

Мочалов А. А.,
Шаповал Н. А.

ОПИСАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НЕПРЕРЫВНОГО СЛИТКА

В статье представлено описание процессов, протекающих при непрерывной разливки стали. Приведена формула расчета глубины жидкой лунки. Рассмотрен каскадный метод получения непрерывного слитка. Представлена математическая модель интенсификации процесса кристаллизации за счет намораживания металла на непрерывный закристаллизовавшийся слиток.

Ключевые слова: кристаллизация, буферная зона, затвердевшая корочка, кристаллизатор, непрерывный слиток, двухфазная зона.

1. Введение

В настоящее время процесс получения непрерывного слитка больших размеров традиционным способом исчерпал свои возможности. Увеличение размеров слитка приводит к увеличению скорости разливки стали, увеличению глубины жидкой лунки и, как следствие, к увеличению габаритов установки непрерывного литья заготовок, а также и к продолжительности кристаллизации. С целью уменьшения глубины жидкой лунки в кристаллизатор вводят затвердевший непрерывный слиток.

На сегодняшний день нет методик расчета намораживания металла на непрерывный слиток, поэтому возникла необходимость создать такую методику и исследовать ее.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Стремление повышения качества толстого металла привело к ряду технологий: снятия температуры перегрева с помощью инокуляторов и получение слитка путем введения в жидкий металл готовых слитков того же металла для ускорения кристаллизации [1, 2].

В данное время в процессе производства металлопродукции возникла необходимость объединения непрерывного розлива с непрерывным прокатом, что дает возможность повысить продуктивность получения продукта с металла и снизить энергозатраты.

Анализируя опубликованные работы можно сделать вывод, что интенсификация отвода тепла от металла в жидкой лунке непрерывного слитка, согласно существующих теорий, возможна только за счет интенсивного отвода тепла от поверхности непрерывного слитка. Однако, понижение температуры поверхности слитка приводит к термическому растрескиванию поверхности металла, ухудшая его качество.

Решить эту проблему можно только за счет отвода теплоты фазового перехода изнутри жидкой лунки.

3. Объект, цель, задачи исследования

Объект исследования — процесс получения заготовок непрерывного литья с равномерным распределением температур по сечению слитка.

Целью исследования является определение зависимости изменения со временем температуры центра слитка и толщины намороженной корочки металла на поверхность непрерывного слитка.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- рассмотрены физические процессы, протекающие при кристаллизации непрерывного слитка;
- создана математическая модель для расчета намораживаемой корочки на закристаллизовавшийся слиток.

4. Рассмотрение физических процессов, протекающих при непрерывной разливке стали на установках вертикального и радиального типа

В начальный момент заливки жидкой стали в холодный кристаллизатор на поверхности затравки и стенках кристаллизатора происходит замораживание корочки металла. Скорость намораживания корочки изменяется по мере изменения градиента температуры у поверхности кристаллизации. Изменение последнего существенно зависит от термического сопротивления пограничного слоя, затвердевшей корочки металла и температуры стенки кристаллизатора со стороны слитка.

Нарастание толщины затвердевшей корочки становится возможным в том случае, если тепловой поток, обусловленный фазовым переходом, будет компенсироваться тепловым потоком от стенок кристаллизатора к охлаждающей воде. Установление соответствующих тепловых потоков приведет к установлению температурных полей в кристаллизаторе и слитке, и формированию теплового и гидродинамического пограничных слоев в жидком металле.

На выходе из кристаллизатора толщина затвердевшей корочки должна быть такой, чтобы выдерживать гидростатическое давление жидкого металла в нижней части кристаллизатора.

После заполнения кристаллизатора затравка начинает перемещаться, увлекая за собой затвердевшую корочку. На место, где раньше была затвердевшая корочка металла, поступает жидкий металл, а сама затвердевшая корочка перемещается в зону с новыми граничными условиями. Движение затвердевшей корочки приведет к изменению температурных полей в кристаллизаторе, корочке и жидком металле вблизи поверхности кристаллизации,

которое будет зависеть от скорости вытягивания слитка. Через промежуток времени (при постоянных скорости отвода тепла и вытягивания слитка) в каждом сечении слитка и соответствующем ему сечении кристаллизатора устанавливаются постоянные перепады температур.

По мере удаления сечения слитка от сечения кристаллизатора действие вынужденной конвекции, возникшей в процессе заполнения кристаллизатора, уменьшается и начинает превалировать естественная конвекция.

