 7 заданной формы и геометрических размеров изготавливают по шаблону из поликапролактона (биоразлагаемого полиэфира с низкой температурой плавления) или на 3D принтере из акрилонитрилбутадиенстирола ABS.

В качестве жидкостей, моделирующих расплав стали и шлака, применяют соответственно воду и силиконовое масло при температуре 18–25 °С. Для наблюдения эффектов на границе металл – ШОС на воду помещали растворимые частички-трассеры низкой плотности. Эксперименты проводили для кристаллизатора шириной от 1000 до 1800 мм (на модели от 500 до 900 мм) с учетом значений критериев Рейнольдса и Фруда на модели и промышленном образце.

На основании равенства критерия Фруда масштаб скорости жидкости в погружном стакане и, соответственно, в кристаллизаторе составляет 1,41. Исходя из этого в таблице представлены некоторые параметры разливки промышленной тонкослябовой МНПС и холодной модели.

ПАРАМЕТРЫ РАЗЛИВКИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ТОНКОСЛЯБОВОЙ МНПС И ХОЛОДНОЙ МОДЕЛИ

CASTING PARAMETERS OF AN INDUSTRIAL THIN-SLAB CONTINUOUS CASTER AND OF COLD MODEL

Технологические параметры	МНПС	Модель
Диаметр погружного разливочного стакана, м	0,08	0,04
Площадь отверстия погружного разливочного стакана, м ²	0,0050	0,0013
Отношение площади отверстия погружного разливочного стакана и сечения кристаллизатора	24,2–25,2	
Средняя скорость разлики, м/мин	3,40	2,41
Средний расход жидкости, м ³ /мин	0,429	0,075

Методика эксперимента заключалась в следующем:

- настройка заданного расхода жидкости в контуре модели;
- стабилизация режима работы модели при постоянном расходе жидкости (равенство расхода воды на входе и выходе из кристаллизатора при заданном уровне жидкости);
- подкрашивание жидкости перед входом в погружной сталеразливочный стакан и фиксация движения потоков путем видеосъемки;
- просмотр видеозаписи для определения местоположения точек замера скорости и направления потоков жидкости;
- размещение винта гидрометрической микровертушки по фронтальной координатной сетке в заданной точке кристаллизатора и ориентация ее винта в заданном направлении перпендикулярно нормальному сечению потока;
- фиксация винта микровертушки в заданном положении и замер скорости потока жидкости.

Изучение движения потоков жидкости в кристаллизаторе позволило определить число и положение характерных точек замеров (рис. 3).

Установлено, что скорость потока в исследованном диапазоне прямо пропорциональна расходу жидкости и не зависит от ширины кристаллизатора. Для прямооточного стакана скорость потока жидкости на выходе (см. рис. 3, а, точка 1) изменяется от 44 до 92 см/с при увеличении расхода жидкости с 2,92 до 7,22 м³/ч соответственно. В случае применения погружного разливочного стакана типа “молот” скорость истечения

жидкости из нижних отверстий (см. рис. 3, б, точка 1) примерно на 25 % выше, а из верхних (см. рис. 3, б, точка 6) — в 2 раза ниже вышеуказанных величин.

Рис. 3. Положение характерных точек замеров

Fig. 3. Position of character points of measurements

Следует отметить, что при проведении экспериментов с погружным разливочным стаканом типа “молот” наблюдается тенденция к изменению соотношения величины скорости выхода жидкости из нижних и верхних отверстий. При снижении расхода жидкости с 7,06 до 3,35 м³/ч отношение скорости выхода жидкости из нижних и верхних отверстий изменяется от 2,6:1 до 3,2:1. Таким образом, при повышении расхода жидкости соотношение скорости потоков и давление выравниваются между верхними и нижними отверстиями стакана за счет высокой турбулентности жидкости при взаимодействии с достаточно широким разделителем потоков.

Широкий разделитель потоков в сравнении с разделителем прямооточного стакана позволяет увеличить угол между струями с 20–24 до 80–85 град.

