

УДК 621.746.55.:621.771.07

**Т.С. Скобло, А.К. Автухов, Е.Л. Белкин***Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства  
имени Петра Василенка***МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД ОЦЕНКИ УСЛОВИЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ  
ДВУХСЛОЙНЫХ ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА  
ЛИСТОПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ**

*Разработан методический подход для оценки условий кристаллизации двухслойных чугуновых отливок при производстве листопрокатных валков методом центробежной отливки, позволяющий определить технологические режимы литья, обеспечивающие оптимальное структурообразование рабочего слоя. Его использование будет эффективным при прогнозировании параметров подготовки литейной формы для конкретного применения в технологической цепочке.*

*Ключевые слова: кристаллизация отливок, структурные превращения, уравнения теплопроводности, теплоемкость, металлическая форма, дифференциальное уравнение*

**Т.С. Скобло, А.К. Автухов, Е.Л. Белкин***Харківський національний технічний університет сільського господарства  
імені Петра Василенка***МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ОЦІНКИ УМОВ КРИСТАЛІЗАЦІЇ  
ДВОШАРОВИХ ЧАВУННИХ ВИЛИВОК ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ЛИСТОПРОКАТНИХ  
ВАЛКІВ**

*Розроблено методичний підхід для оцінки умов кристалізації двошарових чавунних виливок при виробництві листопрокатних валків методом відцентрової виливки, що дозволяє визначити технологічні режими лиття, які забезпечують оптимальне структуроутворення робочого шару. Його використання буде ефективним при прогнозуванні параметрів підготовки ливарної форми для конкретного застосування в технологічному ланцюжку.*

*Ключові слова: кристалізація виливків, структуроутворення, рівняння теплопровідності, теплоємність, металева форма, диференціальне рівняння.*

**T.S. Skoblo, A.K. Avtukhov, E.L. Belkin***Kharkiv National Technical University of Agriculture named after P. Vasilenko***METHODICAL APPROACH TO ASSESS OF CRYSTALLIZATION CONDITIONS OF TWO-  
LAYER IRON CASTINGS FOR PRODUCTION OF SHEET-ROLLING ROLLS**

*Due to the uneven distribution of temperature and flow non-simultaneous structural transformations during crystallization massive iron castings stresses arise that affect the formation of structures and operational characteristics of the rolling rolls. A methodological approach to assess the conditions of crystallization of two-layer iron castings in the production of sheet-rolling rolls centrifugal casting method, which allows you to determine the casting process regimes that provide optimal structure formation of the working layer. The proposed method helps to minimize the stress and the most comprehensive structural transformations associated with the collapse of the retained austenite during cooling of castings in the form. Using this technique is effective at forecasting of mold preparation parameters for a particular application in the processing chain.*

*Keywords: castings crystallization, structural transformations, heat conduction equation, heat capacity, metallic form, differential equation.*

**Постановка проблеми.** Надежная, безотказная работа листопрокатных станов в целом зависит от качества прокатных валков. На листопрокатных станах горячей прокатки широкое применение нашли двухслойные чугуновые валки [1,2]. Непрерывная интенсификация процессов прокатного производства создает все более напряженные условия эксплуатации валков, предъявляя повышенные требования к их качеству и стойкости. Наиболее эффективными направлениями повышения стойкости валков являются научно обоснованный оптимальный выбор параметров технологии их производства.

Это позволит минимизировать уровень напряжений и затраты для проведения термической обработки.

**Анализ исследований и публикаций.** Качество и свойства рабочего слоя прокатных валков существенным образом зависят от условий кристаллизации отливок [3]. При кристаллизации чугуновых массивных отливок, вследствие неравномерного распределения температуры и неодновременного протекания структурных превращений, возникают напряжения, влияющие на структурообразование и эксплуатационные характеристики прокатных валков, влияющие, в первую очередь, на износостойкость и твердость рабочей поверхности. Для производства валков с

требуемым уровнем свойств рабочего слоя имеется возможность регулировать кинетику изменения структурообразования изделия в процессе его кристаллизации.[4].

**Цель работы** – разработать методический подход для теоретической оценки условий кристаллизации центробежнолитых двухслойных чугунных отливок при производстве листопрокатных валков.

**Изложение основного материала.** Методика расчета базировалась на решении уравнения теплопроводности:

$$c\gamma \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \frac{\partial(\lambda T)}{\partial r} + \frac{\partial(\lambda T)}{r \partial r} + \frac{\partial}{\partial \varphi} \frac{\partial(\lambda T)}{\partial \varphi} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial(\lambda T)}{\partial z} \quad (1)$$

Оно представлено в цилиндрических координатах, потому что отливаемый валок с металлической формой представляют собой цилиндр (рассматривать его можно как два или даже три телескопически собранных цилиндра, учитывая, что валок двухслойный и имеет место дозированный ввод металла сердцевины порциями при кристаллизации), с различными этапами технологического процесса.