Интенсивность естественной конвекции в расплаве существенно зависит от физических свойств компонентов жидкого металла, т. е. от распределения температуры в тепловом пограничном слое, а последнее зависит от термических сопротивлений при передаче тепла от расплава к охлаждающей воде.

Результирующее термическое сопротивление складывается из термического сопротивления буферной зоны, двухфазной зоны, обогащенной ликватами, затвердевшей корочки, газового зазора между слитком и стенкой кристаллизатора, стенки кристаллизатора и термического сопротивления со стороны охлаждающей воды.

Тепловой пограничный слой формирует гидродинамический пограничный слой, который разделяет непрерывный слиток на зоны нисходящих слоев жидкого металла в гидродинамическом пограничном слое, вовлеченных в процесс теплообмена, и восходящего в центре слитка, не участвующего в процессе теплообмена. На границе контакта нисходящего в восходящего потоков возникает буферная зона, в которой происходит интенсивное перемешивание металла. В нижней части слитка из-за перестройки потока (формирование восходящего потока) происходит перемешивание металла, движущегося в гидродинамическом пограничном слое. В этой зоне происходит выравнивание концентрации примесей и температуры во всем жидком металле, поступающем из пограничного слоя в нижнюю не закристаллизовавшуюся часть слитка, вытесняя жидкий металл из центральной зоны слитка.

Конвективные потоки оказывают влияние на распределение примесей у поверхности кристаллизации (т. е. в двухфазной зоне) и в центре слитка, а, следовательно, и на формирование структурных зон непрерывного слитка.

Протяженность структурных зон (мелкозернистых кристаллов, зародившихся на поверхности кристаллизатора: столбчатых, образующихся при разрастании мелкозернистых кристаллов; равноосных, зарождающихся в центральной части слитка) и распределение в них примесей характеризует качество слитка.

Рассмотрим, чем обусловлено возникновение двухфазной зоны. В процессе кристаллизации на границе раздела фаз в результате выделения твердой фазы возникает обогащенный ликватами слой, температура кристаллизации которого ниже, чем у металла с первоначальной концентрацией примесей. Поэтому для дальнейшей кристаллизации жидкой фазы, находящейся в этом слое, необходимы еще более низкие температуры. Понижение температуры кристаллизации в слое, обогащенном ликватами, приводит к уменьшению скорости кристаллизации в нем, а рост кристалла идет в основном в зоне с пониженной концентрацией ликватов. Наличие зоны жидкого металла с различными концентрациями примесей вблизи поверхности кристаллизации и различие между их равновесными температурами в соответствующих точках слитка и распределением температуры в тепловом пограничном

слое порождает двухфазную зону, в которой одновременно присутствуют две фазы — жидкая и твердая. Процесс кристаллизации в этой зоне идет с различными скоростями, а именно в зоне, обогащенной примесями (ликватами), с меньшей скоростью, вне ее с более высокой скоростью. Поэтому в данном случае говорить о скорости кристаллизации слитка в целом не имеет смысла.

При экспериментальных исследованиях можно определить только среднеинтегральную скорость кристаллизации в предположении, что фронт кристаллизации плоский. Эта скорость всегда будет меньше, чем скорость кристаллизации с учетом затвердевшего металла в двухфазной зоне.

Двухфазная зона будет оказывать существенное влияние на термическое сопротивление слитка в целом, которое в свою очередь, влияет на распределение температуры и концентрации в двухфазной зоне, а концентрация будет влиять на ее термическое сопротивление.

В результате окончания процесса кристаллизации непрерывного слитка его температура по сечению слитка будет изменяться от температуры кристаллизации $T_{кр}$ до температуры поверхности слитка $T_{пов}$. Такой слиток невозможно совместить с машиной непрерывной прокатки. Кроме того, особенности традиционной металлургической технологии таковы, что чем толще прокат, тем ниже его пластичность, вязкость, сопротивление воздействию нагрузок, температур, давлений. Но все эти свойства оказываются неодинаковыми в разных направлениях, например, по толщине листа. Причины известны. Во-первых, толстый лист наследует от крупного литка его химическую неоднородность, а во-вторых, имевшиеся в слитке неметаллические включения вытягиваются вдоль направления прокатки, образуя строчечную структуру.

