

УДК 669.18.621.746.5.047.061.62

А. В. Ноговицын, З. Л. Козлова, В. Н. Баранова, А. С. Дядюра

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК В МНЛЗ, ОТЛИВАЕМЫХ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

Разработана методика, позволяющая определить основные характеристики затвердевания металла в кристаллизаторе: количество тепла, отведенного от поступающей в кристаллизатор стали, массу затвердевшего металла во время его пребывания в кристаллизаторе и толщину корковой оболочки на выходе из кристаллизатора.

Ключевые слова: МНЛЗ, кристаллизатор, тепло- массообмен, электромагнитное перемешивание, заготовка.

Розроблено методику, що дозволяє визначити основні характеристики твердіння металу в кристалізаторі: кількість тепла, відведеного від сталі, що надходить в кристалізатор, масу металу, що затвердів під час його перебування в кристалізаторі та товщину затверділої коркової оболонки на виході з кристалізатора.

Ключові слова: МБЛЗ, кристалізатор, тепло- масообмін, електромагнітне перемішування, заготовка.

A method that allows to identify the main characteristics of solidification of the metal in the mold: the amount of heat extracted from doing the mold-ing in steel, hardened mass of metal in the mold during his stay in the mold and solidified thickness of the cortical shell at the outlet of the mold.

Keywords: continuous casting machine, crystallizer, heat and mass transfer, electromagnetic stirring, the workpiece.

Введение

Улучшение качества непрерывнолитой заготовки может быть достигнуто применением внешних воздействий на затвердевающий металл, в частности, электромагнитного перемешивания жидкой фазы затвердевающего слитка [1-5]. Самое широкое применение в практике черной металлургии получило электро-

магнитное перемешивание металла в кристаллизаторе МНЛЗ, где формируется первичная корковая оболочка непрерывнолитой заготовки в результате отвода от расплава тепла охлаждающей кристаллизатор водой. Основной задачей является получение необходимой одинаковой по периметру сечения заготовки толщины корки, имеющей достаточную прочность, чтобы противостоять гидростатическому напору жидкой лунки, силам трения между оболочкой и стенками кристаллизатора.

Цель настоящей работы – анализ и установление основных параметров тепло-массообменных процессов, протекающих в кристаллизаторе, имеющих определяющее значение при формировании непрерывнолитой заготовки в кристаллизаторе МНЛЗ.

Методика расчетов и полученные результаты

Тепло, вносимое поступающей из промежуточного ковша жидкой сталью, расходуется на различных этапах формирования заготовки в МНЛЗ [6]

$$Q_M^u = Q_{кр} + Q_{вт} + Q_{воз} + Q_{пот} + Q_{M}^{yx}, \quad (1)$$

где Q_M^u – тепло, вносимое жидкой сталью, поступающей из промежуточного ковша; $Q_{кр}$ – тепло, отведенное в кристаллизаторе; $Q_{вт}$ – тепло, отведенное в зоне вторичного охлаждения; $Q_{воз}$ – тепло, отведенное в результате охлаждения заготовки на воздухе; $Q_{пот}$ – тепло, уходящее на нагрев металлоконструкции; Q_{M}^{yx} – тепло заготовок после их удаления из МНЛЗ.

Интересующая нас компонента $Q_{кр}$ определяется из выражения

$$Q_{кр} = G_B \cdot c_B \cdot \Delta t_B \cdot \tau, \quad (2)$$

где G_B – расход воды на охлаждение кристаллизатора; c_B – удельная теплоемкость воды; Δt_B – перепад температуры охлаждающей воды на выходе и входе в кристаллизатор; τ – время пребывания металла в кристаллизаторе.

