

**Е. И. МАРУКОВИЧ**, д-р техн. наук (ИТМ НАН Беларуси),  
**В. А. МАТОЧКИН**, канд. техн. наук (РУП «БМЗ»),  
**В. Ю. СТЕЦЕНКО**, канд. техн. наук (ИТМ НАН Беларуси)

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАТОПЛЕННО-СТРУЙНЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРА И СЛИТКА ПРИ РАЗЛИВКЕ СТАЛИ НА МНЛЗ**

Кристаллизаторы со струйным охлаждением внешней поверхности гильзы являются наиболее перспективными для непрерывной разливки стали, поскольку обладают резервом увеличения скорости литья [1]. В ГНУ «ИТМ НАН Беларуси» разработана конструкция кристаллизатора с затопленно-струйной системой охлаждения [2], который в настоящее время используется для непрерывного горизонтального литья заготовок из чугуна, бронзы и силуминов. Установлено, что кристаллизатор с затопленно-струйной системой охлаждения (струйный кристаллизатор) по сравнению с обычным (щелевым) кристаллизатором при равных исходных гидравлических параметрах (расход и давление охладителя) обладает более высокой охлаждающей способностью [3, 4].

Для повышения производительности непрерывной разливки стали для МНЛЗ-1, 2 РУП «БМЗ» разработана система затопленно-струйного охлаждения кристаллизатора (рис. 1). Она состоит из кристаллизатора 1, экрана 2, цилиндра 3, верхнего 4 и нижнего 5 фланцев, перегородки 6. В экране равномерно по всей его поверхности выполнены отверстия с заданными диаметром и шагом по высоте и образующей. Расстояние между экраном и кристаллизатором выбиралось из расчета перекрытия струй, ударяющихся в кристаллизатор. Попадая в коллектор между цилиндром, верхним фланцем и перегородкой, охладитель продавливается через отверстия в экране и в виде затопленных струй равномерно по высоте и периметру охлаждает кристаллизатор. Ударяясь в охлаждаемую поверхность, струи воды уменьшают толщину теплового пограничного слоя, что повышает коэффициент теплоотдачи и затвердевания слитка. При этом увеличиваются охлаждающая способность кристаллизатора и производительность процесса непрерывного литья.

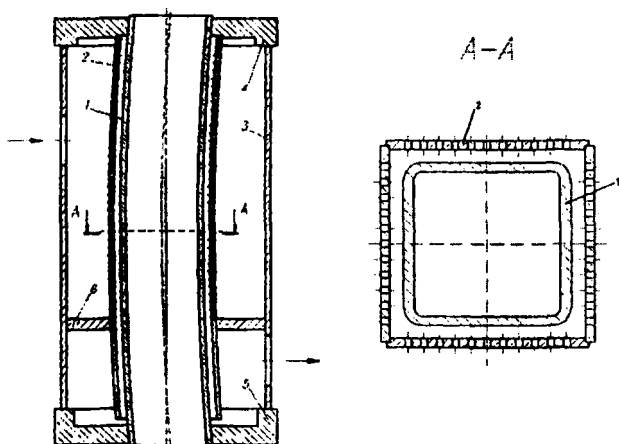


Рис. 1. Схема струйного охлаждения кристаллизатора МНЛЗ: 1 – кристаллизатор; 2 – экран; 3 – цилиндр; 4 – верхний фланец; 5 – нижний фланец; 6 – перегородка

При непрерывной разливке стали формирование слитка осуществляется в трех зонах: зоне охлаждения в кристаллизаторе (ЗОК), зоне вторичного охлаждения (ЗВО) и зоне охлаждения на воздухе (ЗОВ) (рис. 2).

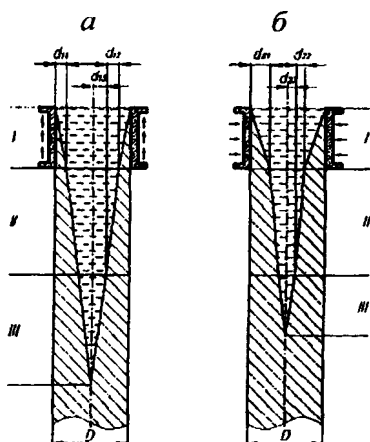


Рис. 2. Схема формирования слитка при непрерывной разливке стали: а – в обычный (щелевой) кристаллизатор; б – в струйный кристаллизатор; I – зона охлаждения в кристаллизаторе (ЗОК); II – зона вторичного охлаждения (ЗВО); III – зона охлаждения на воздухе (ЗОВ)

