

**Литейное  
материаловедение,  
специальные способы  
литья**

*Jet crystallizer, device of flooded-stream secondary cooling, structural- superfine silumin modifier are developed in respect to plant technology of steel pouring. They allow to increase productivity of the process and to increase the steel ingot quality.*

Е. И. МАРУКОВИЧ, В. Ю. СТЕЦЕНКО, ИТМ НАН Беларуси,  
В. А. МАТОЧКИН, РУП «БМЗ»

УДК 621.746.27

**ПЕРСПЕКТИВЫ УВЕЛИЧЕНИЯ  
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА РАЗЛИВКИ СТАЛИ  
И ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СТАЛЬНОГО СЛИТКА**

Для непрерывной разливки стали в основном используют щелевую и спреерную систему охлаждения гильзы кристаллизатора и слитка. Основным недостатком спреерной системы является захват струями охладителя воздуха. При этом вблизи поверхности охлаждения образуется воздушная пленка, замедляющая процесс теплопередачи. Щелевая система охлаждения в основном применяется в кристаллизаторах (рис. 1, а). Здесь охладитель движется в пространстве щели между гильзой кристаллизатора 1 и экраном 2 вдоль поверхности охлаждения. В этом случае она будет тормозить поток и формировать тепловой пограничный слой 4 переменной сечения, который опре-

деляет коэффициент теплоотдачи от поверхности гильзы к основному потоку охладителя в щели кристаллизатора ( $\alpha_a$ ):

$$\alpha_a = \frac{Nu_a \lambda}{\delta_{ТХ}}, \tag{1}$$

где  $Nu_a$  – критерий Нуссельта при движении охладителя в кольцевой щели;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности охладителя;  $\delta_{ТХ}$  – толщина теплового пограничного слоя.

Величина  $\delta_{ТХ}$  определяется следующим уравнением [1]:

$$\delta_{ТХ} = \delta_{Т0} + kx^{0,8}, \tag{2}$$

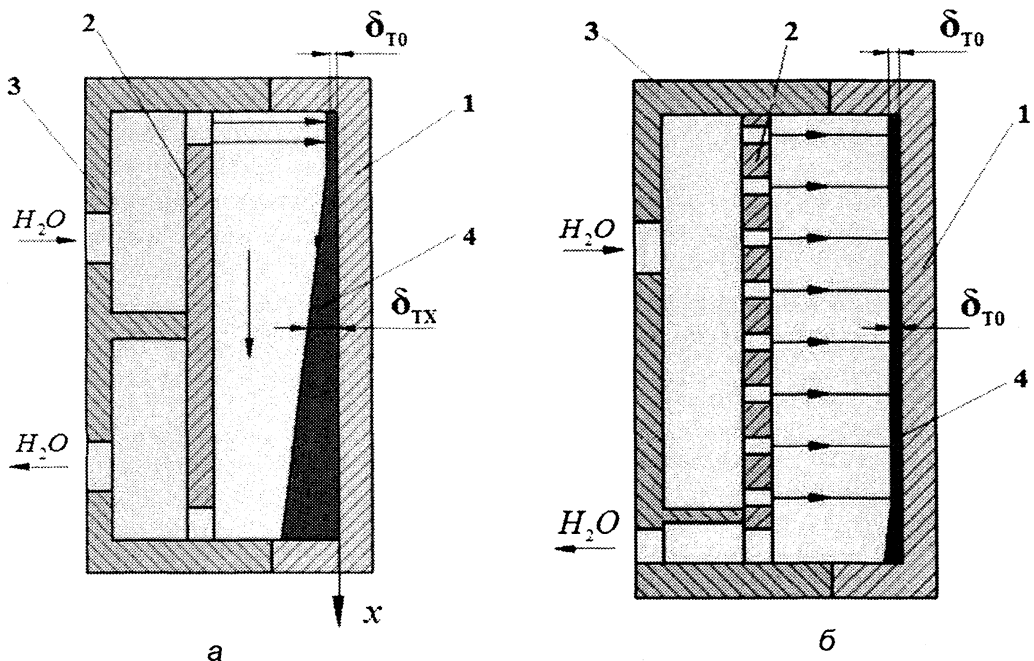


Рис. 1. Системы охлаждения кристаллизаторов: а – щелевая; б – затопленно-струйная; 1 – рубашка кристаллизатора; 2 – экран; 3 – корпус; 4 – тепловой пограничный слой