При истечении в “металл” поперечное сечение струи постепенно увеличивается из-за взаимодействия с периферийными областями жидкости, а ее скорость снижается. Установлено, что при повышении расхода жидкости “гашение” скорости водного потока от точки 1 к точке 3 (см. рис. 3, а, б) усиливается. При максимальном расходе жидкости скорость снижается в 5,1 раза, а при минимальном — в 4,2 раза. Аналогичная картина изменения скорости наблюдается после выхода струй из прямооточного стакана, что отмечают и другие исследователи [5].

Учитывая тот факт, что на верхней границе струи формируется пограничный слой, часть которого струя увлекает за собой, высокоскорост-

ная струя “раскручивает” верхний циркуляционный контур. Явление усложняется тем, что чем интенсивнее взаимодействие струи с верхней циркуляционной зоной, тем она сильнее отклоняется в направлении центра циркуляции, т. е. вверх. При натекании на узкую стенку струя растекается, формируя верхний и нижний циркуляционные потоки. Вместе с тем угол встречи струи со стенкой существенным образом определяет мощность верхнего циркуляционного потока. В результате угол встречи струи со стенкой зависит от ширины кристаллизатора. Для узкого кристаллизатора угол обычно острый, а для широкого его величина возрастает до 90 град. и более. Данное явление определяет распределение жидкости между верхним и нижним циркуляционными потоками в слитке. Например, в случае применения прямооточного стакана скорость восходящего потока (см. рис. 3, а, точка 4) для широкого кристаллизатора даже возрастает, относительно точки 3 (рис. 3, а), а при уменьшении ширины кристаллизатора скорость в точке 4 (см. рис. 3, а) во всех случаях практически не превышает скорость в точке 3 (см. рис. 3, а).

В случае применения прямооточного погружного стакана верхний циркуляционный поток проходит вдоль узкой стенки, а затем продолжает движение под зеркалом металла. На широком кристаллизаторе (1800 мм) приповерхностная скорость жидкости максимальна и в зависимости от расхода жидкости составляет от 20 до 11 см/с. Уменьшение ширины кристаллизатора приводит к тому, что угол встречи струи с узкой стенкой уменьшается и количество жидкости, которая питает и формирует верхний контур, также сокращается, что приводит к его ослаблению и снижению подповерхностной скорости.

При применении погружного разливочного стакана типа “молот” подповерхностный циркуляционный поток формирует струя жидкости, выходящая из верхнего отверстия стакана (см. рис. 3, б, точка б). Струя направлена вверх с наклоном в сторону узкой стенки кристаллизатора. В месте выхода струи на поверхность зеркала жидкости образуется бурун, высота которого может превышать толщину жидкого шлака. Проходя к узкой стенке кристаллизатора, поток продолжает движение под зеркалом металла вниз. Приповерхностная скорость жидкости в кристаллизаторе при разливке через стакан типа “молот” не меняется в зависимости от его ширины.

В исследованном диапазоне параметров существует определенный расход жидкости, ниже которого, по визуальным наблюдениям, обеспечивается стабильная и симметричная картина подповерхностных потоков с малой деформацией поверхности металл – ШОС. Для стакана типа “молот” величина данного расхода жидкости несколько выше и составляет на физической

модели в среднем 4,3 против 3,5 м³/ч для прямооточного стакана. Технологическая скорость разлива превышает вышеприведенные показатели во всем диапазоне ширины сляба (от 1000 до 1800 мм) как для стакана типа “молот”, так и для прямооточного стакана.

Сравнение потоков в центральной части кристаллизатора показывает, что для случаев применения погружного разливочного стакана типа “молот” и прямооточного они противоположно направлены (рис. 4).

Рис. 4. Скорость потоков в центральной части кристаллизатора для погружного разливочного стакана прямооточного (1 — ширина кристаллизатора 1800 мм; 2 — ширина кристаллизатора 1400 мм) и типа “молот” (3 — ширина кристаллизатора 1800 мм; 4 — ширина кристаллизатора 1400 мм)

Fig. 4. Flows speed in the central part of the mold for the submerged snorkel of direct-flow (1 — mold width 1800 mm; 2 — mold width 1400 mm) and for “hammer” type snorkel (3 — mold width 1800 mm; 4 — mold width 1400 mm)

При применении прямооточного погружного разливочного стакана центральный поток жидкости формируется на поверхности металла и направлен строго вниз. Существенное отличие от этого имеет вариант наполнения кристаллизатора через стакан типа “молот”, который формирует восходящий поток в центральной части кристаллизатора, скорость которого при максимальном расходе жидкости составляет около 30 см/с.

