



УДК 621.74.047
DOI: 10.21122/1683-6065-2018-92-3-26-30

Поступила 20.07.2018
Received 20.07.2018

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ НЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ СТАЛИ

*Е. И. МАРУКОВИЧ, Институт технологии металлов НАН Беларуси, г. Могилев, Беларусь, ул. Бялыницкого-Бирули, 11. E-mail: maruko@46mail.ru,
Е. В. ДЕМЧЕНКО, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. Тел. +375 29 620-52-60*

Анализ выполненных исследований показал, что предложенная методика расчета является эффективным средством управления процессом формирования отливки. Найденные зависимости и экспериментальные данные позволяют рассчитать для конкретного способа литья значения удельного теплового потока в заданном диапазоне значений технологических параметров, полученных при проведении серии успешных экспериментов.

Проведя анализ исследований температурного режима кристаллизатора при литье отливки определенного размера и профиля, можно рассчитать тепловое состояние кристаллизатора для такого же процесса литья, но уже для получения отливок любого другого размера и профиля.

Получив результаты исследований по температурному режиму кристаллизатора при различных способах литья, можно создать интегрируемую базу данных, содержащую необходимые сведения для решения задач затвердевания отливки. При последующем проектировании оснастки и оборудования отпадает необходимость проведения дополнительных экспериментальных исследований и анализа полученных результатов.

Ключевые слова. *Непрерывное литье, стальная отливка, тепловой режим кристаллизатора, удельный тепловой поток, затвердевание, оптимальные параметры литья, метод наименьших квадратов, константы аппроксимации.*

Для цитирования. *Марукович Е. И., Демченко Е. В. Теплопередача в кристаллизаторе при вертикальном непрерывном литье стали // Литье и металлургия. 2018. Т. 92. № 3. С. 26–30. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-92-3-26-30.*

HEAT TRANSFER IN THE MOLD DURING VERTICAL CONTINUOUS CASTING OF STEEL

*E. I. MARUKOVICH, Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Mogilev, Belarus, 11, Bialynitskogo-Biruli str. E-mail: maruko@46mail.ru,
E. V. DEMCHENKO, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.
Tel. +375 29 620-52-60*

The analysis of the performed researches has shown that the offered calculation technique is an effective means of management of formation process in casting. The found dependences and experimental data allow to calculate the specific value of the exact heat flux in a given range of technological parameters obtained during a series of successful experiments for a particular casting method.

Having the results of studies of the temperature regime of the mold during casting of a certain size and profile, it is possible to calculate the thermal state of the mold for the same casting process, but for the production of castings of any other size and profile.

Having a certain amount of information on the temperature regime of the mold at different casting methods, you can use the solutions obtained to become the owner of a database containing the necessary information for solving the problems of solidification of the casting. In the subsequent design of equipment and equipment there is no need for additional experimental studies and analysis of the results.

Keywords. *Continuous casting, steel casting, heat treatment of the mold, specific heat flow, solidification, optimum casting parameters, least square method, the constants of approximation.*

For citation. *Marukovich E. I., Demchenko E. V. Heat transfer in the mold during vertical continuous casting of steel. Foundry production and metallurgy, 2018, vol. 92, no. 3, pp. 26–30. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-92-3-26-30.*

Одним из главных этапов проектирования технологии непрерывного литья является поиск значений оптимальных тепловых и технологических параметров процесса. Оптимальными параметрами принято считать параметры, когда какому-либо определенному значению одного параметра или значений группы

параметров соответствуют строго определенные значения другого параметра или группы других параметров, т. е., строго говоря, имеет место прямая взаимосвязь между параметрами, установленная в результате расчета технологии. Оптимальные параметры обеспечивают стабильность процесса литья и получение качественных заготовок. При этом значения оптимальных параметров не обязательно должны быть максимальными.

Известно, что в процессе литья значения отдельных оптимальных параметров не всегда остаются постоянными, что весьма важно, а изменяются в ту или иную сторону [1]. Могут изменяться температура заливаемого расплава, скорость вытяжки отливки, тепловой поток в кристаллизаторе, температура поверхности отливки в зоне вторичного охлаждения. Такие изменения происходят по разным причинам, в частности, из-за длительности разлива расплава из разливочного устройства (промежуточный ковш, литниковая система), газового зазора, образующегося в кристаллизаторе в результате неравномерной усадки отливки, износа графитовой втулки кристаллизатора при литье с закрытым уровнем и т. д. Довольно часто такая же картина наблюдается и при разливке стали на МНЛЗ. В работе [2] отмечалось, что изменение скорости вытягивания слитка, расхода и параметров жидкого металла, подаваемого в кристаллизатор, обусловлено нарушением стабильной работы огнеупоров, прожиганием разливочных стаканов, уменьшением скорости разлива при смене промежуточного ковша и сталеразливочных стаканов, при запуске и остановке МНЛЗ. В результате искажается процесс формирования отливки и нарушается технология литья, что проявляется в ухудшении качества получаемых заготовок, частых задержках, сбоях в работе узлов и механизмов установок часто из-за ручной корректировки параметров режима вытяжки отливки, прорывах расплава, приводящих к аварийным ситуациям.

