



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-36-39>
УДК 621.74.04

Поступила 08.06.2022
Received 08.06.2022

КИНЕТИКА ЗАТВЕРДЕВАНИЯ СТАЛЬНОЙ ОТЛИВКИ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ НЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ

Е. И. МАРУКОВИЧ, Институт технологии металлов НАН Беларуси,
г. Могилев, Беларусь, ул. Бялыницкого-Бирули, 11
Е. Б. ДЕМЧЕНКО, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: edemchenko@bntu.by

Предложена методика, позволяющая рассчитать значения удельного теплового потока в заданном диапазоне значений технологических параметров литья и предельно допустимой толщины корки отливки на выходе из кристаллизатора.

Объем сведений по температурному режиму кристаллизатора при различных параметрах литья может служить базой данных, содержащей необходимые результаты для решения задач затвердевания отливки. При последующем проектировании оснастки и оборудования отпадает необходимость проведения дополнительных экспериментальных исследований и анализа полученных результатов.

Ключевые слова. Затвердевание, отливка, непрерывное литье, параметры, температурный режим, тепловой поток, теплота перегрева, толщина корки.

Для цитирования. Марукович, Е. И. Кинетика затвердевания стальной отливки при вертикальном непрерывном литье / Е. И. Марукович, Е. Б. Демченко // Литье и металлургия. 2022. № 3. С. 36–39. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-36-39>.

KINETICS OF STEEL CASTING SOLIDIFICATION DURING VERTICAL CONTINUOUS CASTING

E. I. MARUKOVICH, Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus,
Mogilev, Belarus, 11, Bialynitskogo-Biruli str.
E. B. DEMCHENKO, Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: edemchenko@bntu.by

A technique that allows calculating the values of the specific heat flux in a given range of values of the technological parameters of casting and the maximum allowable thickness of the casting crust at the outlet of the mold is proposed.

The information on the temperature regime of the mold at various casting parameters can serve as a database containing the necessary information to solve the casting solidification problems. With the subsequent design of tooling and equipment, there is no need for additional experimental studies and analysis of the results obtained.

Keywords. Solidification, castings, continuous casting, parameters, temperature regime, heat flow, heat of overheating, thickness of the crust.

For citation. Marukovich E. I., Demchenko E. B. Kinetics of steel casting solidification during vertical continuous casting. Foundry production and metallurgy, 2022, no. 3, pp. 36–39. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-3-36-39>

Ранее было показано [1], каким образом можно рассчитать значения взаимосвязанных между собой оптимальных тепловых и технологических параметров процесса непрерывного литья стальных заготовок в заданном диапазоне, необходимые для решения задачи затвердевания отливки, обеспечения стабильности литья и получения качественных заготовок.

К таким параметрам отнесли удельный тепловой поток q и время формирования отливки в кристаллизаторе t , среднюю скорость вытяжки отливки $w_{\text{ср}}$, температуру заливаемого расплава $T_{\text{зал}}$ и скорость течения охлаждающей воды $w_{\text{в}}$. Исследования проводили методом термического анализа при литье сплошной отливки из стали 12Х18Н10ТЛ диаметром 80 мм в медный кристаллизатор длиной 300 мм с ребреной водоохлаждаемой поверхностью. Толщина стенки кристаллизатора по впадинам $X=7,5$ мм, по ребрам $X=12,5$ мм. Термопары располагали в трех поясах по высоте кристаллизатора и в двух поясах по толщине рабочей втулки. Технологические параметры литья составляли: $w_{\text{ср}}=0,0062\text{--}0,0095$ м/с, $T_{\text{зал}}=1470\text{--}1650$ °С, $w_{\text{в}}=5,1\text{--}6,0$ м/с.

По температурному полю кристаллизатора рассчитывали значения удельного теплового потока q на рабочей поверхности кристаллизатора, $q_{2п}$ в первом и $q_{3п}$ во втором поясе по толщине рабочей втулки [2].

