

ностной зоне. Из-за высокой устойчивости хромистого аустенита чугуны с указанными добавками имеют более высокую твердость сравнительно с другими исследуемыми сплавами. При малой добавке хрома (0,1%) в узкой (0,7 мм) поверхностной зоне практически отсутствует отбел. Зона междендритного графита развита слабо. Твердость по сечению образцов сравнительно одинакова и соответствует 90–84 HRB.

В заключение следует отметить, что результаты исследования имеют в первую очередь сравнительный характер и позволяют оценить качественное и количественное влияние легирующих добавок. В реальных условиях уменьшение интенсивности охлаждения при образовании газового зазора в кристаллизаторе и последующий разогрев наружных слоев отливки за пределами кристаллизатора до температур 1000–1100°C позволяет полностью ликвидировать отбел даже при наличии в чугуне карбидообразующих элементов.

УДК 621.01

О.С.Комаров, канд. техн. наук (БПИ)

#### МЕТОДИКА РАСЧЕТА СТРУКТУРЫ КОКИЛЬНЫХ ОТЛИВОК ИЗ СЕРОГО ЧУГУНА

При разработке методики расчета изменения структуры по сечению отливок из серого чугуна, полученных в металлические формы, приняты следующие допущения: заливку формы считали мгновенной, предполагалось отсутствие корки отбела на поверхности отливки, отливка имеет форму плиты, размеры которой позволяют исключить влияние торцов, образование воздушного зазора между затвердевающей отливкой и формой не учитывали.

Разбивка на отдельные периоды приведена на рис. 1.

В ходе первого и второго (рис. 1, а, б) периодов температура прилегающего к форме слоя снижается вначале до температуры зарождения аустенита  $T_a$ , а затем аустенитно-графитной (А-Г) эвтектики  $T_{\text{э}}$ . В третьем периоде (рис. 1, в) она достигает температуры площадки кристаллизации, а в четвертом – заканчивается кристаллизация в этом слое (рис. 1, г). В пятом периоде (рис. 1, д) параллельно с ростом твердой корки наблюдается продвижение фронта охлаждения к центру отливки. В шестом – температура центральной зоны достигает  $T_a$  (рис. 1, е). В седьмом – фронт кристаллизации аустенита продвигается к

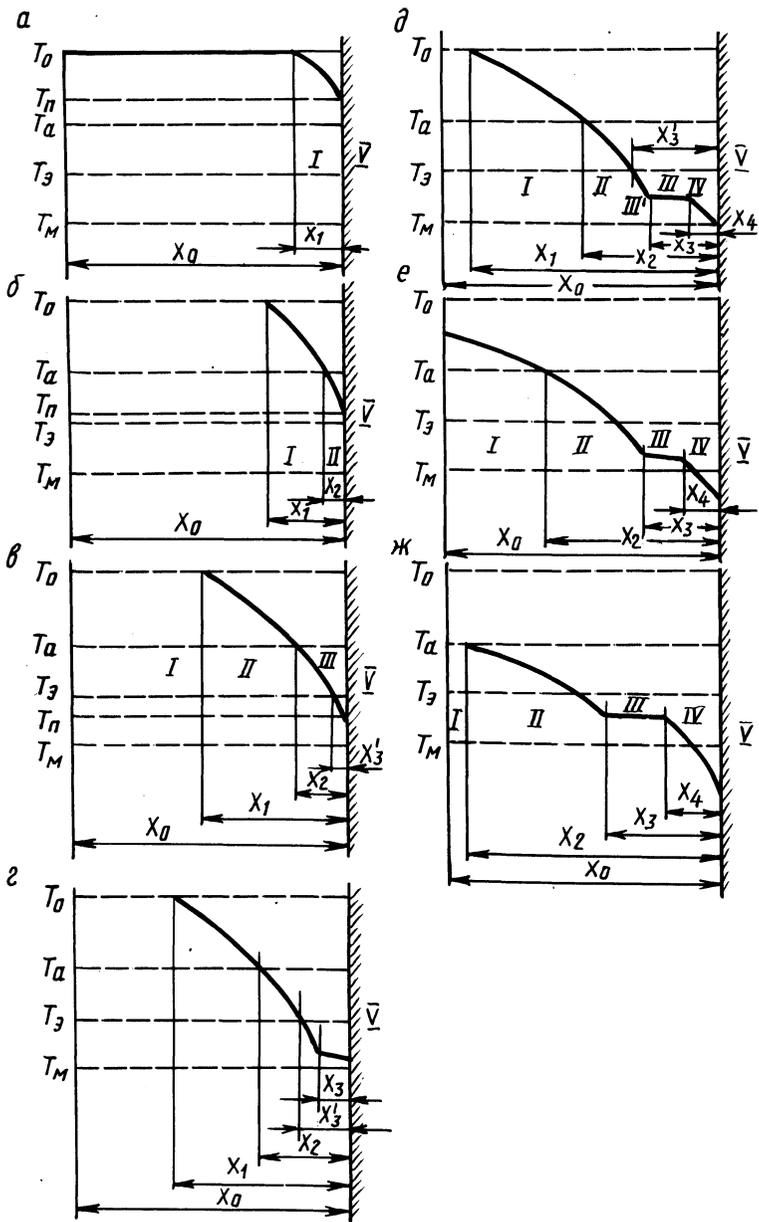


Рис. 1. Распределение температур в отливке для различных периодов кристаллизации.