Отведенное в кристаллизаторе тепло $Q_{кр}$ включает в себя

$$Q_{кр} = Q_{пер} + Q_{кор}, \quad (3)$$

где $Q_{пер}$ – тепло перегрева стали над $t_{л}$, поступающей в кристаллизатор; $Q_{кор}$ – тепло, которое необходимо отвести для формирования корки.

$$Q_{пер} = m_{кр} c_{ж} (t_{пк} - t_{л}), \quad (4)$$

где $m_{кр}$ – масса столба металла в кристаллизаторе высотой от мениска до нижнего среза кристаллизатора; $c_{ж}$ – теплоемкость жидкой стали; $t_{пк}$ – температура металла в промежуточном ковше; $t_{л}$ – температура ликвидус.

$$m_{кр} = S \cdot h_a \cdot \rho, \quad (5)$$

где S – площадь поперечного сечения полости кристаллизатора; h_a – активная высота кристаллизатора (расстояние от мениска до нижнего среза кристаллизатора); ρ – удельный вес пребывающего в кристаллизаторе металла.

$$Q_{кор} = m_3 [(q + c_{ж} (t_{пк} - t_{л}) + c_m (t_{л} - t_{об}))], \quad (6)$$

где m_3 – масса затвердевшей корковой оболочки; q – удельная скрытая теплота кристаллизации; c_m – теплоемкость затвердевшей стали; $t_{об}$ – средняя температура затвердевшей корки.

Исходя из вышеизложенного, уравнение теплового баланса в кристаллизаторе для рассматриваемой массы $m_{кр}$ может быть представлено в следующем виде:

$$m_3 [q + c (t_{нк} - t_{л}) + c_{нс} (t_{л} - t_{об})] + n Q_{пер} = Q_{кр} = Q_{в} c_{в} \Delta t_{в} \tau, \quad (7)$$

где n – доля тепла перегрева 0,25.

Из уравнения (7) определяются масса и толщина затвердевшей корки слитка

$$m_3 = \frac{Q_b c_b \Delta t_b \tau - n m_{кр} c_{ж} (t_{нк} - t_{л})}{q + c_{ж} (t_{нк} - t_{л}) + c_{м} (t_{л} - t_{об})}. \quad (8)$$

Массу m и толщину корки δ для квадратной заготовки определяли, исходя из следующей зависимости:

$$m = D^2 \rho_{ср} h_a - D_1^2 \rho_{ж} h_a, \quad (9)$$

где m – масса затвердевшей оболочки; D – толщина заготовки; $\rho_{ср}$, $\rho_{ж}$ – удельный вес, средний для находящейся в кристаллизаторе заготовки и жидкой стали; D_1 – средняя толщина расплавленной лунки в кристаллизаторе.

$$D_1 = D - 2 \delta_{ср}, \quad (10)$$

где $\delta_{ср}$ – средняя толщина затвердевшей в кристаллизаторе корковой оболочки.

Зная закономерность нарастания корки затвердевшего металла в кристаллизаторе, получим

$$2 \delta_{ср} = \delta_{кр}, \quad (11)$$

где $\delta_{кр}$ – толщина корковой оболочки на выходе из кристаллизатора.

Подставив в выражение (10) соответствующие значения, получим уравнение для определения толщины корковой оболочки на выходе из кристаллизатора для квадратной заготовки сечением 130x130 мм

$$66,5 \delta^2 - 172,9 \delta + 1,2 + m = 0. \quad (12)$$

На криволинейной МНЛЗ ЗАО «Донецкий электрометаллургический завод» были выполнены исследования теплофизических процессов, происходящих при непрерывной отливке сортовых заготовок сечением 130x130 мм из среднеуглеродистой стали. Заготовки отливали в гильзовый кристаллизатор высотой 1000 мм [7, 8]. При выполнении НИР использовалась информация, полученная на АСУ ТП, в том числе данные измерений температуры стали в промежуточном ковше, скорости разливки, уровня металла в кристаллизаторе, расхода воды, охлаждающей кристаллизатор, и температуры этой воды на входе и выходе из кристаллизатора.

Об интенсивности тепловых процессов, протекающих в кристаллизаторах МНЛЗ на шести ручьях, судили по величине удельного теплоотвода q , определенного расчетами (тепло, отводимое от одного килограмма металла за время его пребывания в кристаллизаторе), измеряемого из зависимости

$$q_{кр} = Q_{кр} / m_{кр}, \quad (13)$$

где $m_{кр}$ – масса находящейся в кристаллизаторе заготовки.