В этом уравнении:  $c$  – удельная теплоемкость, ккал/(Н $\times$ °С)(константа);  $\gamma$  – объемный вес, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – время в ч;  $T=T(r, \varphi, z, \tau)$  – температура, °С, которая зависит от координат  $r, \varphi, z$  и времени  $\tau$ ;  $\lambda$  – теплопроводность, ккал/(м $\cdot$ час $\cdot$ °С);  $r$  – координата по радиусу(ось координаты по  $r$  справа налево), м;  $z$  – координата по высоте, м;  $\varphi$  – угол, рад.

Координата по высоте может иметь значение, когда учитывается гидростатическое давление, от которого будет зависеть время и степень контакта отливки и металлической формы. На начальном этапе заливки можно было бы произвести три расчета температур: для низа, середины и верха отливки. В данном исследовании рассматривали случай для середины отливки.

С большой степенью точности можно считать, что решение не зависит от  $\varphi$ .

Тогда, с учетом этого, уравнение будет иметь вид:

$$c\gamma \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \frac{\partial(\lambda T)}{\partial r} + \frac{\partial(\lambda T)}{r \partial r}, \quad (2)$$

где:  $T = T(r, \tau)$  – температура, °С, которая зависит от координаты  $r$  и времени  $\tau$ ;  $\lambda$  – теплопроводность зависит от температуры и рассчитывается по следующей эмпирической формуле:

$$\lambda = 45 - 25 \cdot (1200 - T) / 1200 \quad (3)$$

Принято, что если  $T > 1200$  °С, то  $\lambda = 45$  ккал/(м $\cdot$ ч $\cdot$ °С);

При кристаллизации и фазовых превращениях следует учитывать их энтальпию, которая для данных условий равна 65 ккал/кг.

Удельную теплоемкость рассчитывали так:

$$c = c_{gv} \quad T > T_l$$

$$c = \frac{Q_{pl}}{(T_l - T_s)} \quad T_s \leq T \leq T_l \quad (4)$$

$$c = c_{tv} \quad T < T_s,$$

где:  $T_l$  – температура начала фазовой перекристаллизации (700°С);  $T_s$  – температура конца перекристаллизации (500°С);  $c_{tv}$  – удельная теплоемкость твердой фазы (0.16);  $c_{gv}$  – удельная теплоемкость жидкой фазы (0.20);  $Q_{pl}$  – энтальпия при перекристаллизации принята 18 ккал/кг.

В методике расчета теплоемкости в зоне перекристаллизации  $T_s \leq T \leq T_l$  исходили из баланса тепла, который описан в работе [5]. Известно, что при кристаллизации чугуна разница  $T_l - T_s$  достигает 100 °С. Изменение теплоемкости в таком интервале приводит к слишком грубому решению. В работе сделана попытка получить более точное решение, пользуясь тем известным фактом, что в интервале фазовых переходов при кристаллизации энтропия претерпевает разрыв. Из термодинамики известно:

$$dS = \frac{dQ}{T}, \quad (5)$$

где:  $Q$  – тепловая энергия;  $S$  – энтропия.

Левая часть уравнения терпит разрыв. Считая, что тепловая энергия непрерывная функция, в правой части разрыв может быть или производной, или температуры (можно предположить, что, например, температура в интервале перекристаллизации может изменяться настолько малыми скачками, что их сложно зафиксировать).

В работе принято условие, что именно температура терпит разрыв между точками  $T_{l_1}$  и  $T_{s_1}$ . Эти точки расположены между  $T_l$  и  $T_s$ , то есть  $T_s < T_{s_1} < T_{l_1} < T_l$ .

Скачкообразное изменение температуры в зоне перекристаллизации может быть вызвано локальной неоднородностью по химическому составу (ликвацией), долей остаточного аустенита, частичного его распада в этом интервале. В результате подтверждения этому, является выявление карбидов, отличающихся от стехиометрического состава –  $Fe_3C$  (типа  $MeC$ ;  $Me_2C$ ).

Помимо различия в содержании углерода в них растворена различная доля  $Mn$ ,  $Cr$ ,  $Ni$  (подтверждено результатами микроспектрального анализа) [6], которые кристаллизуются в разных температурных интервалах. Такие карбиды имеют различные оттенки и размеры при описании их по микрофотографиям оптико-математическим методом [7].