Поэтому правильно было бы в процессе литья при изменении значений одного параметра или группы параметров приводить их к начальным оптимальным значениям и в дальнейшем поддерживать их на этом уровне, либо изменять значения других параметров на значения, которые бы удовлетворяли значениям изменившихся параметров, компенсируя, тем самым, возникающий дисбаланс и переводя режим литья в более или менее устойчивое стабильное состояние.

Если первый вариант действий в принципе осуществим, в случае если такое позволяет технология (например, для постоянства температуры расплава используются обогреваемые металлоприемники или дозаторы), то во втором такая корректировка параметров не всегда возможна. Точнее она возможна тогда, когда изменение параметров не носит критического нарушения характера процесса литья и имеется определенная зависимость оптимальных параметров между собой, выраженная с помощью математического аппарата. Это позволит провести корректировку параметров таким образом, чтобы новому измененному значению параметра или группы параметров строго соответствовали новые, заранее рассчитанные значения зависимых между собой оптимальных параметров, т. е. фактически осуществить решение задачи управления процессом формирования отливки.

Такое решение было найдено в работе [3], где на примере полунепрерывного литья чугуна полученные зависимости и экспериментальные данные позволяют рассчитать значения удельного теплового потока и значения оптимальных параметров в заданном диапазоне, необходимые для решения задачи затвердевания отливки. Решим эту же задачу, но для случая непрерывного литья стальной отливки.

Установлено, что удельный тепловой поток в кристаллизаторе q можно определить по следующему уравнению [3]:

$$q = \frac{q_0}{1 + \beta t}, \quad (1)$$

где q_0 – начальный удельный тепловой поток на уровне мениска расплава; β – коэффициент, характеризующий степень снижения q с увеличением времени формирования отливки в кристаллизаторе t .

Находим, что величины q_0 и β должны зависеть от температуры заливаемого расплава $T_{зал}$ и скорости течения охлаждающей воды w_B в кристаллизаторе:

$$q_0 = a_0 + a_1 T_{зал} + a_2 w_B, \quad (2)$$

$$\beta = b_0 + b_1 T_{зал} + b_2 w_B, \quad (3)$$

где a_i, b_i ($i = 0, \dots, 2$) – константы аппроксимации.

Исследования проводили методом термического анализа при литье отливки из стали 12Х18Н10ТЛ диаметром 80 мм в медный кристаллизатор длиной 200 мм с ребреной водоохлаждаемой поверхностью*. Толщина стенки кристаллизатора по впадинам составляла $X = 7,5$ мм, по ребрам $X = 12,5$ мм. Термопары

* Отчет по НИР. Разработка и внедрение технологии полунепрерывного литья заготовок из стали 12Х18Н10ТЛ. Минск, 1989.

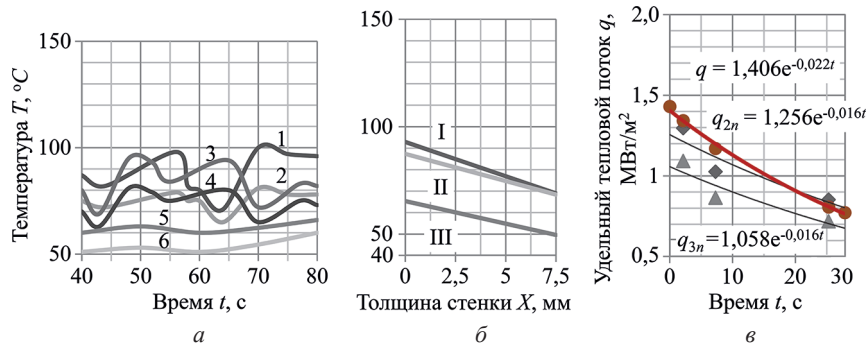


Рис. 1. Температурное поле (а, б) и расчетные удельные тепловые потоки q (в) в кристаллизаторе (режим № 6): I – I пояс (термопары 1, 2); II – II пояс (термопары 3, 4); III – III пояс (термопары 5, 6)