центру (рис. 1, ж). В восьмом – температура центра снижается до  $T_{\text{э}}$ . В девятом – температура центра выходит на площадку кристаллизации эвтектики и в десятом – завершается рост А-Г колоний в центральной зоне отливки. Для трех последних периодов распределение температур на рис. 1 не показано.

На рис. 1 приняты обозначения: I – охлаждаемый расплав; II – зона кристаллизации аустенита; III – зона зарождения А-Г колоний; III – зона кристаллизации А-Г эвтектики; IV – твердая корка; V – форма.

Уравнение теплового баланса для четвертого периода включает следующие компоненты:

$$dQ_5 = dQ_{3\text{э}} + dQ_{3\text{ак}} + dQ_{3'\text{ак}} + dQ_{3\text{э}} + dQ_{2\text{а}} + dQ_{2\text{ак}} + dQ_1. \quad (1)$$

Это уравнение может быть приспособлено к каждому из периодов путем исключения соответствующих составляющих. В уравнении цифровые индексы указывают, к какой зоне относится составляющая; э – эвтектика; а – аустенит; ак – аккумулярованная (физическая) теплота;  $dQ_1$  – теплота, проводимая через зону I за счет разности температур;  $dQ_5$  – отводимая формой теплота:

$$dQ_1 = \lambda_{1\text{эф}} h \frac{T_0 - T_{\text{II}}}{x_1} F dt. \quad (2)$$

$$\text{Здесь } T_0 - T_{\text{II}} = \frac{T_0 - T_{05}}{1 + h\lambda_{1\text{эф}}/\alpha x_1},$$

где  $\lambda_{1\text{эф}}$  – эффективная теплопроводность расплава, учитывающая наличие конвективных потоков;  $h$  – показатель степени параболы;  $T_{05}$  – начальная температура формы;  $\alpha$  – коэффициенты теплопередачи;  $t$  – время;  $F$  – площадь плиты;  $T_0$  – начальная температура расплава;  $T_{\text{II}}$  – температура расплава вблизи поверхности отливка – форма,

$$dQ_{1\text{ак}} = \frac{1}{h+1} F \rho_1 c_1 (T_0 - T_{05}) \frac{1 + 2h\lambda_1/\alpha x_1}{(1 + h\lambda_1/\alpha x_1)^2} dx; \quad (3)$$

$$dQ_5 = \frac{F b_5 (T_{\text{II}} - T_{05}) dt}{\sqrt{\pi t}}, \quad (4)$$

где  $\rho$  и  $c$  – плотность и удельная теплоемкость;  $b_5$  – коэффициент тепловой активности формы.

Составляющая  $dQ_{2ак}$  рассчитывается по формуле, аналогичной (3), но вместо  $(T_0 - T_{05})$  необходимо подставить  $(T_0 - T_{II})$  и вместо  $X_1 - X_2$ . Для второго-пятого периодов  $dQ_1$  находится по (2), но  $T_0 - T_{II}$  следует заменить на  $T_0 - T_a$ , а  $X_1$  — на  $(X_1 - X_2)$ . В шестом периоде температура расплава снижается в интервале  $T_0 - T_a$ . В связи с этим

$$dQ_1 = F\rho_1 c_1 \frac{a_{эф}}{X_0^2} (T_0 - T_a) e^{-(h+1)(Fo - Fo_5)} (x_0 - x_2) dt - F\rho_1 c_1 \frac{1}{h+1} (T_0 - T_2) e^{-(h+1)(Fo - Fo_5)} dX_2 \quad (5)$$

где  $a_{эф}$  — эффективный коэффициент температуропроводности;  $Fo$  — критерий Фурье (безразмерное время).

Для второго периода  $dQ_{2a}$  можно найти по формуле

$$dQ_{2a} = \frac{FL_2 \rho_2 (T_a - T_{05})}{(h+1)(1 + h\lambda_1/\alpha X_2)} \left[ \frac{\Psi}{T_a - T_{\text{э}}} + \nu \frac{(1 + 2h\lambda_1/\alpha X_2)}{(1 + h\lambda_1/\alpha X_2)^2} \right] dX_2, \quad (6)$$

где  $\Psi$  — относительное количество твердой фазы при любой температуре в интервале  $T_a - T_{\text{э}}$ ;  $\nu = \frac{d\Psi}{dT}$  — темп кристаллизации, характеризующий неравномерность выделения аустенита в интервале  $T_a - T_{\text{э}}$ .