Баланс тепла описывается как:

$$Q_{pl} = \int_{T_s}^{T_l} c dT = \int_{T_s}^{T_{s_1}} c_1 dT + \int_{T_{l_1}}^{T_l} c_1 dT, \text{ или} \quad (6)$$

$$c(T_l - T_s) = c_1 [(T_l - T_{l_1}) + (T_{s_1} - T_s)], \quad (7)$$

Откуда, учитывая, что  $c = \frac{Q_{pl}}{(T_l - T_s)}$ ,

$$c_1 = \frac{Q_{pl}}{(T_l - T_{l_1}) + (T_{s_1} - T_s)} \quad (8)$$

Исходя из этого, уточненная методика расчета обобщенной теплоемкости выглядит так:  $c = c_g T > T_l$

$$c = \frac{Q_{pl}}{T_l - T_{l_1} + T_{s_1} - T_s} T_l \geq T \geq T_{l_1} \quad (9)$$

$$c = \frac{Q_{pl}}{T_l - T_{l_1} + T_{s_1} - T_s} T_{s_1} \geq T \geq T_s \quad (10)$$

$$c = c_{iv} T < T_s$$

Если по расчету температура меньше  $T_{l_1}$  и больше  $T_{s_1}$ , то она принимается равной  $T_{s_1}$ . Тем самым моделируется скачек температур.

Разности  $T_l - T_{l_1}$  и  $T_{s_1} - T_s$  в работе приняты одинаковыми и, равными  $20^\circ C$ .

Рассмотрим начальные и граничные условия.

Приведенное уравнение теплопроводности является не полным без начальных и граничных условий, которые и определяют конкретное решение задачи.

Учитывали, что граничные условия бывают трех видов:

- 1-го рода, когда в некоторой точке  $R$  известна функция температуры от времени  $T(R, \tau) = f(\tau)$ ;

- 2-го рода, когда в некоторой точке  $R$  известна функция от производной температуры по координате, которая соответствует:

$$\frac{\partial T(R, \tau)}{\partial r} = f_1(T); \quad (11)$$

В данном случае  $f_1(T)$ , будет легко вычисляемый тепловой поток от излучения, который зависит от температуры в ближайшем окружении точки

$$Q = 3.8k \left[ \left( \frac{T(R) + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_c + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (12)$$

где в коэффициент 3.8 входит ряд параметров: степень черноты поверхности;

$k$  - коэффициент, учитывающий конвекцию;  $T_c$  - температура окружающей среды.

Поскольку по определению тепловой поток это  $\lambda \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r}$  (размерность  $\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$ ), то можно написать условие второго рода в виде

$$\lambda \frac{\partial T(R, \tau)}{\partial r} = 3.8k \left\{ \left[ \frac{T(R, \tau) + 273}{100} \right]^4 - \left( \frac{T_c + 273}{100} \right)^4 \right\} \quad (13)$$

Оно соответствует наружной части металлической формы, а, после её снятия - наружной поверхности вала.

Это условие (13) также применяется при учете излучения между отливкой и металлической формой.

Если  $R$  соответствует внутренней точке металлической формы, то точка  $A$  - наружной части отливки. При этом, знак в выражении соответствует приведенному в формуле. Соответственно, если точка  $R$  соответствует наружной точке отливки, то знак следует поменять на противоположный. Приведенная формула в некоторой степени аналогична условию 3-го рода, которое рассмотрено ниже.

Условие 2-го рода применяли для центра отливки, где тепловой поток равен нулю.

Условие 3-го рода, применяли когда в некоторой точке  $R$  тепловой поток равен коэффициенту теплоотдачи (теплопередачи)  $\alpha$  ( $\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град}}$ ) умноженному на известную функцию от разности температур в соседних точках:

$$\lambda \frac{\partial T(R, \tau)}{\partial r} = \alpha \{ f_2[T(R, \tau)] - f_3[T(A, \tau)] \}, \quad (14)$$

например:  $\lambda \frac{\partial T(R, \tau)}{\partial r} = \alpha [T(R, \tau) - T(A, \tau)]$

Расчет кристаллизации валков в металлической форме разбивали на 2 этапа: один для вала, другой – для формы. Оба они связаны между собой тем, что тепловой поток от вала к форме один и тот же. Можно было бы предположить, что в начальные моменты времени это единый расчет, но он длится считанные секунды, после которых начнется частичный контакт затвердевшей корки на границе с формой, которая учитывается с помощью граничных условий третьего рода, использующих понятие коэффициента теплопередачи. В дальнейшем при усадке вала нет вообще никакого контакта между металлом и формой, а граничные условия хорошо описываются условиями второго рода, в которых тепловой поток рассчитывается с помощью только излучения.