Принимаем, что затвердевание слитка в каждой из зон аппроксимируется законом квадратного корня. Тогда формирование слитка при непрерывной разливке стали в обычный кристаллизатор будет описываться следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}d_{11} &= k_1 \sqrt{t_{11}} ; \\d_{12} &= k_2 \sqrt{t_{12}} ; \\d_{13} &= k_3 \sqrt{t_{13}} ,\end{aligned}\tag{1}$$

где  $d_{11}$ ,  $d_{12}$ ,  $d_{13}$  – толщины корки слитка, затвердевающего в конце каждой из зон за время  $t_{11}$ ,  $t_{12}$ ,  $t_{13}$ ;  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  – коэффициенты затвердевания соответственно для ЗОК, ЗВО, ЗОВ. Формирование слитка при непрерывной разливке стального слитка в струйный кристаллизатор будет описываться следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}d_{21} &= k_4 \sqrt{t_{21}} ; \\d_{22} &= k_2 \sqrt{t_{22}} ; \\d_{23} &= k_3 \sqrt{t_{23}} ,\end{aligned}\tag{2}$$

где  $d_{21}$ ,  $d_{22}$ ,  $d_{23}$  – толщины корки слитка, затвердевающего в конце ЗОК, ЗВО, ЗОВ за время  $t_{21}$ ,  $t_{22}$ ,  $t_{23}$ ;  $k_4$  – коэффициент затвердевания для ЗОК при литье в струйный кристаллизатор. Время затвердевания слитка, полученного разливкой в обычный кристаллизатор  $t_1$ , равно:

$$t_1 = t_{11} + t_{12} + t_{13} .\tag{3}$$

Время затвердевания слитка, полученного разливкой в струйный кристаллизатор  $t_2$ , составляет:

$$t_2 = t_{21} + t_{22} + t_{23} .\tag{4}$$

Для оценки эффективности процессов разливки стали в оба вида кристаллизаторов необходимо найти величину относительной производительности  $n$ :

$$n = \frac{t_1}{t_2}. \quad (5)$$

Значение  $n$  показывает, во сколько раз производительность разливки (скорость разливки) в струйный кристаллизатор превышает аналогичную величину для обычного (щелевого) кристаллизатора. Определим  $n$  для непрерывного литья слитков сечением  $0,125 \times 0,125$  м из стали марки Сталь 35 на МНЛЗ-1, 2. В этом случае при разливке стали в обычный кристаллизатор  $t_1, t_{11}, t_{12}, t_{13}$  в среднем составляют соответственно: 5,5; 0,3; 2,0; 3,2 мин [5]. Поскольку в обоих случаях скорость разливки постоянна, то  $t_{11} = t_{21}$  и  $t_{12} = t_{22}$ . Поэтому  $t_2 = 2,3$  мин +  $t_{23}$ . Величина  $t_{23}$  определяется из рис. 2 и уравнений (2)

$$t_{23} = \left( \frac{0,5D - k_4 \sqrt{t_{21}} - k_2 \sqrt{t_{22}}}{k_3} \right)^2, \quad (6)$$

где  $D$  – размер слитка.

Для непрерывного литья в струйный кристаллизатор  $k_4 \geq 0,038$  м/мин<sup>0,5</sup>. Величина  $k_3$  определяется из рис. 2 и уравнений (1)

$$k_3 = \frac{0,5D - k_1 \sqrt{t_{11}} - k_2 \sqrt{t_{12}}}{\sqrt{t_{13}}}. \quad (7)$$

Для непрерывной разливки стали в обычный (щелевой) кристаллизатор значение  $k_1$  в среднем составляет 0,026 м/мин<sup>0,5</sup> [6, 7]. Величина  $k_2$  определяется из рис. 2, уравнений (1) и данных по

формированию непрерывнолитого слитка из стали марки Сталь 35 и составляет в среднем  $0,012 \text{ м/мин}^{0,5}$  [5]. Тогда из уравнения (7) следует, что  $k_3 = 0,017 \text{ м/мин}^{0,5}$ . Подставляя значения  $k_2, k_3, k_4$  в уравнение (6), учитывая, что  $t_{21} = 0,3 \text{ мин}$ ;  $t_{22} = 2 \text{ мин}$ ;  $D = 0,125 \text{ м}$ , получим, что  $t_{23} \leq 2,1 \text{ мин}$ , а  $t_2 \leq 4,4 \text{ мин}$ . Подставляя последнее значение  $t_2$  в уравнение (5), определяем, что  $n \geq 1,2$ . Это означает, что производительность струйного кристаллизатора при разливке стали на МНЛЗ-1, 2 на 20 % и более выше, чем при разливке стали в обычный кристаллизатор при равных исходных гидравлических параметрах (расход и давление) охладителя.

