

Р. Я. Якобше, А. А. Кучаев, Е. Н. Нагорная, Г. И. Касьян*, А. В. Волков*

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

*ЗАО «Донецкий электрометаллургический завод», Донецк

Исследование тепловой работы кристаллизаторов МНЛЗ при непрерывной отливке круглых заготовок с электромагнитным перемешиванием

Выполнены исследования тепловой работы кристаллизаторов шестиручьевого МНЛЗ для непрерывного литья круглых заготовок диаметрами 150 и 180 мм из низкоуглеродистой стали. Исследовано влияние технологических параметров МНЛЗ на распределение тепловых потоков по ручьям в гильзовых кристаллизаторах при электромагнитном перемешивании жидкой стали.

Ключевые слова: теплообмен, кристаллизатор, круглая заготовка, сталь, МНЛЗ, электромагнитное перемешивание

Введение

Одним из основных узлов сортовой МНЛЗ является кристаллизатор. В нем формируется первичная оболочка непрерывнолитой заготовки за счет отвода тепла от расплава стали, охлаждающей кристаллизатор водой [1, 2].

Геометрические параметры кристаллизатора МНЛЗ должны обеспечить равномерное охлаждение и формирование корки заготовки, а также исключить искажение конфигурации заготовки (ромбичность, овальность), которые являются определяющими факторами качества заготовок. Поэтому от конструкции кристаллизатора существенно зависят как качество заготовки, так и производительность МНЛЗ [3].

Кристаллизаторы, предназначенные для непрерывного литья сортовых заготовок, изготавливают из материала, имеющего высокие теплопроводность и температуру разупрочнения, обеспечивающего поддержание стабильных геометрических размеров и длительную стойкость гильзы [4].

Для улучшения качества непрерывнолитых заготовок и проката из них применяют электромагнитное перемешивание расплава стали в кристаллизаторе МНЛЗ.

В настоящей работе приведены результаты исследований тепловой работы многоконусных гильзовых кристаллизаторов криволинейного типа при разливе низкоуглеродистой стали марки Ст20 на шестиручьевого МНЛЗ АО «Донецкий электрометаллургический завод», оснащенной электромагнитными перемешивателями (ЭМП). Для исследования влияния перемешивания на теплообменные процессы в кристаллизаторе были проведены расчеты интенсивности теплоотвода в кристаллизаторах по ручьям при отливке серии плавов из низкоуглеродистой стали марки Grade B. Для расчета использовались паспортные данные плавов, полученные на АСУ ТП МНЛЗ.

Исследование влияния электромагнитного перемешивания на теплообменные процессы, протекающие в кристаллизаторе
Формирование непрерывнолитой заготовки со-

провождается тепломассообменными процессами, протекающими в кристаллизаторе МНЛЗ. Вносимое тепло жидкой стали, поступающей из промежуточного ковша, расходуется на различных этапах формирования заготовки в МНЛЗ [5]

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

где Q_M^H – 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 металлоконструкций МНЛЗ; Q_M^{yx} – тепло заготовок, вытягиваемых на МНЛЗ.

Первичная корка непрерывнолитой заготовки формируется в результате отвода от расплава тепла водой, охлаждающей кристаллизатор. Толщина затвердевшей в кристаллизаторе корки должна обеспечить ее достаточную прочность, чтобы противостоять гидростатическому напору жидкой лунки и силам трения между оболочкой и стенками кристаллизатора [6]. Корковая оболочка в значительной мере определяет качество заготовки.