располагались в трех поясах по высоте кристаллизатора и в двух поясах по толщине рабочей втулки. Технологические параметры литья принимали следующими: средняя скорость вытяжки отливки $w_{cp} = 0,0062-0,0095$ м/с, $T_{зал} = 1470-1650$ °С, $w_B = 5,1-6,0$ м/с. Проводили серию заливок из шести экспериментов. По усредненным значениям температур рассчитывали экспериментальные значения удельного теплового потока [4]: q – на рабочей поверхности кристаллизатора, q_{2n} – в первом и q_{3n} – во втором поясе по толщине рабочей втулки (рис. 1).

Константы аппроксимации рассчитывали непосредственно по данным измерения температурного режима кристаллизатора методом наименьших квадратов (МНК) [5]. Для этого уравнения (1)–(3) преобразовали к виду:

$$1 = \frac{1}{q} a_0 + \frac{T_{зал}}{q} a_1 + \frac{w_B}{q} a_2 - t b_0 + t T_{зал} b_1 + t w_B b_2. \quad (4)$$

В результате получили следующие значения констант:

$$a_0 = -0,603778; a_1 = -8,66 \cdot 10^{-4}; a_2 = 0,580196, \\ b_0 = 0,20644; b_1 = -1,1 \cdot 10^{-4}; b_2 = -2,507 \cdot 10^{-3}.$$

Параметры процесса литья (w_{cp} , $T_{зал}$, w_B), значения экспериментальных (q) и расчетных (q_p , q_0) удельных тепловых потоков, коэффициента β , рассчитанных по уравнениям (1)–(3), приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Расчетные значения удельного теплового потока

Режим литья	Параметры литья				Тепловой поток, МВт/м ²			
	w_{cp} , м/с	T , °С	w_B , л/с	t , с	q	q_0	β , с ⁻¹	q_p
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,0095	1620	5,1	0		0,95	0,0156	0,95
				2,1	0,77			0,92
				7,2	1,39			0,86
				24,8	0,68			0,69
				27,4				0,67
2	0,0072	1650	6,0	0		1,45	0,0101	1,45
				2,8	1,33			1,41
				9,5	1,31			1,32
				32,9	1,23			1,09
				36,3				1,06
3	0,0092	1590	5,7	0		1,33	0,0174	1,33
				2,2	1,56			1,28
				7,4	1,12			1,17
				25,7	0,87			0,92
				28,4				0,89
4	0,0062	1590	5,7	0		1,33	0,0174	1,33
				3,2	1,50			1,26
				11,0	1,36			1,11
				38,3	0,67			0,80
				42,2				0,77

1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	0,0092	1510	5,7	0		1,40	0,0262	1,40
				2,2	1,40			1,32
				7,4	1,23			1,17
				25,7	0,88			0,83
				28,4				0,80
6	0,0093	1470	5,7	0		1,43	0,0306	1,43
				2,1	1,30			1,34
				7,3	1,03			1,17
				25,3	0,85			0,81
				27,9				0,77

Необходимо отметить, что уровень значений экспериментальных (q) и расчетных (q_p, q_0) удельных тепловых потоков коррелируют с данными работ других исследователей [6].

Для подтверждения адекватности расчетных и экспериментальных данных определяли дисперсию ошибки опытов S_y^2 , трижды повторив режим литья № 3. Статистические расчеты выполнены по методике [7] (табл. 2).

Таблица 2. Статистическая оценка результатов экспериментов

Характеристика	Обозначение	Единица измерения	Значение
Дисперсия ошибок опытов	S_y^2	(МВт/м ²) ²	0,031
Степень свободы дисперсии	f_y	–	8
Дисперсия неадекватности	S_D^2	(МВт/м ²) ²	0,19399
Степень свободы дисперсии	f_D	–	12
Доверительная вероятность	P	–	0,99
Расчетное значение критерия Фишера	F_p	–	15,65
Табличное значение критерия Фишера	$F_T(0,01; f_D; f_B)$	–	30,82
Табличное значение критерия Стьюдента	$t(0,01; f_B)$	–	3,055
Доверительный интервал	Δq	МВт/м ²	0,17

Анализ исследований показал, что предложенная методика является эффективным средством управления процессом формирования отливки. Найденные зависимости и экспериментальные данные позволяют рассчитать для конкретного способа литья значения удельного теплового потока в заданном диапазоне значений технологических параметров литья, полученных при проведении серии экспериментов. По значениям удельного теплового потока рассчитывается значение предельно допустимой толщины корки отливки на выходе из кристаллизатора [1]. При этом значения параметров литья, соответствующие значению предельно допустимой толщины корки, и будут являться оптимальными параметрами. В случае изменения одного или нескольких параметров процесс приводится в устойчивое состояние при пересчете параметров с помощью зависимостей (1)–(3).