При этом следует отметить, что при возрастании скорости жидкости на поверхности металл – ШОС свыше 10–12 см/с получают развитие процессы вихреобразования, что увеличивает вероятность затягивания частичек ШОС вглубь слитка. В этом смысле существенными преимуществами структуры потоков, которая организована при разливке погружным стаканом типа “молот”, по сравнению с прямооточным стаканом является то, что движение ШОС направлено от центра кристаллизатора к узкой грани. При воз-

никновении вихрей в зоне выхода верхних струй частицы ШОС могут проникать в металл, но скорость их вовлечения существенно ниже, чем при применении прямоточного стакана. Дальнейшее поведение частиц ШОС существенным образом отличается, так как они не вовлекаются в глубокие слои слитка в центральной части поверхности ванны.

На основании исследования можно сделать следующие практические рекомендации. Применение прямоточного стакана при разливке с технологической скоростью наиболее эффективно в

сляб шириной 1400 мм и менее, так как в этом случае скорость подповерхностных потоков не вызывает интенсивного волнообразования, постоянного вихреобразования и вброса шлаковых частиц в глубокие слои слитка. Для разливки стали в сляб шириной более 1400 мм, на взгляд авторов, желательно применять стакан типа “молот”, который позволяет организовать достаточно устойчивую работу с точки зрения скорости подповерхностных потоков стали и снизить тенденцию вброса частиц шлака в глубокие слои слитка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rogler J.P., Richaud J., Baehren G. 25 Years of Refractory Development for Thin-Slab // Application AISTech 2015 Proceedings 2015 by AIST. P. 2523–2533.
2. Tsukaguchi Y., Hayashi H., Kurimoto H. etc. Development of Swirling-flow Submerged Entry Nozzles for Slab Casting // ISIJ International. 2010. V. 50. № 5. P. 721–729.
3. Морсют Л., Ринальдини М., Урбано А., Лена М. Производство высококачественных рельсов на заводе ОАО ЕВРАЗ ЗСМК в Новокузнецке // Metallургическое производство и технология. 2014. № 2. С. 36–42.
4. Meratian M., Hadjari A. Physical Modeling of Steel Delivery during Thin Slab Continuous Casting // International Journal of ISSI. 2008. V. 5. № 1. P. 41–46.
5. Besich R.M., Yavuz M.M. CFD Modeling of Nos. 2 and 3 Slab Casters at ArcelorMittal Indiana Harbor No. 2 Steel Producing Shop // AISTech Proceedings. 2009. V. I. P. 1163–1170.

Поступила 12 февраля 2019 г.

REFERENCES

1. Rogler J.P., Richaud J., Baehren G. 25 Years of Refractory Development for Thin-Slab. *Application AISTech 2015 Proceedings*, 2015 by AIST, pp. 2523–2533.
2. Tsukaguchi Y., Hayashi H., Kurimoto H. etc. Development of Swirling-flow Submerged Entry Nozzles for Slab Casting. *ISIJ International*, 2010, vol. 50, no. 5, pp. 721–729.
3. Morsut L., Rinal'dini M., Urbano A., Lena M. Production of high-quality rails at OJSC EVRAZ ZSMK in Novokuznetsk. *Metallurgicheskoe proizvodstvo i tekhnologiya*, 2014, no. 2, pp. 36–42. (In Russ.).
4. Meratian M., Hadjari A. Physical Modeling of Steel Delivery during Thin Slab Continuous Casting. *International Journal of ISSI*, 2008, vol. 5, no. 1, pp. 41–46.
5. Besich R.M., Yavuz M.M. CFD Modeling of Nos. 2 and 3 Slab Casters at ArcelorMittal Indiana Harbor No. 2 Steel Producing Shop. *AISTech Proceedings*, 2009, vol. I, pp. 1163–1170.

Received 12 February 2019