Другим важнейшим фактором, характеризующим процесс формирования непрерывнолитой заготовки, было определение количества (массы) затвердевшей

в кристаллизаторе твердой фазы и толщины затвердевшей корковой оболочки слитка на выходе его из кристаллизатора. Эти величины определяли, используя зависимость (8) и решая уравнение (12). Результаты исследований приведены на рис. 1-3, из которых следует, что, несмотря на близкую скорость разливки на отдельных ручьях стали и одинаковый расход воды на охлаждение кристаллизатора, величина удельного теплоотвода в кристаллизаторе на разных ручьях колебалась в заметных пределах. При этом следует отметить рост теплоотбора в кристаллизаторе с повышением температуры металла в промежуточном ковше. Это свидетельствует о том, что в кристаллизаторе происходит значительное погашение теплоты перегрева жидкой фазы стали над температурой ликвидуса.

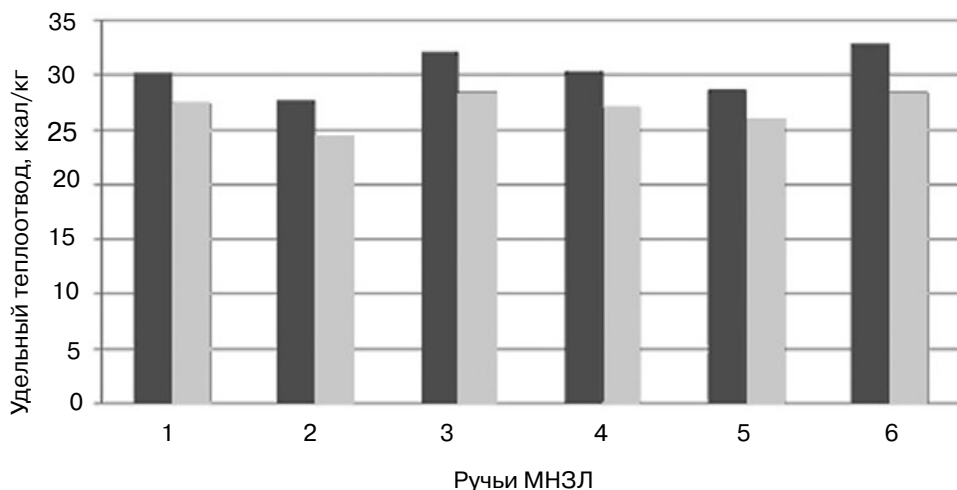


Рис. 1. Максимальный и минимальный удельный теплоотвод в кристаллизаторе МНЗЛ на разных ручьях

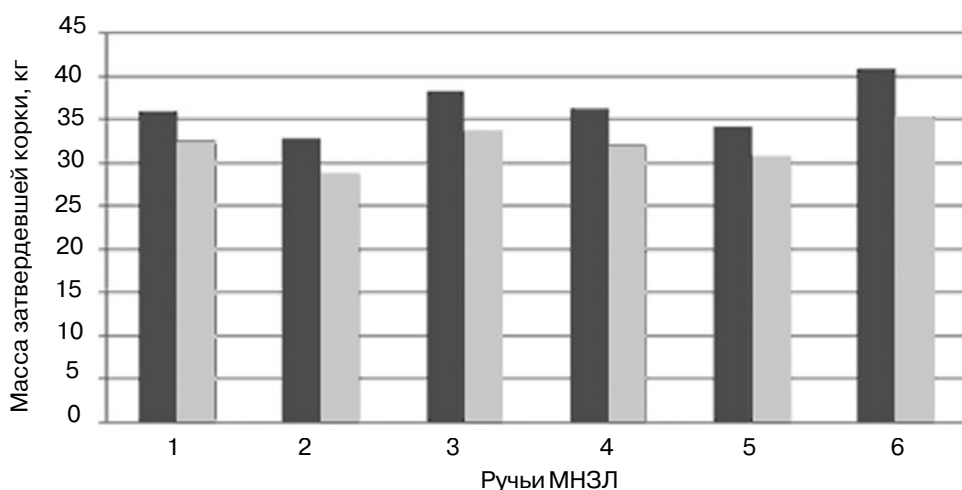


Рис. 2. Максимальная и минимальная масса затвердевшего в кристаллизаторе МНЗЛ металла на разных ручьях