Анализ показал, что предложенная методика является эффективным средством управления процессом формирования отливки. Полученные зависимости и экспериментальные данные позволяют рассчитать значения удельного теплового потока в заданном диапазоне значений технологических параметров литья и предельно допустимой толщины корки отливки на выходе из кристаллизатора. При этом значения параметров литья, соответствующие значению предельно допустимой толщины корки, и будут являться оптимальными параметрами. Имея результаты исследований температурного режима кристаллизатора при литье отливки определенного размера и профиля, можно рассчитать тепловое состояние кристаллизатора для аналогичного процесса литья, но уже для получения отливок любого другого размера и профиля.

Результаты по температурному режиму кристаллизатора при различных параметрах литья могут служить базой данных, содержащей необходимые сведения для решения задач затвердевания отливки [2]. При последующем проектировании оснастки и оборудования отпадает необходимость проведения дополнительных экспериментальных исследований и анализа полученных результатов.

При выполнении исследований провели серию заливок из шести экспериментов [1]. Проанализируем полученные результаты с точки зрения влияния времени формирования отливки, температуры заливаемого расплава и скорости течения охлаждающей воды на удельный тепловой поток в кристаллизаторе.

На рис. 1, а–е представлены расчетные значения удельного теплового потока q в кристаллизаторе при различных параметрах литья. Из рисунка видно, что изменение параметров литья влияет на удельный тепловой поток. Так, повышение средней скорости литья с 0,0072 до 0,0095 м/с при прочих равных

