

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.

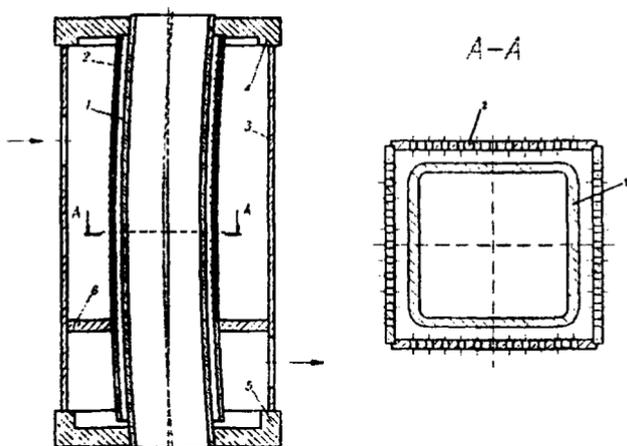


Рис. 1. Схема струйного охлаждения кристаллизатора МНЛЗ: 1 – кристаллизатор; 2 – экран; 3 – цилиндр; 4 – верхний фланец; 5 – нижний фланец; 6 – перегородка

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).

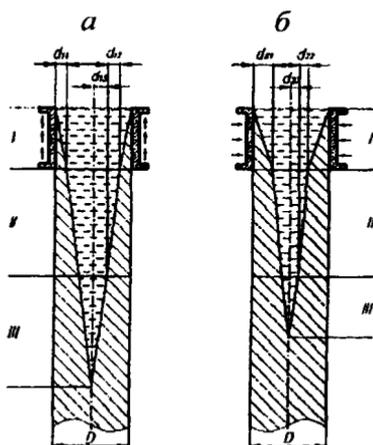


Рис. 2. Схема формирования слитка при непрерывной разливке стали: а – в обычный (щелевой) кристаллизатор; б – в струйный кристаллизатор; I – зона охлаждения в кристаллизаторе (ЗОК); II – зона вторичного охлаждения (ЗВО); III – зона охлаждения на воздухе (ЗОВ)

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^{0,5}. 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^{0,5} [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).

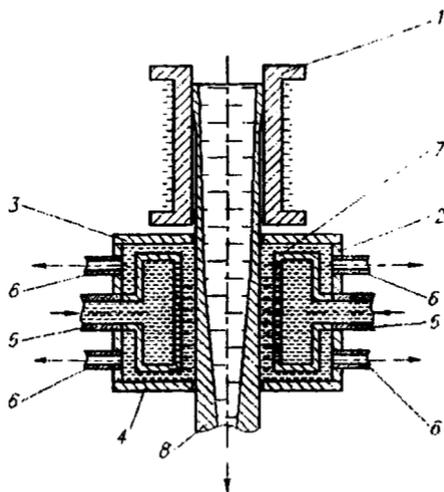


Рис. 3. Схема устройства затопленно-струйного охлаждения непрерывнолитого слитка: 1 – кристаллизатор; 2 – кожух; 3 – фланец верхний; 4 – фланец нижний; 5 – патрубок подводящий; 6 – патрубок отводящий; 7 – коллектор; 8 – слиток

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