Разброс приведенных показателей свидетельствует об индивидуальных условиях формирования заготовки на каждом ручье МНЗЛ. В связи с этим целесообразно учитывать состояние слитка на выходе из кристаллизатора при назначении режимов охлаждения заготовки в зоне вторичного охлаждения.

Для изучения влияния интенсивности электромагнитного перемешивания металла в кристаллизаторе на тепло- и массообменные процессы была исследована

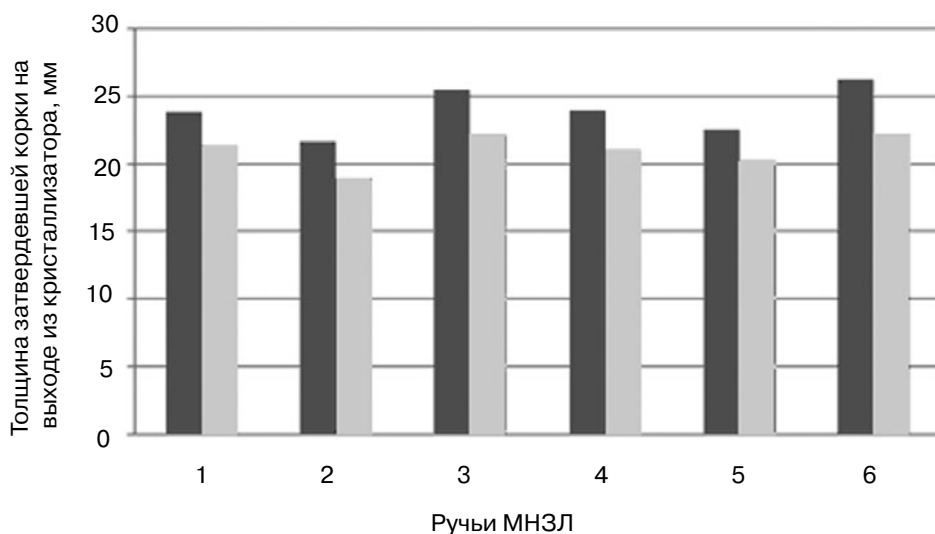


Рис. 3. Максимальная и минимальная толщина затвердевшей корки на выходе из кристаллизатора МНЗЛ на разных ручьях

отливка заготовок сечением 130x130 мм на шестом ручье. Все заготовки этой серии отлиты с применением одного кристаллизатора и промежуточного ковша. Скорость разливки для разных плавков колебалась в пределах 2,53-2,64 м/мин, а сила тока, подаваемого на ЭМП, составляла 182-443 А.

Используя данные АСУ ТП, по вышеприведенной методике были рассчитаны параметры (интенсивность теплоотвода, масса затвердевшей оболочки и ее толщина на выходе из кристаллизатора), определяющие процесс формирования непрерывнолитой заготовки для каждой плавки. Параметры литья и результаты расчетов приведены в таблице и на рис. 4-6.

Параметры литья и формирования заготовок на шестом ручье

Номер плавки	1	2	3	4
Скорость разливки, м/мин	2,64	2,63	2,59	2,54
Сила тока перемешивания, пер. А	443	352	343	182
Перепад температуры воды, охлаждающей кристаллизатор на входе и выходе из него, °С	5,70	5,50	5,30	5,05
Удельный теплоотбор в кристаллизаторе, ккал/кг	32,39	31,37	30,69	29,82
Масса твердой фазы, кг	40,12	38,86	38,03	36,95

Приведенные в таблице и на рис. 5-6 данные свидетельствуют о том, что повышение интенсивности перемешивания расплавленного металла в кристаллизаторе способствует увеличению интенсивности теплоотвода и соответственно массы затвердевшей фазы и толщины корковой оболочки. Так, с повышением силы тока, подаваемого на ЭМП от 182 до 443 А, интенсивность теплоотвода, а вместе с ней масса затвердевшей фазы и толщины корки увеличиваются более чем на 10 %.