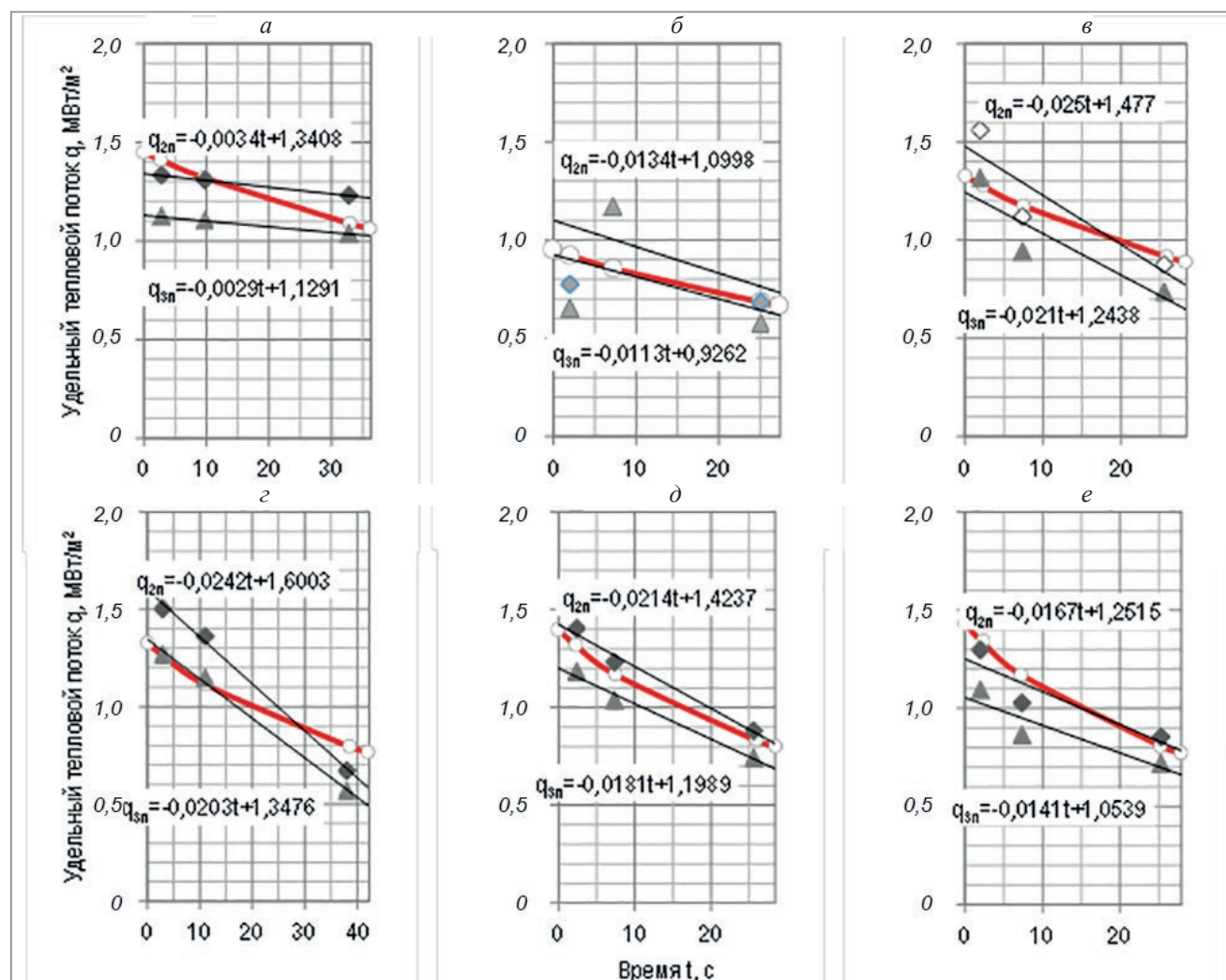


Рис. 1. Расчетные значения удельного теплового потока q в кристаллизаторе при различных параметрах литья:

— I пояс (термопары 1, 2); ♦ — II пояс (термопары 3, 4); ▲ — III пояс (термопары 5, 6); $w_{cp} = 5,7$ м/с

а — $w_{cp} = 0,0072$ м/с; $T_{зал} = 1650$ °С; б — $w_{cp} = 0,0095$ м/с; $T_{зал} = 1620$ °С; в — $w_{cp} = 0,0092$ м/с; $T_{зал} = 1590$ °С;

г — $w_{cp} = 0,0062$ м/с; $T_{зал} = 1590$ °С; д — $w_{cp} = 0,0092$ м/с; $T_{зал} = 1510$ °С; е — $w_{cp} = 0,0093$ м/с; $T_{зал} = 1470$ °С;

условиях приводит к резкому снижению удельного теплового потока во всех зонах кристаллизатора (рис. 1, а, б). В зоне мениска расплава это снижение достигает 30%.

Снижение температуры заливки расплава с 1620 до 1470 °С при низменной скорости литья привело к незначительному повышению значений теплового потока в зоне выхода отливки из кристаллизатора (рис. 1, б, е). При этом тепловая нагрузка на рабочую втулку кристаллизатора несколько возросла.

Для расчета кинетики затвердевания стальной отливки применяли методику, описанную в работе [3]:

$$\frac{d\delta}{dFo} = \frac{S}{2 \frac{\gamma_1'}{\gamma_1} L_1^\varphi \left[1 - \frac{\delta(2-\delta)}{1-\delta_c^2} \right] (1-\delta) + L_0(1-\delta) + \frac{S\delta}{n(n+1)} \left(2 - \frac{3}{n+2} \delta \right)},$$

где $\delta = \xi / R$ – приведенный размер корки отливки; $\delta_c = R_c / R$ – приведенный размер отливки ($R_c=0$);

$Fo = \frac{a_1 t}{R^2}$ – критерий Фурье; $a_1 = \frac{\lambda_1}{c_1 \gamma_1}$ – коэффициент температуропроводности материала отливки;

$S = \frac{qR}{\lambda_1(T_{кр} - T_c)}$ – критерий интенсивности теплоотвода; $L_0 = \frac{r_{эф}}{c_1(T_{кр} - T_c)}$ – относительная теплота за-

твердевания; $L_1^\varphi = \frac{r_{пер}^\varphi}{c_1(T_{кр} - T_c)}$ – относительная теплота перегрева.