В настоящее время на установках непрерывного литья заготовок получение слитков с большим поперечным сечением очень затруднено из-за большого времени кристаллизации, а как следствие, большой протяженностью жидкой лунки. Например, при отливке слитка размером $0,5 \times 1,2$ м при скорости вытяжки $0,0083$ м/с. Согласно [3], глубина жидкой лунки будет достигать 36 м. Однако, это не основной недостаток, так как при кристаллизации такого слитка интенсивно развиваются ликвационные процессы; центральная часть слитка при этом будет иметь области крупных разориентированных кристаллов и областей зональной ликвации [4–10].

Согласно [4] рост корочки твердого металла в кристаллизаторе со временем можно записать так:

$$\delta = k\sqrt{t},$$

где δ — толщина намораживаемой корочки, м; k — коэффициент затвердевания металла (определяется экспериментально для данного металла и особенностей кристаллизатора), м/с^{1/2}; t — время кристаллизации, с.

Длину жидкой лунки, при традиционном способе разлива металла на установке непрерывной разлива стали, можно найти из условия:

$$A = 2\delta = 2k\sqrt{t} = 2k\sqrt{\frac{l_n}{\omega}},$$

где A — ширина слитка, м; l_n — глубина жидкой лунки, м; ω — скорость вытягивания слитка, м/с.

Если мы хотим получить слиток больших размеров, например $A_1 = 3A$, традиционным способом разливки стали, то глубина жидкой лунки составит:

$$l_1 = \frac{3^2 A^2 \omega}{4k^2} = 9l_{л1}$$

Следовательно, увеличивается в девять раз. Поэтому для получения слитка размером $A_1 = 3A$ и устранения вышеописанных недостатков возможно только изменением схемы непрерывной разливки стали. Такие схемы известны [3, 5]. Однако, какие-либо математические модели, описывающие процесс кристаллизации слитка по этим схемам отсутствуют.

Уменьшить глубину жидкой лунки непрерывного слитка больших размеров возможно при использовании отлитого слитка на первом уровне установки непрерывной разливки стали и введение его в непрерывный слиток, отливаемый на втором уровне этой установки — двухуровневый каскадный метод (рис. 1).

При введении непрерывного слитка из первого уровня в формирующийся слиток второго уровня на нем намораживается металл толщиной δ_{12} , а в кристаллизаторе второго уровня намораживается корочка толщиной δ_2 . В результате на выходе слитка из второго уровня установки непрерывной разливки стали, получаем слиток толщиной $\delta = 2\delta_1 + 2\delta_{12} + 2\delta_2$.

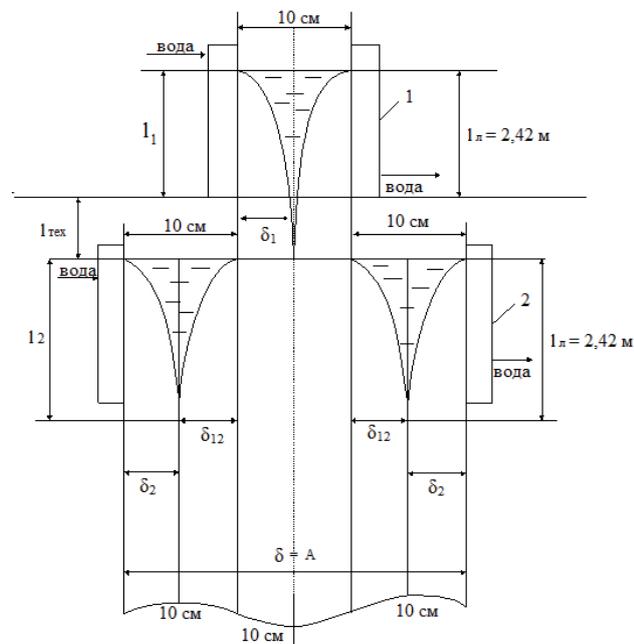


Рис. 1. Схема получения непрерывного слитка каскадным методом: 1 — первый уровень установки непрерывной разливки стали (УНРС); 2 — второй уровень УНРС; δ_1 — толщина намороженной корочки в кристаллизаторе первого уровня; δ_{12} — толщина намороженной корочки на непрерывном слитке, вышедшем из первого уровня УНРС, во второй уровень; δ_2 — толщина намороженной корочки в кристаллизаторе второго уровня УНРС; δ — результирующая толщина слитка

Так при толщине слитка 30 см на установках непрерывной разливки стали глубина жидкой лунки составляет 21,6 м, а на многоуровневой установке непрерывной разливки стали (каскадный метод) длина жидкой лунки будет равна:

$$l_{л} = 2l_1 + l_{тех},$$

$$l_1 = \frac{A^2 \omega}{4k^2} = \frac{(0,01)^2 \cdot 0,012}{4 \cdot (3,519 \cdot 10^{-3})^2} = 2,42 \text{ м,}$$

где l_1 — глубина жидкой лунки на первом и втором уровнях; $l_{тех}$ — высота технического уровня.