Повышение интенсивности теплоотвода в кристаллизаторе МНЛЗ при электромагнитном перемешивании связано с тем, что возбуждаемые при этом турбулентные потоки способствуют повышению температуры металла на фронте затвердевания, а это снижает величину зазора между корковой оболочкой и стенками кристаллиза-

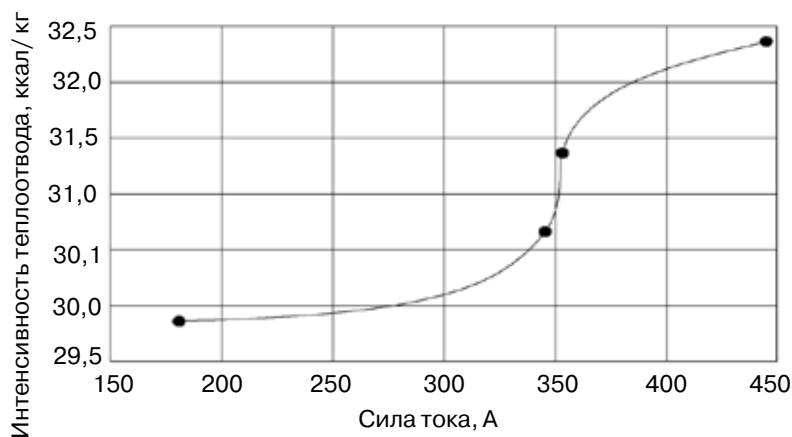


Рис. 4. Влияние силы тока, подаваемого на ЭМП, на интенсивность теплоотода в кристаллизаторе

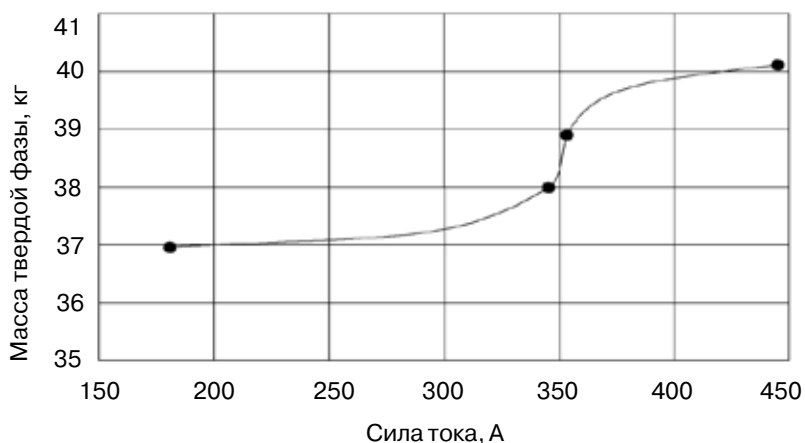


Рис. 5. Влияние силы тока, подаваемого на ЭМП, на массу затвердевшей фазы в кристаллизаторе МНЗЛ

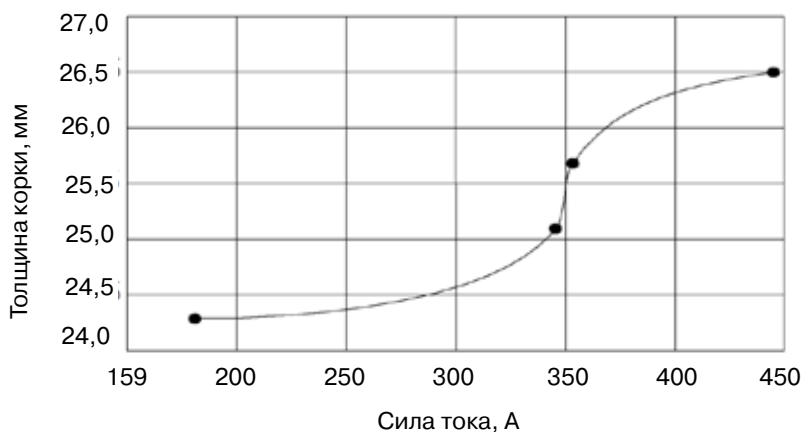


Рис. 6. Влияние силы тока, подаваемого на ЭМП, на толщину затвердевшей в кристаллизаторе МНЗЛ корковой оболочки