Получив результаты исследований температурного режима кристаллизатора при литье отливки определенного размера и профиля, можно рассчитать тепловое состояние кристаллизатора для такого же процесса литья, но уже для получения отливок любого другого размера и профиля. Однако при этом в расчетах нужно соблюдать идентичность теплофизических коэффициентов материала отливки и кристаллизатора.

Если иметь большое количество данных по температурному режиму кристаллизатора при различных способах литья, то с помощью полученных решений можно создать базу данных для решения задач затвердевания отливки. При последующем проектировании оснастки и оборудования отпадает необходимость проведения дополнительных экспериментальных исследований и анализа полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марукович Е. И., Демченко Е. Б. Тепловые явления при формировании непрерывной отливки. Мн.: БНТУ, 2012. 208 с.
2. Лукин С. В. Математическое моделирование теплообмена сляба с кристаллизатором машины непрерывного литья заготовок при динамических режимах разлива / С. В. Лукин, Н. И. Шестаков, В. В. Мухин, В. И. Славов // Вестн. Череповецкого гос. ун-та. 2012. Т. 2. № 2. С. 16–20.

3. Демченко Е. Б. Исследование процесса теплопередачи при вертикальном полунепрерывном литье чугуна / Е. Б. Демченко, А. А. Офенгенден // *Металлургия: республ. межвед. сб. науч. тр.* Минск: Выш. шк., 2004. Вып. 28. С. 81–86.
4. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.
5. Касандрова О. Н., Лебедев В. В. Обработка результатов наблюдений. М.: Наука, 1970. 104 с.
6. Liangliang GUO, Xudong WANG, Huiying ZHAN, Man YAO and Dacheng FANG. Mould Heat Transfer in the Continuous Casting of Round Billet. *ISIJ International*, Vol. 47 (2007), no. 8, pp. 1108–1116.
7. Хартман К., Лецкий Э., Шеффер В. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. М.: Мир, 1977. 552 с.

REFERENCES

1. Marukovich E. I., Demchenko E. B. *Teplovyje javlenija pri formirovanii nepreryvnoj otlivki* [Thermal phenomena in the formation of continuous casting]. Minsk, BNTU Publ., 2012, 208 p.
2. Lukin S. V., Shestakov N. I., Muhin V. V., Slavov V. I. Matematicheskoe modelirovanie teploobmena sljaba s kristallizatorom mashiny nepreryvnogo lit'ja zagotovok pri dinamicheskikh rezhimakh razlivki [Mathematical modeling of heat transfer of a slab with a crystallizer of a continuous casting machine under dynamic casting conditions]. *Vestnik Cherepoveckogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Cherepovets State University*, 2012, no. 2, vol. 2, pp. 16–20.
3. Demchenko E. B., Ofengenden A. A. Issledovanie processa teploperedachi pri vertikal'nom polunepreryvnom lit'e chuguna [Investigation of the heat transfer process for vertical, semi-continuous casting of cast iron]. *Metallurgija: respublikanskij mezhdostvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: the republican interdepartmental collection of scientific papers*. Minsk, Vyshhejschaja shkola Publ., 2004, vyp. 28, pp. 81–86.
4. Miheev M. A., Miheeva I. M. *Osnovy teploperedachi* [Fundamentals of Heat Transfer]. Moscow, Jenergija Publ., 1977. 344 p.
5. Kasandrova O. N., Lebedev V. V. *Obrabotka rezul'tatov nabljudenij* [Processing of observation results]. Moscow, Nauka Publ., 1970, 104 p.
6. Liangliang GUO, Xudong WANG, Huiying ZHAN, Man YAO and Dacheng FANG. Mould Heat Transfer in the Continuous Casting of Round Billet. *ISIJ International*, Vol. 47 (2007), no. 8, pp. 1108–1116.
7. Hartman K., Leckij Je., Sheffer V. *Planirovanie jeksperimenta v issledovanii tehnologicheskikh processov* [Planning an experiment in the study of technological processes]. Moscow, Mir Publ., 1977, 552 p.