На границе форма - окружающая среда используются граничные условия второго рода: излучение с учетом конвективной составляющей. Последняя учитывалась с помощью коэффициента 1.5 в тепловом потоке от излучения.

Существует еще одно граничное условие для центра вала, в котором тепловой поток равен нулю.

Особенностью центробежного литья является то, что оно производится порциями: вначале заливается первый слой (рабочий из легированного металла), потом - второй, далее – третий (формируют сердцевину вала). Граничные условия на внутренней части отливки первых двух этапов заливки металла – частичное излучение температуры в окружающую среду:

$$\lambda \frac{\partial T(R, \tau)}{\partial r} = 3.8k \left\{ \left[ \frac{T(R, \tau) + 273}{100} \right]^4 - \left( \frac{T_c + 273}{100} \right)^4 \right\}, \quad (15)$$

где  $k$  принято равным 0.025.

После третьего этапа заливки металла граничное условие – нулевой поток в центре вала. Поэтому для дальнейших исследований использован показатель обобщенной удельной теплоемкости (описано выше).

Конкретно о начальных и граничных условиях. Обозначили

$R$  - наружный радиус формы;  $R_{vk}$  - радиус отливки вала;  $A$  - точка отливки у контакта с формой (ее координата точно неизвестна, но в расчетах принято, что она расположена рядом с  $R_{vk}$ , то есть, отстоит от этой точки на шаг сеточной области, описание которой рекомендуется

использовать в разностной схеме расчета);  $R_1$  - внутренний радиус, кристаллизующейся первой порции металла при отливке;  $R_2$  - внутренний радиус - второй порции металла при отливке;  $B$  - точка центра отливки.

Начальные условия при послойной заливке металла: для металлической формы  $T(r,0) = T_k$  ( $R \geq r \geq R_{vk}$ ), где  $T_k$  - температура нагрева формы.

Первая порция заливки металла  $T(r,0) = 1395$  ( $A \geq r \geq R_1$ ).

Вторая порция заливки металла  $T(r,0) = 1300$  ( $A_1 \geq r \geq R_2$ ), где  $A_1$  - радиус, для которого температура  $T_{A_1} < T_s$ .

Третья заливка  $T(r,0) = 1300$  ( $A_2 \geq r \geq 0$ ), где  $A_2$  - радиус, для которого температура  $T_{A_2} < T_s$ .

Граничные условия для формы и отливки в месте их контакта.

В точке  $r = R$

$$\lambda \frac{\partial T(R, \tau)}{\partial r} = 3.8k \left\{ \left[ \frac{T(R, \tau) + 273}{100} \right]^4 - \left( \frac{T_c + 273}{100} \right)^4 \right\},$$

где  $k = 1.5$

В точке  $r = R_{vk}$  (соответственно в точке  $A$ , как отмечалось выше, знак теплового потока противоположный).

Если время  $\tau \leq \tau_1$ , то  $\lambda \frac{\partial T(R_m, \tau)}{\partial r} = \alpha [T(R_m, \tau) - T(A, \tau)]$ , где

$\alpha$  (коэффициент теплоотдачи) в работе принят равным 250.

Если время  $\tau > \tau_1$ , то  $\lambda \frac{\partial T(R_m, \tau)}{\partial r} = 3.8k \left\{ \left[ \frac{T(R_m, \tau) + 273}{100} \right]^4 - \left[ \frac{T(A, \tau) + 273}{100} \right]^4 \right\}$

Время  $\tau_1$  выбирали таким образом, чтобы с одной стороны температура внутренней части формы была порядка 500°C, с другой стороны, чтобы кривая охлаждения имела излом при переходе с одного условия на другое, т.е. более мягкое с точки зрения передачи тепла от отливки к кокилю.

Граничные условия для отливки в точке с наименьшим радиусом после первой и второй заливок в точках  $r = R_1$  и  $r = R_2$

$$\lambda \frac{\partial T(R_{1,2}, \tau)}{\partial r} = 3.8k \left\{ \left[ \frac{T(R_{1,2}, \tau) + 273}{100} \right]^4 - \left( \frac{T_c + 273}{100} \right)^4 \right\}$$

После третьей заливки в точке  $r = 0$

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial r} = 0$$

Рассмотрим характеристику принятой разностной схемы.