Тогда $l_{л} = 5,84$ м (при $k = 3,519 \cdot 10^{-3}$ м/с^{1/2}, $\omega = 0,012$ м/с, $l_{тех} = 1$ м).

Следовательно, такой способ получения непрерывного слитка дает возможность уменьшить глубину жидкой лунки слитка толщиной δ в несколько раз, по сравнению с отливкой такого слитка на одноуровневой установке непрерывной разливки стали, и улучшить однородность непрерывного слитка по сечению.

Для реализации такого способа получения слитков больших размеров необходимо исследовать, как будет вести себя слиток, полученный на первом уровне, в жидком металле второго уровня. Будем считать, что толщина намораживаемой корочки в кристаллизаторах известна из источников [4, 11, 12]. А так же известны распределение температуры по сечению слитка, вышедшего из первого уровня установки непрерывной разливки стали, температура разливаемого металла во втором уровне, скорость разливки металла ω и физические свойства жидкого и закристаллизованного металла. Необходимо решить задачу, как будет меняться толщина слитка, отлитого на первом уровне, при внесении его в жидкий металл второго уровня и определить, какие физические процессы будут протекать.

Для составления уравнений воспользуемся методикой, которая дает возможность исследовать влияние изменения отдельных физических и геометрических параметров, описывающих процесс кристаллизации, на динамику процесса кристаллизации непрерывного слитка. Она заключается в разбиении слитка на следующие зоны: полностью затвердевшего металла, двухфазную, буферную (рис. 2).

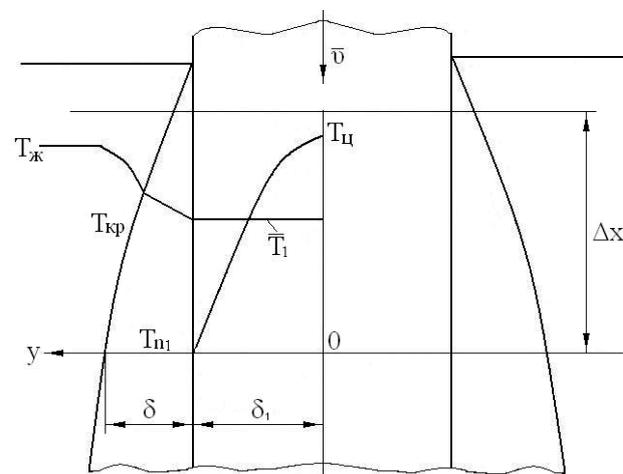


Рис. 2. Схема выделенного элемента Δx для расчета намораживания металла на непрерывный слиток: v — скорость подачи непрерывного слитка в расплавленный металл; $T_ц$ — температура в центре слитка; T_1 — среднеинтегральная температура слитка на входе в кристаллизатор; T_{n1} — температура поверхности слитка; δ — толщина намораживаемой корочки на закристаллизовавшийся слиток; δ_1 — приведенная толщина слитка

С помощью этой методики создадим математическую модель для расчета намораживаемой корочки на закристаллизовавшийся слиток [1]:

$$\Delta\delta = \frac{d\delta}{dt}\Big|_{t=0} \cdot \sqrt{\left(\beta + \frac{N_4}{N_1 \frac{d\delta}{dt}\Big|_{t=0}}\right)^2 + \frac{N_4}{\beta^2 + \omega^2}} \cdot e^{\beta t} \times \sin\left(\omega t - \arctg \frac{\omega}{\beta} + \arctg \frac{\omega}{\beta + \frac{N_4}{N_1 \frac{d\delta}{dt}\Big|_{t=0}}}\right) + \frac{N_4}{\beta^2 + \omega^2}, \quad (1)$$