тора, повышается также температурный градиент между фронтом затвердевания и поверхностью заготовки.

Осмотр поверхности заготовок опытных плавков показал, что возбуждаемые ЭМП потоки способствуют повышению температуры на мениске металла в кристаллизаторе, что приводит к улучшению качества поверхности заготовки.

Электромагнитное перемешивание обеспечивает равномерную толщину корковой оболочки на выходе из кристаллизатора по периметру ее поперечного сечения и этим, как показал контроль размеров диагоналей поперечного сечения заготовки, практически устраняет ромбичность.

Полученные данные исследований показали, что количество образовавшейся в кристаллизаторе твердой фазы позволяет повысить скорость разлива на 10-15 %, то есть скорость непрерывного литья заготовок сечением 130x130 мм должна быть не ниже 3,1 м/мин.

Выводы

Таким образом, используя разработанную методику, можно определить интенсивность теплоотвода в кристаллизаторе, массу затвердевшей в нем твердой фазы и толщину затвердевшей корковой оболочки.

Установлено, что непрерывную разливку среднеуглеродистой стали с применением электромагнитного перемешивания металла в кристаллизаторе целесообразно вести со скоростью не ниже 3,1 м/мин.

Показано, что повышение интенсивности электромагнитного перемешивания стали в кристаллизаторе активизирует тепло- и массообменные процессы. Так, увеличение тока, подаваемого на перемешиватель с 182 до 443 А, обеспечивает увеличение количества затвердевшей фазы и толщины затвердевшей корки более чем на 10 %.



Список литературы

1. Теория и практика непрерывного литья заготовок / А. Н. Смирнов, А. Я. Глазков, В. Л. Пилюшенко и др. – Донецк: ДонГТУ, 2000. – 370 с.
2. Ефимов В. А., Эльдарханов А. С. Физические методы воздействия на процесс затвердевания сплавов. – М.: Металлургия, 1995. – 272 с.
3. Milki Y. Applications of MHD to Continuons Casting of Steel //The 5th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials "EPM 2006". – October 23-27, 2006. – Sendai, Japan. – P. 845-849.
4. Carlsson C., Lindevall H., Sjoden O. Improved Steel Quality and Reduced Production Costs by Electromagnetic Stirring in Continuons Casting and Ladle Redining // XXXIV Seminaeio de Fusao, Refino e Solidificacao does Metals, Belo Horisonte, Brasil, 19-21 May, 2003. – P. 1-14.
5. Eidem M., Hacki H., Kollberg S., Tallback G. Применение устройств электромагнитного перемешивания (EMS) и установок электромагнитного торможения (EMBR) при производстве стали // Междун. конф. по черной металлургии России и стран СНГ в XXI веке: Сб. научн. тр. – М.: Металлургия, 1994. – Т. 2. – С. 231-238.
6. Емельянов В. А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок. – М.: Металлургия, 1998. – 143 с.
7. Освоение производства непрерывнолитой заготовки на высокоскоростной шестиручьевой МНЛЗ / Х. С. Раза, Г. И. Касьян, В. Г. Осипов и др. //Металл и литье Украины. – 2001. – № 5-6. – С. 19-21.
8. Отливка заготовок квадратного и круглого сечения на МНЛЗ в условиях ЭСПЦ ЗАО «ММЗ «ИСТИЛ (Украина)» / Х. С. Раза, Г. И. Касьян, В. И. Сирченко и др. // Там же. – 2006. – № 1. – С. 20-23.

Поступила 04.04.2014