Для анализа теплообменных процессов в кристаллизаторе рассмотрим объем металла за время его прохождения от мениска до нижнего среза кристаллизатора. Масса этого металла может быть определена из следующей зависимости:

$$m_{кр} = Sh_a \rho, \quad (2)$$

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

Количество тепла, уносимое из кристаллизатора охлаждающей водой, определяется из выражения

$$Q_{кр} = G_B c_B \Delta t_B \tau, \quad (3)$$

где G_B – расход воды на охлаждение кристаллизатора; c_B – теплоемкость воды; Δt_B – перепад температуры воды, охлаждающей кристаллизатор; τ – время про-

*В работе принимали участие В. Н. Баранова (ст. научн. сотрудник), О. И. Майко (зав. сектором), З. Л. Козлова (вед. инженер)

Зависимость удельного теплоотода в кристаллизаторе от температуры стали в промежуточном ковше для заготовок диаметром 180 мм (Ст20, C = 0,19 %), отлитых при токе 300 А в обмотке ЭМП

Температура жидкой стали в промковше, °С	Удельный теплоотвод в кристаллизаторе, $q_{кр}$, кДж/кг					
	1-й ручей	2-й ручей	3-й ручей	4-й ручей	5-й ручей	6-й ручей
1542	90,77	90,77	88,58	81,92	88,77	86,36
1548	98,58	94,10	89,62	82,05	91,84	87,36
1550	96,04	95,84	94,33	91,52	94,66	91,27
1551	96,40	94,27	94,27	85,02	96,01	92,09
1552	98,92	99,29	92,13	79,79	94,35	88,45
1553	100,63	88,83	85,60	84,93	95,52	92,30
1555	98,20	96,74	95,44	85,02	95,78	91,25
1556	103,60	101,18	96,36	84,31	94,56	93,93
1557	102,10	101,85	99,63	90,04	96,82	94,14

текания металла через кристаллизатор (время затвердевания корки).

Отведенное в кристаллизаторе тепло $Q_{кр}$ расходуется на отвод части тепла перегрева металла и формирование затвердевшей корковой оболочки непрерывнолитого слитка

$$Q_{кр} = Q_{пер} + Q_{кор}, \quad (4)$$

где $Q_{пер}$ – тепло перегрева стали, поступающей в кристаллизатор; $Q_{кор}$ – тепло, необходимое для формирования корки.

$$Q_{пер} = m_{кр} c_{ж} (t_{пк} - t_{л}), \quad (5)$$

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

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

где m_3 – масса затвердевшей корковой оболочки; q – удельная скрытая теплота кристаллизации; $c_{т}$ – 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:

$$m_3 [q + c_{ж} (t_{пк} - t_{л}) + c_{т} (t_{л} - t_{об})] + n Q_{пер} = G_B c_B \Delta t_B \tau, \quad (7)$$

где n – доля тепла перегрева 0,25 [6].

Из уравнения (8) определяются масса и толщина затвердевшей корки слитка

$$m_3 = \frac{G_B c_B \Delta t_B \tau - n m_{кр} c_{ж} (t_{пк} - t_{л})}{q + c_{ж} (t_{пк} - t_{л}) + c_{т} (t_{л} - t_{об})}. \quad (8)$$

На МНЛЗ были выполнены исследования теплообменных процессов при непрерывной отливке круглых заготовок диаметрами 150 и 180 мм из низкоуглеродистых сталей с электромагнитным перемешиванием. Заготовки отливали в гильзовом кристаллизаторе высотой 780 мм [7]. При выполнении работы использовалась информация, полученная на АСУ ТП, в том числе данные измерений температуры стали в промежуточном ковше, скорости разливки, уровня металла в кристаллизаторе, расхода воды на охлаждение кристаллизатора и температуры воды на входе и выходе из кристаллизатора. Разливка всех исследуемых плавок на заготовки велась с небольшим различием в скорости разливки на каждом ручье и при постоянном расходе воды, охлаждающей кристаллизатор.

Об интенсивности тепловых процессов, протекающих в кристаллизаторах МНЛЗ на шести ручьях, судили по величине удельного теплоотода $q_{кр}$, который определили из зависимости

$$q_{кр} = Q_{кр} / m_{кр}. \quad (9)$$

Результаты исследований приведены в табл. 1, 2 и на рис. 1, 2. Из этих данных следует, что при одинаковой скорости разливки стали и постоянном расходе воды на охлаждение кристаллизаторов величина удельного теплоотода в кристаллизаторах находилась в пределах 79,790-103,60 кДж/кг (табл. 1).