где  $\delta_{ТО}$  – толщина начального теплового пограничного слоя;  $k$  – константа;  $x$  – координата от начального участка по длине внутренней поверхности гильзы. Из уравнений (1) и (2) следует, что обычный (щелевой) кристаллизатор имеет переменную по высоте (длине) интенсивность охлаждения. Это способствует повышению термических напряжений в гильзе и неравномерности формирования корки отливки при непрерывно-циклическом литье слитков. Для устранения этих недостатков щелевых кристаллизаторов была разработана затопленно-струйная система охлаждения наружной поверхности гильзы [1]. Она представлена на рис. 1, б. Здесь охладитель равномерно продавливается через отверстия в экране 2 и в виде затопленных струй с одинаковой скоростью ударяет в наружную поверхность гильзы кристаллизатора. При этом толщина теплового пограничного слоя остается на начальном уровне ( $\delta_{ТО}$ ). Коэффициент теплоотдачи от гильзы к основному потоку охладителя ( $\alpha_g$ ) в этом случае будет определяться известным уравнением:

$$\alpha_g = \frac{Nu_g \lambda}{\delta_{ТО}}, \quad (3)$$

где  $Nu_g$  – критерий Нуссельта при затопленно-струйном охлаждении гильзы.

При одинаковых гидравлических параметрах охлаждения  $Nu_g = 2Nu_a$  [1]. Тогда из уравнений (1)–(3) получим:

$$\frac{\alpha_g}{\alpha_a} = 2 \left( 1 + \frac{kx^{0,8}}{\delta_{ТО}} \right). \quad (4)$$

Из уравнения (4) следует, что затопленно-струйная система охлаждения как минимум в 2 раза более эффективна, чем щелевая.

Затопленно-струйная система охлаждения была применена к разработке струйного кристаллизатора (рис. 2). Он состоит из гильзы 1, корпуса 2, верхнего 3 и нижнего 4 фланцев, экрана 5, перегородки 6, подводящего 7 и отводящего 8 патрубков. В экране 5 выполнены отверстия для создания затопленных струй, охлаждающих гильзу 1. Струйный кристаллизатор позволяет повысить производительность литья слитков диаметром 40 мм из силумина в 3 раза [2]. С целью повышения производительности непрерывной разливки стали для МНЛЗ-1,2 РУП «БМЗ» была разработана система затопленно-струйного охлаждения кристаллизатора (рис. 3). 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 за-

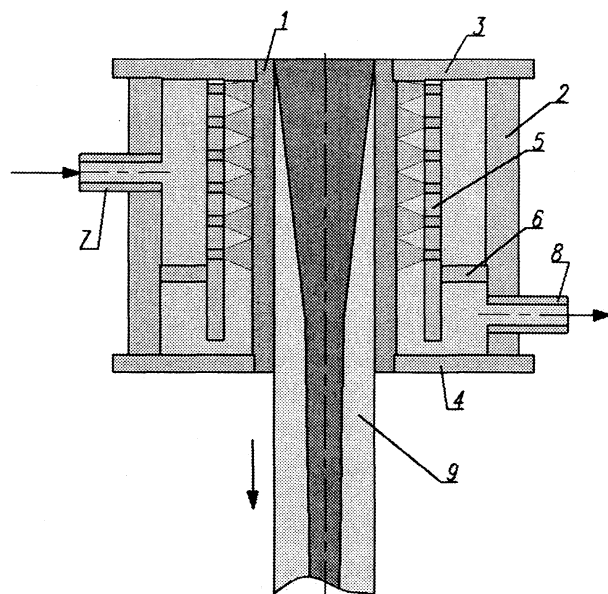


Рис. 2. Схема струйного кристаллизатора: 1 – гильза; 2 – корпус; 3 – верхний фланец; 4 – нижний фланец; 5 – экран; 6 – перегородка; 7 – подводящий патрубок; 8 – отводящий патрубок; 9 – слиток

данными диаметром и шагом по высоте и образующей. Расстояние между экраном и кристаллизатором выбиралось из расчета перекрытия струй. Попадая в коллектор между цилиндром, верхним фланцем и перегородкой, охладитель проходит 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. Расчеты показывают, что при непрерывной разливке стали в струйный кристаллизатор на РУП «БМЗ» производительность литья слитков сечением 0,125×0,125 м увеличивается более чем на 20%, а слитков сечением 0,25×0,3 м – на 27% [3]. Затопленно-струйная система охлаждения была применена к разработке устройства струйного вторичного охлаждения слитка (рис. 4). Она состоит из коллектора 1, кожуха 2, нижнего 3 и верхнего 4 фланцев, подводящих 5 и отводящих 6 патрубков. Слиток 7 интенсивно охлаждается затопленными струями воды, исходящими из отверстий в коллекторе 1. Данное устройство, установленное непосредственно после кристаллизатора, позволило дополнительно увеличить производительность литья слитков диаметром 40 мм из силумина в 3 раза [2]. По сравнению с обычными способами охлаждения затопленно-струйный метод обеспечивает более равномерное охлаждение