где $A \times B$ – размеры вводимого слитка;

$$m_1 = [A \cdot B + (A + B)\delta + \delta^2] \cdot \rho_1 V,$$

$$M_1 = [A \cdot B + (A + B)\delta + \delta^2] \cdot \rho_1 \Delta x,$$

$$N_1 = (A + B + 2\delta)\rho_1 \Delta x \nu_1 (\delta_1 + \delta),$$

$$N_2 = (A + B + 2\delta)\rho_1 \Delta x r \left[\frac{(\delta_1 + \delta)m_1 c_1}{\lambda_1 F_1} + 1 \right] - \frac{M_1 c_1}{\lambda_1 F_1} \cdot \frac{(T_{кр} - T_{ц})}{n + 1} \left[8\Delta x - \frac{F_1}{\delta_1 + \delta} \right],$$

$$N_3 = \frac{m_1 c_1}{\lambda_1 F_1} \cdot \frac{(T_{кр} - T_{ц})}{n + 1} \left[8\Delta x - \frac{F_1}{\delta_1 + \delta} \right],$$

$$N_4 = \alpha_{ж} F_1 (T_{ж} - T_{кр}) \left[\frac{\delta_1 + \delta}{n + 1} \cdot \frac{m_1 c_1}{\lambda_1 F_1} + 1 \right],$$

c_1 – удельная теплоемкость на поверхности слитка, Дж/(кг · К); $\alpha_{ж}$ – коэффициент теплоотдачи жидкого металла, Дж/(м² · с · К); F_1 – наружная поверхность слитка, м²; $T_{кр}$ – температура кристаллизации, К; $\delta_1 = \frac{2A \cdot B}{A + B}$ – приведенная толщина слитка; δ – толщина затвердевшей корочки, м; λ_1 – коэффициент теплопроводности жидкого металла в граничном слое, Дж/(м · К); ρ_1 – плотность затвердевшего металла, кг/м³; n – коэффициент пропорциональности; ν_1 – скрытая теплота затвердевания ккал/кг.

Используя выражение:

$$N_1 \frac{d\Delta\delta}{dt} + N_2 \Delta\delta + K_1 = 0,$$

найдем величину:

$$\frac{d\Delta\delta}{dt} = \frac{d\delta}{dt}\Big|_{t=0} \sqrt{\left(\beta + \frac{N_4}{N_1 \frac{d\delta}{dt}\Big|_{t=0}}\right)^2 + \frac{N_4}{\beta^2 + \omega^2}} + \omega^2 e^{\beta t} \left[\begin{aligned} &\beta \sin\left(\omega t + \arctg \frac{\omega}{\beta} + \arctg \frac{\omega}{\beta + \frac{N_4}{N_1 \frac{d\delta}{dt}\Big|_{t=0}}}\right) + \\ &\omega \cos\left(\omega t - \arctg \frac{\omega}{\beta} + \arctg \frac{\omega}{\beta + \frac{N_4}{N_1 \frac{d\delta}{dt}\Big|_{t=0}}}\right) \end{aligned} \right]. \quad (2)$$

5. Результаты исследования температуры внутри слитка и намораживаемой корочки

Результаты расчета по изложенной методике приведены на рис. 3 и могут быть использованы для расчета многослойного непрерывного слитка.

Предположенная технология получения крупных непрерывных слитков, базирующаяся на предлагаемой математической модели, позволяет увеличить скорость разлива металла, уменьшить весогабаритные характеристики машины непрерывного литья заготовок, улучшить качество слитка, уменьшает результирующее время кристаллизации и глубину жидкой лунки.

На рис. 4 представлена зависимость толщины намораживаемого металла на закристаллизовавшийся слиток из предыдущего кристаллизатора в последующий от температуры перегрева и времени полной кристаллизации.