Определим величину  $n$  при непрерывной разливке стали Сталь 35 на МНЛЗ-3 при получении слитка сечением  $0,25 \times 0,30 \text{ м}$ . При литье в обычный кристаллизатор  $t_1, t_{11}, t_{12}, t_{13}$  в среднем составляют соответственно: 23,5; 1,0; 3,5; 19,0 мин [5]. Поскольку скорость разливки постоянна, то  $t_{11} = t_{21}$ ;  $t_{12} = t_{22}$ . Поэтому  $t_2 = 4,5 \text{ мин} + t_{23}$ . Величина  $k_2$  определяется из уравнений (1) и данных по формированию слитка и составляет в среднем  $0,012 \text{ м/мин}^{0,5}$  [5]. Принимаем:  $D = 0,25 \text{ м}$ ;  $k_1 = 0,026 \text{ м/мин}^{0,5}$ .

Подставляя значения  $D, k_1, k_2, t_{11}, t_{12}$  и  $t_{13}$  в уравнение (7), получим, что  $k_3 = 0,017 \text{ м/мин}^{0,5}$ . Значения  $k_1, k_2, k_3$  при непрерывном литье стальных слитков сечениями  $0,125 \times 0,125$  и  $0,250 \times 0,30 \text{ м}$  в обычный кристаллизатор одинаковы, поскольку обеспечиваются равными интенсивностями теплоотвода в каждой из зон охлаждения. Подставляя значения  $D, k_2, k_3$  в уравнение (6), учитывая, что  $k_4 \geq 0,038 \text{ м/мин}^{0,5}$ ;  $t_{21} = t_{12}$  и  $t_{22} = t_{12}$ , получим, что  $t_{23} \leq 14 \text{ мин}$ , а  $t_2 \leq 18,5 \text{ мин}$ . Тогда из уравнения (5) следует, что  $n \geq 1,27$ . Это означает, что производительность струйного кристаллизатора при разливке стали на МНЛЗ-3 более чем на 27 % выше, чем при разливке стали в обычный кристаллизатор при равных исходных расхода и давления охладителя.

Из анализа процессов затвердевания стальных слитков сечениями  $0,125 \times 0,125$  и  $0,25 \times 0,30$  м следует, что  $k_2 \geq k_3$ . Это можно объяснить тем, что системы форсуночного охлаждения при непрерывной разливке стали на МНЛЗ-1, 2 и МНЛЗ-3 недостаточно эффективны, что является резервом для повышения производительности процесса литья. Форсуночная система охлаждения создает водовоздушную смесь, которая в сочетании с большим количеством пара отбрасывает струи воды от слитка и создает вокруг него сплошную паровую рубашку. Это затрудняет теплоотдачу от охлаждаемой поверхности к охладителю.

В ГНУ «ИТМ НАН Беларуси» разработана система затопленно-струйного вторичного охлаждения слитков [8]. Она позволяет существенно повысить скорость охлаждения непрерывнолитых заготовок и диспергировать их микроструктуру [9]. Для повышения эффективности вторичного охлаждения слитка при непрерывной разливке стали на МНЛЗ-1, 2 РУП «БМЗ» было разработано устройство затопленно-струйного охлаждения слитка (рис. 3).

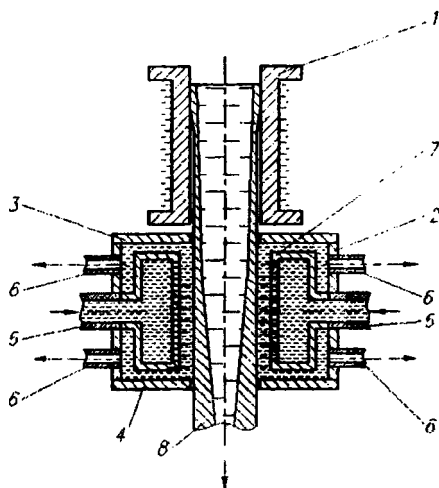


Рис. 3. Схема устройства затопленно-струйного охлаждения непрерывнолитого слитка: 1 – кристаллизатор; 2 – кожух; 3 – фланец верхний; 4 – фланец нижний; 5 – патрубок подводящий; 6 – патрубок отводящий; 7 – коллектор; 8 – слиток