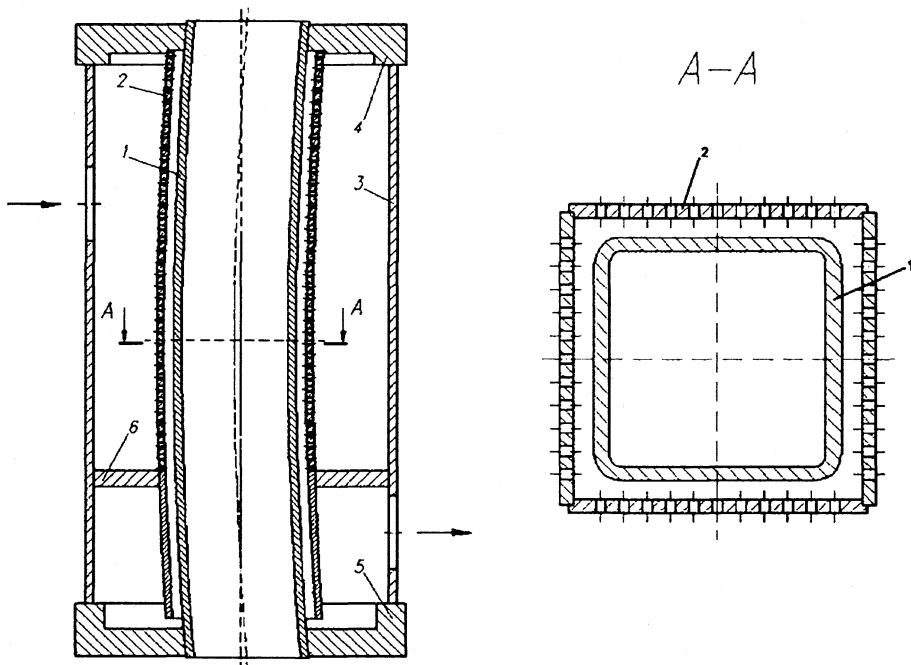


Рис. 3. Схема струйного охлаждения кристаллизатора МНЛЗ: 1 – кристаллизатор; 2 – экран; 3 – цилиндр; 4 – верхний фланец; 5 – нижний фланец; 6 – перегородка

гильзы кристаллизатора и отливки. Это повышает стабильность процесса разливки стали и увеличивает срок службы оборудования.

Увеличить равномерность охлаждения слитка по его периметру можно с помощью вертикальных пазов, выполненных на наружной поверхности гильзы (рис. 5) [4]. При непрерывном литье в кристаллизатор с гладкой внутренней поверхностью гильзы слиток не равномерно отходит от ее стенки (рис. 5, а). Это приводит к разностенности корочки, увеличению термических напряжений и уменьшению стабильности процесса разливки стали. При непрерывном литье в кристаллизатор с профилированной внутренней поверхностью гильзы продольные вертикальные пазы фиксируют отливку и не дают ей сместиться от вертикальной оси симметрии кристаллизатора (рис. 5, б). Это выравнивает теплоотвод по периметру слитка и увели-

чивает равномерность его затвердевания, что повышает стабильность процесса разливки стали и улучшает качество слитка.

При непрерывном литье слитка диаметром 40 мм из силумина в струйный кристаллизатор с использованием устройства струйного вторичного охлаждения производительность процесса литья повышается в 6 раз. При этом дисперсность фазовых составляющих увеличивается в 5–8 раз [2].

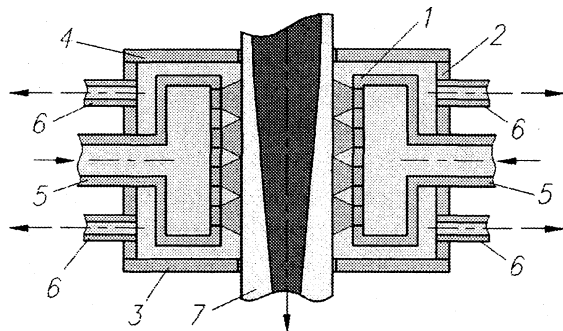


Рис. 4. Схема устройства струйного вторичного охлаждения слитка: 1 – коллектор; 2 – кожух; 3 – фланец нижний; 4 – фланец верхний; 5 – патрубков подводящий; 6 – патрубков отводящий; 7 – слиток