Таблица 2

Данные о непрерывнолитых заготовках диаметром 150 мм (Grade B, C = 0,18 %), отлитых с различными токами (200-500 А) в обмотке ЭМП

Технические параметры	Номер темплета			
	1	2	3	4
Температура стали в промковше, °С	1551	1551	1551	1551
Скорость разливки, м/мин	2,35	2,15	2,10	2,20
Масса стали в кристаллизаторе, кг	94,12	94,12	94,12	94,12
Время пребывания стали в кристаллизаторе, мин	0,31	0,34	0,35	0,33
Удельный теплоотвод в кристаллизаторе, кДж/кг	104,58	100,88	116,72	113,4
Расчетная масса твердой фазы, кг	23,26	21,88	25,08	24,73
Расчетная толщина корки на выходе из кристаллизатора, мм	14,9	13,9	16,1	15,9
Расчетный коэффициент затвердевания, см/мин ^{0,5}	2,66	2,40	2,71	2,94
Полное время затвердевания заготовки, мин	7,96	9,78	7,17	6,51
Ток ЭМП, А	200	300	400	500

При этом следует отметить рост теплоотода в кристаллизаторе с повышением температуры металла в промежуточном ковше.

Используя приведенные выражения, были выведены зависимости для определения толщины затвердевшей корки за время нахождения металла в кристаллизаторе. Толщина корки заготовки δ на выходе из кристаллизатора определяется с учетом массы затвердевшей корки, конфигурации кристаллизатора и жидкой лунки исходя из следующих зависимостей:

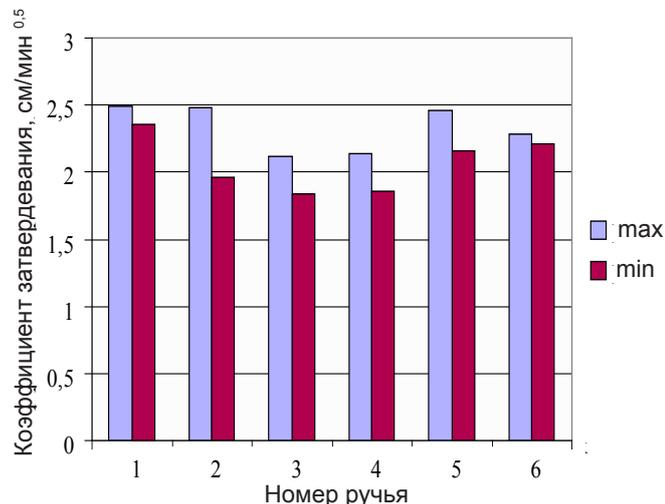


Рис. 1. Распределение коэффициента затвердевания по ручьям при отливке заготовок диаметром 180 мм ($C = 0,19\%$)

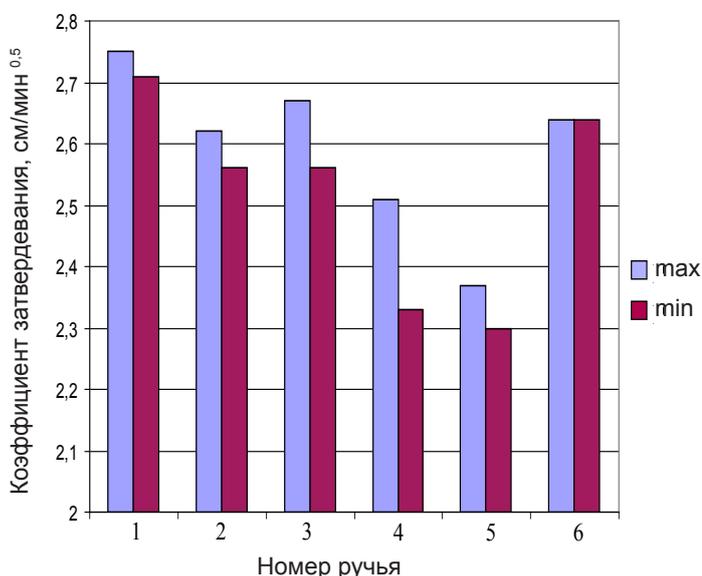


Рис. 2. Распределение коэффициента затвердевания по ручьям при отливке заготовок диаметром 150 мм ($C = 0,18\%$)