По определению частная производная по переменной  $r$  - это

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} = \lim_{\Delta r} \frac{T(r + \Delta r, \tau) - T(r, \tau)}{\Delta r}, \text{ когда } \Delta r \text{ стремится к нулю.} \quad (16)$$

При достаточно малом  $\Delta r$  принимается, что предел, написанный в правой части, приблизительно равен - левой  $\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \approx \frac{T(r + \Delta r, \tau) - T(r, \tau)}{\Delta r}$

$$\text{Аналогично, вторая частная производная } \frac{\partial^2 T(r, \tau)}{\partial r^2} = \lim_{\Delta r} \frac{\frac{\partial T(r + \Delta r, \tau)}{\partial r} - \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r}}{\Delta r},$$

когда  $\Delta r$  стремится к нулю.

Также, как для первой производной, можно приближенно написать

$$\frac{\partial^2 T(r, \tau)}{\partial r^2} \approx \frac{\frac{\partial T(r + \Delta r, \tau)}{\partial r} - \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r}}{\Delta r} \quad (17)$$

Заменяем в этом выражении частные производные первого порядка, полученными выше, их приближенными значениями

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 T(r, \tau)}{\partial r^2} &\approx \frac{\frac{T(r + 2\Delta r, \tau) - T(r + \Delta r, \tau)}{\Delta r} - \frac{T(r + \Delta r, \tau) - T(r, \tau)}{\Delta r}}{\Delta r} = \\ &= \frac{T(r + 2\Delta r, \tau) - 2T(r + \Delta r, \tau) + T(r, \tau)}{\Delta r^2} \end{aligned} \quad (18)$$

Запишем приближенное выражение для первой частной производной по времени. Ее можно записать по аналогии с первой частной производной по радиусу:

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} \approx \frac{T(r, \tau + \Delta \tau) - T(r, \tau)}{\Delta \tau}$$

Отметим следующее относительно исходного дифференциального уравнения. В нем вторая частная производная не от  $T(r, \tau)$ , а от  $\lambda(r, \tau) \cdot T(r, \tau)$  Поэтому вместо

$$\frac{T(r + 2\Delta r, \tau) - 2T(r + \Delta r, \tau) + T(r, \tau)}{\Delta r^2} \text{ запишем:}$$

$$\frac{\lambda(r + 2\Delta r, \tau)T(r + 2\Delta r, \tau) - 2\lambda(r + \Delta r, \tau)T(r + \Delta r, \tau) + \lambda(r, \tau)T(r, \tau)}{\Delta r^2} \quad (19)$$

Предложенная методика теоретического описания условий кристаллизации многослойной отливки прокатных валков центробежным методом разработана для определения минимизации напряжений и наиболее полных структурных превращений, связанных с распадом остаточного аустенита в процессе охлаждения отливки в форме. Ее использование будет эффективным при прогнозировании параметров подготовки литейной формы для конкретного применения в технологической цепочке.

**Выводы.** Данная методика дает возможность производить расчет теплового потока в отливке при производстве двухслойных прокатных валков методом центробежного литья и позволяет определить режимы литья, при которых будет обеспечена минимизация литейных напряжений и оптимальное структурообразование в металле рабочего слоя.

### Литература.

1. Будагьянц Н.А. Литые прокатные валки. / Н.А. Будагьянц, В.Е. Карский – М.: Машиностроение, 1983. 175 с.
2. Гималетдинов Р.Х. Производство крупногабаритных центробежнолитых валков для станов горячей прокатки. / Р.Х. Гималетдинов, Г.С. Мирзоян, А.В. Копьев и др. // Черметинформация. Биллютенъ. «Черная металлургия», 2002, №9. С.8-9. 3. Вдовин К.Н. Прокатные валки. / К.Н. Вдовин, Р.Х. Гималетдинов, В.М. Колокольцев, С.В. Цыбров // Монография. – Магнитогорск, МГТУ. – 2005. – 543 с.
4. Скобло Т.С. Прокатные валки из высокоуглеродистых сплавов / Т.С. Скобло, Н.М. Воронцов, С.И. Рудюк / [под. Ред. Скобло Т.С.]. - М.: Металлургия, 1994. - 336 с.
5. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики. / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский - М.: Наука, 1977. - 735 с.
6. Скобло Т.С. Особенности структурообразования карбидной фазы хромоникелевого чугуна прокатных валков / Т.С. Скобло, А.К. Автухов, Р.Г. Соколов // Научное обозрение. - 2015. - №22 С.178-183.
7. Скобло Т.С. Применение компьютерного анализа металлографических изображений при исследовании структуры высокохромистого чугуна / Т.С. Скобло, О.Ю. Клочко, Е.Л. Белкин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2012. - №6(78). - С.35-42.

Стаття надійшла до редакції 27.03.2016.