Эти устройства могут сочетаться с форсуночным охлаждением в различных сочетаниях и по разным схемам. Устройство затопленно-струйного охлаждения состоит из кожуха 2, верхнего 3 и нижнего 4 фланцев, подводящих 5 и отводящих 6 патрубков, коллектора 7. В коллектор под давлением подается охладитель, который продавливается через отверстия в нем и в виде затопленных струй, равномерно по высоте и периметру охлаждает непрерывнолитой слиток. При затопленно-струйной системе вторичного охлаждения стального слитка теплоотвод осуществляется интенсивными конвективными турбулентными потоками охладителя. Концентрированные затопленные струи воды разрушают паровую рубашку и повышают давление вблизи поверхности охлаждения, что значительно уменьшает образование пара и устраняет кризис при конвективном теплообмене. Все это увеличивает интенсивность вторичного охлаждения стального слитка и измельчает его структуру. Повышение скорости кристаллизации слитка уменьшит глубину жидкой лунки и брак по его геометрии, что очень важно для получения слитков круглого сечения.

Таким образом, применение затопленно-струйного охлаждения кристаллизатора позволит:

- повысить производительность непрерывной разливки стали на МНЛЗ более чем на 20 %;
- улучшить структуру непрерывнолитого слитка;
- получать слитки круглого сечения с минимальным браком по геометрии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Смирнов, А. Н.* Современные решения в конструкции кристаллизаторов для высокоскоростного литья на сортовых МНЛЗ / А. Н. Смирнов, Е. Ю. Жибоедов, И. В. Лейрих // *Электрометаллургия*. – 2006. – № 11. – С. 22–28.
2. Патент ВУ 1959 U 2005.06.30.
3. *Марукович, Е. И.* Повышение эффективности работы кристаллизатора при непрерывном литье слитков / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2005. – № 2. – С. 139–141.
4. *Стеценко, В. Ю.* Литье силуминов в кокиль со струйной системой охлаждения / В. Ю. Стеценко, С. Л. Радько // *Литье и металлургия*. – 2006. – № 2. – С. 136–138.
5. *Стальной слиток*. – Т. 2. Затвердевание и охлаждение / Ю. А. Самойлович [и др.]; под общ. ред. В. И. Тимошпольского, Ю. А. Самойловича. – Мн.: Белорусская наука, 2000.

6. *Металлургия стали* / В. Я. Явойский [и др.]. – М.: *Металлургия*, 1973.
7. *Исследование непрерывной разливки стали* / под ред. Дж. Лиина; пер. с англ. – Брюссель, 1977; М.: *Металлургия*, 1982.
8. Патент ВУ 2250 U 2005.12.30.
9. *Стеценко, В. Ю.* Повышение эффективности охлаждения отливок из силуминов при литье закалочным затвердеванием / В. Ю. Стеценко, С. Л. Радько, С. А. Харьков // *Литье и металлургия*. – 2006. – № 2. – С. 128–129.

УДК 669.187.2:621.365.22

**В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ**, д-р техн. наук (БНТУ),  
**А. В. МАТОЧКИН** (ОАО «Завод «ЛЕГМАШ»»),  
**С. В. КОРНЕЕВ** (БНТУ)

## **РАЦИОНАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ В ДУГОВЫХ ПЕЧАХ**

Дуговые сталеплавильные печи (ДСП) являются энергоемкими агрегатами, и эффективность их работы зависит как от применяемых шихтовых материалов и технологии выплавки, так и от конструктивных особенностей самих печей. Среди направлений повышения эффективности работы ДСП можно выделить два основополагающих: интенсификацию процесса и соответственно уменьшение длительности цикла плавки; минимизацию потерь энергии, т. е. увеличение КПД печи. Мероприятия по интенсификации процесса иногда находятся в противоречии с уменьшением потерь энергии, например увеличение мощности трансформатора, как правило, приводит к уменьшению КПД печи. В то же время предварительный подогрев металлошихты удаляемыми из печи газами положительно влияет как на скорость расплавления, так и на уровень тепловых потерь. Сокращение цикла плавки в целом приводит к уменьшению потерь через ограждающие конструкции печи.

Для современной технологии выплавки стали в дуговых печах характерны следующие энерготехнологические аспекты, позволяющие реализовать основные направления повышения эффективности работы: использование топливно-кислородных горелок для