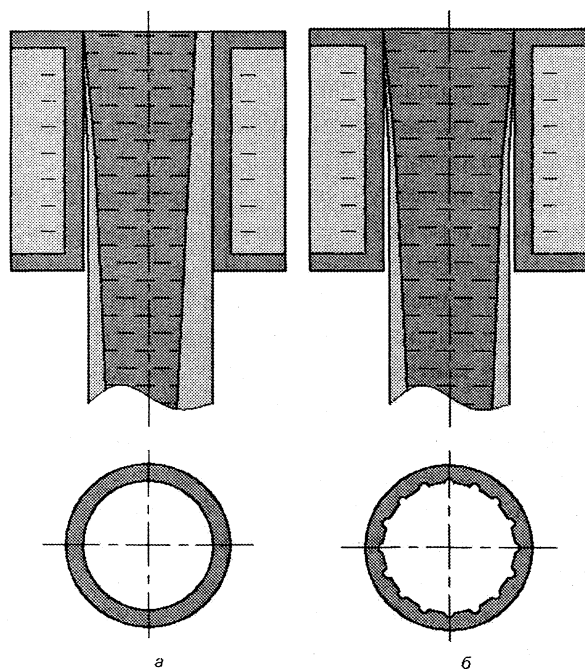


Рис. 5. Схема непрерывного литья в кристаллизатор: а – с гладкой внутренней поверхностью гильзы; б – с профилированной внутренней поверхностью гильзы

Получаемые слитки со структурно-высокодисперсной микроструктурой можно использовать в качестве раскислителей и модификаторов стали. Силумин имеет относительно низкую температуру плавления, поэтому хорошо растворяется в жидкой стали. Добавки магния, кальция и титана в алюминиево-кремниевый сплав в сочетании с высокой структурной дисперсностью слитка значительно повышают эффективность действия силуминового модификатора. Его малая стоимость и простота получения предполагают широкое применение этого модификатора для улучшения структуры заготовок из стали и других сплавов.

Для модифицирования жидкой стали в ковше разработаны две схемы ввода структурно-высокодисперсного силуминового модификатора. Первая схема предполагает применение стальной штанги. На ее погружаемом конце крепился модификатор, на другом – груз, который предотвращал отклонение штанги от вертикальной оси при погружении модификатора в ковш с расплавом. Эту схему использовали при модифицировании на РУП «БМЗ» стали 45 структурно-высокодисперсным силуминовым модификатором в количестве 0,03% от массы расплава в 100-тонном ковше. Это позволило уменьшить ликвацию, улучшить микроструктуру слитка сечением 300x400 мм по пористости, трещинам, точечным загрязнениям, подкорковым пузырькам и повысить дисперсность аустенитного зерна в 1,5–2,0 раза [5]. Вторая схема предполагала использование сэндвич-процесса при модифицировании стали. Для этого на дно ковша помещали специальное устройство ввода модификатора.

Оно представляет собой два стальных листа с силуминовым модификатором между ними. Устройство не позволяет модификатору всплывать при заполнении ковша расплавом. Эту схему использовали при модифицировании стали 45 структурно-высокодисперсным силуминовым модификатором в количестве 0,2% от массы расплава в 100-тонном ковше. При этом сталь не раскисляли и не обрабатывали трайб-аппаратным силикокальцием. Было установлено, что макроструктура опытного слитка соответствовала техническим условиям и была не хуже получаемой после раскисления и модифицирования по заводской технологии. Применение сэндвич-процесса для модифицирования и раскисления силуминовым структурно-высокодисперсным модификатором при непрерывной разливке стали на РУП «БМЗ» позволит исключить из технологического цикла трайб-аппаратное модифицирование и сократить время циркуляционного вакуумирования. Этому будут способствовать микропузырьки паров магния, которые образуются при взаимодействии высокодисперсных интерметаллидов силуминового модификатора с расплавом стали. Чем выше дисперсность этих микропузырьков, тем более длительное время они находятся в расплаве, тем выше время действия процесса модифицирования.

Таким образом, применение струйного кристаллизатора, устройства затопленно-струйного вторичного охлаждения, структурно-высокодисперсного силуминового модификатора позволит увеличить производительность процесса разливки стали и повысить качество стального слитка.

### Литература

1. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю. Повышение эффективности работы кристаллизатора при непрерывном литье слитков // *Литье и металлургия*. 2005. № 2. С. 139–141.
2. Стеценко В. Ю., Ривкин А. И., Певнев А. М. Повышение эффективности непрерывного литья силуминов // *Тр. конф. «Металлургия и литейное производство 2007. Беларусь»*. Жлобин, 2007. Республика Беларусь. С. 265–267.
3. Марукович Е. И., Маточкин В. А., Стеценко В. Ю. Перспективы применения систем затопленно-струйных охладителей кристаллизатора и слитка при разливке стали на МНЛЗ / *Сб. науч. тр. «Металлургия»*. Мн., 2008. № 31. С. 12–19.
4. Пат. ВУ 4026 U МПК В 22D 11/04. Гильза кристаллизатора.
5. Марукович Е. И., Стеценко В. Ю., Гутев А. П., Андрианов Н. В., Маточкин В. А. Модифицированный силуминовый модификатор для непрерывной разливки стали на МНЛЗ / *Тр. конф. «Металлургия и литейное производство 2007. Беларусь»*. Жлобин, 2007. Республика Беларусь. С. 63–65.