$$m_3 = \pi \gamma h_a / 4 (D^2 - D_1^2), \quad (10)$$

где D – диаметр заготовки; γ – удельный вес стали; D_1 – средний диаметр расплавленной лунки в кристаллизаторе;

$$D_1 = D - 2\delta_{cp}, \quad (11)$$

где δ_{cp} – средняя толщина затвердевшей корковой оболочки.

Подставив в выражение (10) соответствующие значения, получим уравнения для определения средней толщины корковой оболочки:

– для заготовки диаметром 180 мм

$$167\delta_{cp}^2 - 301\delta_{cp} + m_3 = 0; \quad (12)$$

– для заготовки диаметром 150 мм

$$167\delta_{cp}^2 - 251\delta_{cp} + m_3 = 0. \quad (13)$$

С помощью уравнений (12), (13) находим коэффициент затвердевания заготовок на выходе из кристаллизатора, используя известное выражение [1]

$$\delta = k\sqrt{\tau}, \quad (14)$$

где k – коэффициент затвердевания; τ – время затвердевания.

$$\tau = \frac{h_a}{v}, \quad (15)$$

где v – скорость разливки стали.

Таким образом, разработана методика определения параметров затвердевания первичной корки в кристаллизаторе по текущим данным процесса непрерывной разливки.

Результаты исследований

Используя предложенную методику, были проведены исследования распределения коэффициентов затвердевания заготовок на выходе из кристаллизатора МНЛЗ для нескольких серий, отлитых методом «плавка на плавку» (рис. 1, 2), влияния температуры жидкой стали в промежуточном ковше на интенсивность теплоотвода в кристаллизаторе (табл. 1) и влияния величины тока в обмотке ЭМП на процессы формирования непрерывнолитой заготовки (табл. 2).

Из приведенных на рис. 1, 2 диаграмм видно различие величин коэффициентов затвердевания для различных ручьев, несмотря на то, что разливка стали марки Ст20 выполнялась с постоянной скоростью и постоянным расходом воды в кристаллизаторах на охлаждение заготовок. При этом величина тока в обмотке ЭМП составляла 300 А на всех ручьях. Коэффициент затвердевания изменялся в диапазоне 2,30-2,75 см/мин^{0.5} для заготовок диаметром 150 мм, а при отливке заготовок диаметром 180 мм диапазон изменения составлял 1,8-2,5 см/мин^{0.5}. Исходя из полученных данных, рекомендовано задавать режимы вторичного охлаждения, используя значения удельного теплоотвода в кристаллизаторах.

Из данных, приведенных в табл. 1, следует, что повышение температуры металла в промежуточном ковше способствует повышению интенсивности теплоотвода в кристаллизаторах на шести ручьях МНЛЗ.

Для исследования влияния интенсивности электромагнитного перемешивания низкоуглеродистой стали марки Grade B на теплообменные процессы в кристаллизаторах выполнены экспериментальные исследования при токах 200, 300, 400 и 500 А в обмотках ЭМП по ручьям. Причем, заготовки вытягивались при постоянных скоростях и одинаковых расходах воды на охлаждение кристаллизаторов. Как следует из данных табл. 2, повышение величины тока способствует интенсификации удельного теплоотвода от 100,88 до 116,72 кДж/кг, повышению коэффициентов затвердевания, сокращению времени затвердевания заготовки. При этом предпочтительными режимами перемешивания жидкой стали являются режимы, которые осуществляются при фазных токах 400-500 А в обмотке ЭМП.