В нашем случае подвод расплава осуществлялся в центральную часть кристаллизатора, что соответствовало случаю равномерного распределения теплоты перегрева по периметру и высоте отливки (рис. 2):

$$r_{пер}^\varphi = z_2^\varphi c_1' (T_{зал} - T_{кр}),$$

где $z_2^\varphi = \begin{cases} \frac{\cos \varphi + 1}{2} & 0 \leq \varphi < \pi, \\ 0 & \varphi = \pi \end{cases}$ – критерий неравномерности отвода теплоты перегрева по периметру фронта затвердевания.

Для решения дифференциального уравнения и расчета минимальной толщины корки на выходе из кристаллизатора в зависимости от времени формирования отливки применяли схемы Рунге-Кутты четвертого порядка точности. Значения теплофизических коэффициентов материала отливки следующие: $c_1=690,8$ Дж/(кг·град); $c_1'=837,4$ Дж/(кг·град); $\gamma_1=7500$ кг/м³; $\gamma_1'=7000$ кг/м³; $a_1=5,6 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\lambda_1=23,3$ Вт/(м·град); $r=267,955$ кДж/кг. Результаты расчета приведены на рис. 3.

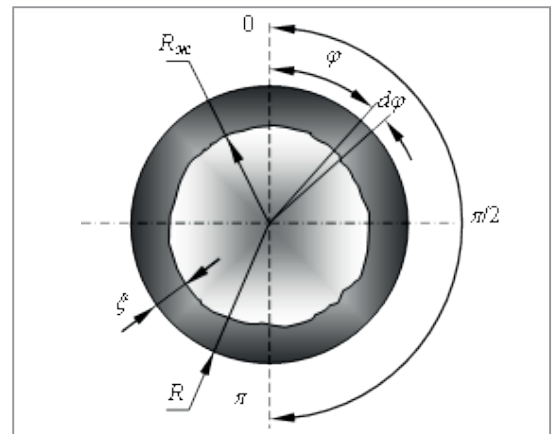


Рис. 2. Схема расчета

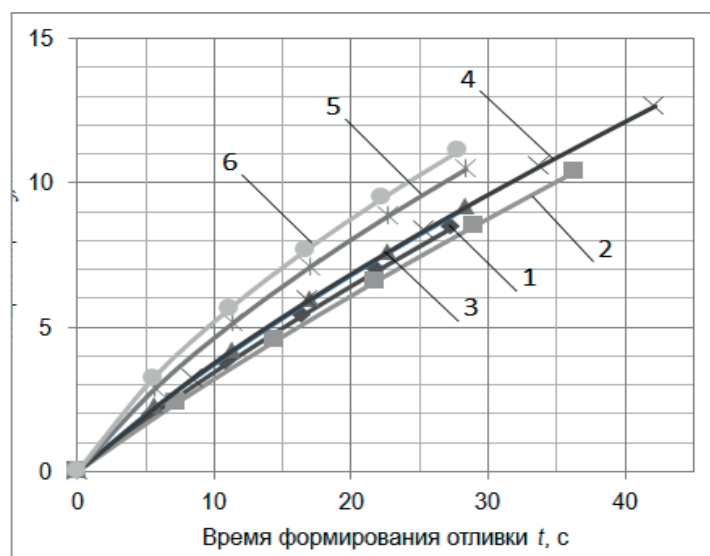


Рис. 3. Кинетика затвердевания стальной отливки ($w_b=5,7$ м/с):

1 – $w_{ср}=0,0095$ м/с; $T_{зал}=1620$ °С; 2 – $w_{ср}=0,0072$ м/с; $T_{зал}=1650$ °С; 3 – $w_{ср}=0,0092$ м/с; $T_{зал}=1590$ °С; 4 – $w_{ср}=0,0062$ м/с; $T_{зал}=1590$ °С; 5 – $w_{ср}=0,0092$ м/с; $T_{зал}=1510$ °С; 6 – $w_{ср}=0,0093$ м/с; $T_{зал}=1470$ °С

Показано, что при незначительном перегреве расплава и высоких скоростях литья (рис. 3, кривые 5, 6) толщина корки на выходе из кристаллизатора и скорость ее роста значительно превышают эти же параметры при более высоком перегреве расплава (рис. 3, кривые 1, 3). Однако следует отметить, что на наружной поверхности отливки имели место сломы начальной корки и заплывы, несмотря на наличие в кристаллизаторе шлаковой ванны.