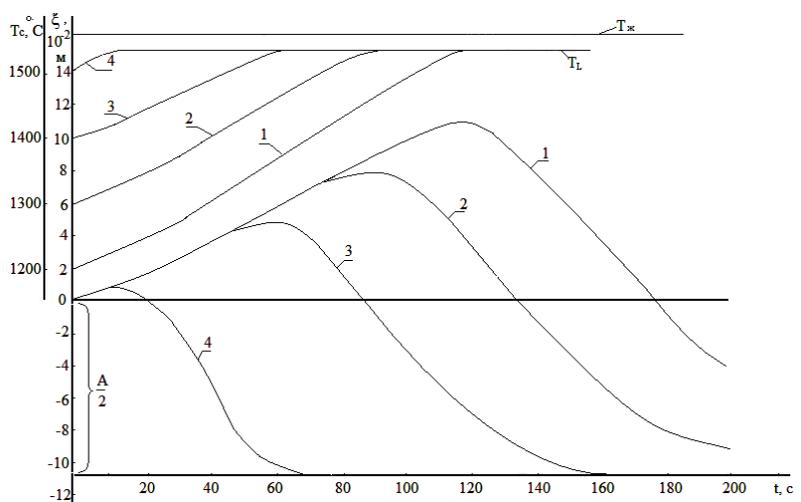


Рис. 3. Изменение со временем температуры центра слитка $A \times B = 0,2 \times 0,3$ м; скорость подачи металла в расплав $\nu = 0,01$ м/с; $T_{ж} = 1560$ °C, $T_{кр} = 1535$ °C (при $t = 0$); 1 — $T_c = 1200$ °C; 2 — $T_c = 1300$ °C; 3 — $T_c = 1400$ °C; 4 — $T_c = 1500$ °C

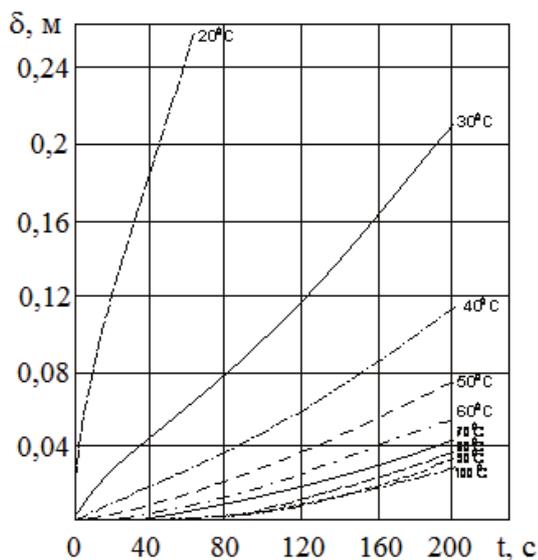


Рис. 4. Зависимость толщины намораживаемого металла на слиток, поступающий из первого уровня УНРС на второй уровень от температуры перегрева и времени кристаллизации для слитка размером $A \times B = 0,2 \times 0,3$ м

Из этих графиков следует, что при больших температурах перегрева жидкого металла на втором уровне УНРС (от 60 °С до 100 °С) толщина намораживаемой корочки практически мало зависит от больших температур перегрева.

6. Обсуждение результатов исследования непрерывной разливки каскадным методом

Разработана математическая модель намораживания металла на закристаллизовавшийся слиток, который используется для обеспечения кристаллизации жидкого металла в центральной части разливаемого непрерывного слитка. Введение в кристаллизатор уже закристаллизованный слиток способствует увеличению скорости разливки металла, уменьшение весогабаритных характеристик машины непрерывной разливки, а также уменьшается время кристаллизации и глубина жидкой лунки. Эта методика приводит к уменьшению энергозатрат, так как по результатам исследования (представленные графики) намораживаемая корочка практически не зависит от температуры перегрева жидкого металла в лунке. В результате каскадного метода кристаллизации металла улучшается однородность непрерывного слитка по сечению, что повышает качество металла.

Данные методики усовершенствованы, а также усовершенствованы физические и математические модели процессов тепло-, массообмена.

7. Выводы

В результате проведенных исследований построена математическая модель намораживания металла на закристаллизовавшийся слиток при непрерывном литье, которая дает возможность увеличить скорость кристаллизации и получить непрерывный слиток более высокого качества. При этом сократить энергозатраты. Приведена формула расчета глубины жидкой лунки.

Для создания непрерывного слитка с равномерным распределением температуры и структуры по его сечению, необходимо создание условий для организации объемной кристаллизации слитка (т. е. необходимость отвода теплоты фазового перехода металла непосредственно из внутреннего объема жидкого металла непрерывного слитка с использованием микрохолодильников в виде гранул). Для этого необходимо знать продолжительность существования микрохолодильников различных размеров в расплаве, время, за которое на них намораживается максимальная толщина корочки (технологические параметры) в зависимости от физических свойств металла и температуры разливки.

Разработанные методики могут быть использованы при разработке нового класса машин непрерывного литья. Спроектированные установки непрерывной разливки стали по предлагаемой математической модели позволяют существенно снизить материальные и временные затраты при производстве металлопродукта.