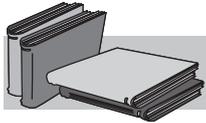
Выводы

– Разработана методика определения параметров затвердевания заготовок из низкоуглеродистых сталей по данным скорости разливки, расходу воды на охлаждение кристаллизаторов и

степени нагрева воды за время пребывания в кристаллизаторах МНЛЗ.

– Выполнены исследования теплообменных процессов, протекающих в гильзовых кристаллизаторах шестиручьевого МНЛЗ. Установлено, что повышение температуры жидкой стали в промежуточном ковше способствует увеличению интенсивности теплоотода в кристаллизаторе МНЛЗ.

– На основании выполненных исследований определено, что повышение интенсивности перемешивания стали в кристаллизаторе за счет увеличения тока в обмотке ЭМП с 200 до 500 А обеспечивает увеличение удельного теплоотода в кристаллизаторе на 10-15 % и повышение коэффициента затвердевания непрерывнолитой заготовки на 12-20 %.



ЛИТЕРАТУРА

1. Процессы непрерывной разливки / А. Н. Смирнов, В. Л. Пилюшенко, А. А. Минаев, С. В. Мамот и др. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 536 с.
2. Буланов Л. В. Расчетное обоснование принципов конструирования кристаллизаторов // *Металлургическая и горноруд. пром-сть.* – 2003. – № 8. – С. 73-80.
3. Влияние конструкции кристаллизатора и системы вторичного охлаждения на искажение сечения сортовых заготовок / С. М. Горлов, О. В. Мартынов, В. П. Дружинин, Н. К. Степанов // *Сталеплавильное пр-во.* – 1968. – № 8. – С. 7.
4. Фольрат К. Кристаллизаторы для непрерывного литья заготовок // *Чер. металлы.* – 2004. – № 3. – С. 26.
5. Емельянов В. А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок. – М.: *Металлургия*, 1988. – 143 с.
6. Освоение производства непрерывнолитой заготовки на высокоскоростной шестиручьевого МНЛЗ / Х. С. Раза, Г. И. Касьян, В. Г. Осипов, А. С. Хобта и др. // *Металл и литье Украины.* – 2001. – № 5-6. – С. 19-21.
7. Kuchaev A., Kasyan G., Jakobshe R. Using of Electromagnetic Stirring in Continuous Casting of Round Billets. In Proceedings 6th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials. – Dresden (Germany), 2009. – P. 243-246.

Анотація

Якобше Р. Я., Кучаєв О. А., Нагірна О. М., Касьян Г. І., Волков О. В.
Дослідження теплової роботи кристалізаторів МБЛЗ при безперервному відливанні круглих заготовок з електромагнітним перемішуванням

Виконані дослідження теплової роботи кристалізаторів шестирічкової МБЛЗ для безперервного лиття круглих заготовок діаметрами 150 та 180 мм із низьковуглецевої сталі. Досліджено вплив технологічних параметрів МБЛЗ на розподіл теплових потоків по річках в гільзових кристалізаторах при електромагнітному перемішуванні рідкої сталі.

Ключові слова

теплообмін, кристалізатор, кругла заготовка, сталь, МБЛЗ, електромагнітне перемішування

Summary

Jakobshe R., Kuchaev A., Nagornaja E., Kasyan G., Volkov A.
Investigation of heat operation of caster moulds at continuous casting of round billets with electromagnetic stirring

Investigation of heat operation of 6-strands caster moulds for continuous casting of round billets by 150 and 180 mm from low carbon steel are carried out. The influence of caster technological parameters on distribution of heat flow on strands in tubular moulds with electromagnetic stirring is conducted.

Keywords

heat transfer, mould, round billet, steel, continuous caster, electromagnetic stirring

Поступила 12.11.09