При пониженных скоростях вытяжки отливки и наличии перегрева расплава (рис. 3, кривая 4) толщина корки достигает значений порядка $\xi=12,5-13,0$ мм, что более чем достаточно для того, чтобы выдержать давление расплава жидкой сердцевины. При этом, несмотря на хорошее качество поверхности, производительность процесса низкая.

Очевидно, оптимальными режимами литья следует считать первый и третий режимы (рис. 3, кривые 1, 3). Здесь при высоких скоростях вытяжки и перегреве расплава толщина корки отливки на выходе из кристаллизатора составила $\xi=8,5-9,2$ мм, прорывов расплава не наблюдалось, даже несмотря на отсутствие вторичного охлаждения. Качество поверхности в этом случае хорошее, без значительных видимых дефектов.

Необходимо отметить, что уровень значений расчетных удельных тепловых потоков и толщин корки коррелируют с данными работ других исследователей [4, 5].

Результаты исследования будут полезны инженерам при разработке технологии непрерывного литья стальных заготовок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марукович Е. И., Демченко Е. Б. Тепловые явления при формировании непрерывной отливки. Мн.: БНТУ, 2012. 208 с.
2. Демченко, Е. Б. Теплопередача в кристаллизаторе при вертикальном непрерывном литье стали / Е. Б. Демченко, Е. И. Марукович // Литье и металлургия. 2018. № 3 (62). С. 26–30.
3. Демченко, Е. Б. К вопросу учета неравномерного распределения теплоты перегрева в кристаллизаторе при непрерывном литье / Е. Б. Демченко, Е. И. Марукович // Литье и металлургия. 2007. № 1. С. 101–103.
4. Choudhary S.K., Mazumdar D., Ghosh A. Mathematical Modelling of Heat Transfer Phenomena in Continuous Casting of Steel // ISIJ International, 1993. Vol. 33. No. 7. P. 764–774.
5. Liangliang G., Xudong W., Huiying Zh., Man Ya., Dacheng F. Mould Heat Transfer in the Continuous Casting of Round Billet // ISIJ International, 2007. Vol. 47. No. 8. P. 1108–1116.

REFERENCES

1. Marukovich E.I., Demchenko E.B. *Teplovyje javlenija pri formirovanii nepreryvnoj otlivki* [Thermal phenomena during the formation of a continuous casting]. Minsk, BNTU Publ., 2012. 208 p.
2. Demchenko E.B., Marukovich E.I. *Teploperedacha v kristallizatore pri vertikal'nom nepreryvnom lit'e stali* [Heat transfer in the mold during vertical continuous casting of steel]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2018, no. 3 (62), pp. 26–30.
3. Demchenko E.B., Marukovich E.I. *K voprosu uchjota neravnomernogo raspredelenija teploty peregreva v kristallizatore pri nepreryvnom lit'e* [To the matter of accounting of non-uniformity of heat of superheat outlet in crystallizer at continuous casting]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2007, no. 1, pp. 101–103.
4. Choudhary S.K., Mazumdar D., Ghosh A. Mathematical Modelling of Heat Transfer Phenomena in Continuous Casting of Steel. *ISIJ International*, 1993, vol. 33, no. 7, pp. 764–774.
5. Liangliang G., Xudong W., Huiying Zh., Man Ya., Dacheng F. Mould Heat Transfer in the Continuous Casting of Round Billet. *ISIJ International*, 2007, vol. 47, no. 8, pp. 1108–1116.