Литература

1. Мочалов, А. А. Математическая модель намораживания металла на закристаллизовавшийся слиток [Текст] / А. А. Мочалов, К. Д. Евфимко, Н. А. Шаповал // Процессы литья. — Киев, 2010. — № 3. — С. 24–29.
2. Мочалов, А. А. Интенсификация процесса кристаллизации непрерывного слитка [Текст] / А. А. Мочалов, К. Д. Евфимко, Н. А. Шаповал // Процессы литья. — Киев, 2009. — № 6. — С. 50–53.
3. Баптизмамский, В. И. Разливка стали [Текст] / В. И. Баптизмамский. — Киев-Донецк: Вища школа, 1977. — 197 с.
4. Беляев, Н. М. Математическое моделирование нелинейных задач теплопроводности с подвижными границами расчетной области [Текст] / Н. М. Беляев, Н. М. Барабаш // Математические методы теплообмена. — 1979. — № 1. — С. 30–43.
5. Герман, Э. Непрерывное литье [Текст] / Э. Герман. — М.: Металлургиздат, 1960. — 228 с.
6. Дубовенко, И. П. Физические основы кристаллизации непрерывного слитка и пути дальнейшего развития непрерывной разливки стали [Текст] / И. П. Дубовенко, Д. А. Дюдкин, Н. А. Семенцов, Ю. П. Дубовенко, А. В. Мартынов // Металлургические методы повышения качества стали. АН СССР. — М.: Наука, 1979. — С. 181–184.
7. Михнова, Э. А. Ликвация в квадратных слитках при разливке на радиальной МНЛЗ [Текст] / Э. А. Михнова, В. Т. Сладкошпеев, В. Б. Добровольский // Непрерывное литье стали. — М., 1976. — № 3. — С. 169–170.
8. Павлюченков, И. А. Решение сопряженных задач затвердевания отливок с принудительным охлаждением [Текст] / И. А. Павлюченков // Математические методы теплообмена. — 1979. — С. 44–49.
9. Talmon, Y. Progressive freezing of composites analyzed by isotherm migration methods [Text] / Y. Talmon, H. T. Davis, L. E. Scriven // AIChE Journal. — 1981. — Vol. 27, № 6. — P. 928–937. doi:10.1002/aic.690270608
10. Talmon, Y. Analysis of Propagation of Freezing and Thawing Fronts [Text] / Y. Talmon, H. T. Davis // Journal of Food Science. — 1981. — Vol. 46, № 5. — P. 1478–1488. doi:10.1111/j.1365-2621.1981.tb04202.x
11. Розенфельд, С. Е. О методах динамического воздействия на кристаллизацию отливки [Текст] / С. Е. Розенфельд, С. Б. Юдин, М. М. Левин // Литейное производство. — М., 1957. — № 11. — С. 24–26.

12. Сладкошteeв, В. Т. Непрерывная разливка стали в УССР и зарубежом [Текст] / В. Т. Сладкошteeв, Р. В. Потанин, М. С. Гордиенко, Л. Т. Куценко. — К.: УкрНИИНТИ, 1968. — С. 3-55.

ОПИС ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО ПРОТІКАЮТЬ ПРИ КРИСТАЛІЗАЦІЇ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЗЛИВКА

У статті подано опис процесів, що протікають при безперервному розливі сталі. Наведена формула розрахунку глибини рідкої лунки. Розглянуто каскадний метод отримання безперервного злитка. Представлена математична модель інтенсифікації процесу кристалізації за рахунок наморозування металу на безперервний закристалізований злиток.

Ключові слова: кристалізація, буферна зона, затверділа корка, кристалізатор, безперервний злиток, двофазна зона.

Мочалов Александр Александрович, доктор технических наук, директор Института заочного и дистанционного образования,

заведующий кафедрой физики, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина.

Шапoвал Наталья Александровна, кандидат технических наук, доцент, кафедра физики, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: shapovalnatasha1@rambler.ru.

Мочалов Александр Александрович, доктор технических наук, директор Института заочной та дистанційної освіти, завідувач кафедри фізики, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв, Україна.

Шапoвал Наталья Александровна, кандидат технических наук, доцент, кафедра физики, Национальный университет кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв, Україна.

Mochalov Aleksandr, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine.

Shapoval Natalia, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: shapovalnatasha1@rambler.ru