Начиная с третьего периода удобно объединять вместе  $dQ_{2a}$  и  $dQ_{2ак}$  и рассчитывать их сумму, используя  $c_{эф}$  — эффективную теплоемкость, учитывающую теплоту кристаллизации аустенита

$$dQ_{2a} + dQ_{2ак} = \frac{F\rho_2 c_{эф}}{h+1} \left[ T_a - T_{\text{э}} + \frac{1}{h+1} (T_{\text{э}} - T_{II}) \right] d \times (X_2 X_3'). \quad (7)$$

В третьем периоде в зоне III появляется А-Г эвтектика

$$dQ_{3'_{\text{э}}} = FL_{\text{э}} \rho_{\text{э}} X_3' dV_{\text{э}} + FL_{\text{э}} \rho_{\text{э}} V_{\text{э}} dX_3'. \quad (8)$$

Удельный объем, занимаемый эвтектикой  $V_{\text{э}}$ , может быть найден на основании уравнений кинетической теории кристаллизации

$$V_{\text{э}} = \frac{4}{3} \pi N_0 (dr/dt)^3 t^3 + 1 - \exp\left[\frac{\pi}{3} n_{\text{ср}} (dr/dt)^3 t^4\right], \quad (9)$$

где  $N_0$  — число готовых центров кристаллизации;  $n_{\text{ср}}$  — средняя

скорость зарождения новых центров;  $dr/dt$  - скорость роста ячеек эвтектики.

Средняя по объему переохлажденного относительно  $T_{\Theta}$  расплава скорость роста

$$\frac{dr}{dt} = \mu \sqrt{\frac{\lambda_1 (T_{\Theta} - T_{3'cp})}{2 L_{\Theta} \rho_{\Theta} t}}, \quad (10)$$

где  $\mu = \frac{T_p - T_M}{T_{\Theta} - T_M}$  - коэффициент, учитывающий снижение температуры расплава  $T_p$ , вызванное замедлением роста А-Г ячеек в связи с наличием в расплаве примесей.

Так как концентрация примесей возрастает с уменьшением коэффициента распределения  $K_D$  и скорости ее диффузии  $D$ , а также с увеличением скорости роста ячеек, то с физической точки зрения

$$\mu = B \frac{K_D}{1 - K_D} \frac{D}{dr/dt}, \quad (11)$$

где  $B$  - коэффициент пропорциональности.

Величина  $n_{cp}$ , входящая в (9), зависит от среднего значения переохлаждения в зоне III'

$$n_{cp} = n^*(\Delta T_{3'cp}) S, \quad (12)$$

где  $S$  - показатель степени;  $n^*$  - удельная скорость зарождения при переохлаждении на один градус

$$\begin{aligned} \Delta T_{3'cp} &= T_{\Theta} - T_{3'cp} = \frac{1}{h+1} (T_{\Theta} - T_{II}) = \\ &= \frac{T_{\Theta} - T_{05}}{(h+1)(1 + h\lambda_1 / \alpha X_{3'})}. \end{aligned} \quad (13)$$

Для четвертого-восьмого периодов

$$\Delta T_{3'cp} = \frac{1}{h+1} [T_{\Theta} - (1 - \mu)(T_{\Theta} - T_M)]; \quad (14)$$

$dQ_{3'ак}$  для третьего периода может быть рассчитана по формуле

$$dQ_{3'ак} = F \rho_1 c_1 X_3' d(\Delta T_{3'cp}) + F \rho_1 c_1 (\Delta T_{3'cp}) dX_3'. \quad (15)$$

В последующие периоды

$$dQ_{3'ак} = \frac{1}{h+1} F \rho_1 c_1 [T_{\Theta} - (1 - \mu)(T_{\Theta} - T_M)] d(X_3' - X_3). \quad (16)$$

Начиная с четвертого периода в уравнение теплового баланса входит  $dQ_{3\Theta}$ , которая может быть рассчитана по формуле, сходной с (8), но в выражение для расчета  $dr/dt$  (10) вместо

$T_{\Theta} - T_{3'cp}$  следует подставить  $T_{\Theta} - (1 - \mu)(T_{\Theta} - T_M)$ . Кроме того, начиная с пятого периода необходимо скорректировать выражение (12) для расчета средней скорости зарождения центров кристаллизации. На рис. 2 схематически показано распределение температур для некоторых последовательно возрастающих моментов времени  $t' < t'' < t'''$ . Условно принят прямолинейный характер изменения температуры в зоне III. В слое, удаленном от границы отливка—форма на расстояние  $X_3$ , в момент  $t''$  наблюдается максимальное переохлаждение. Независимо от характера

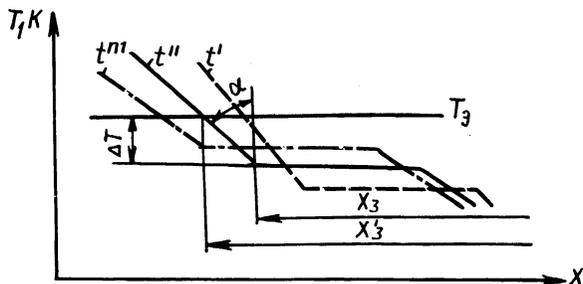


Рис. 2. Схема к расчету продолжительности зарождения ячеек.

связи скорости зарождения с переохлаждением эта величина максимального переохлаждения будет определять результирующее число ячеек в рассматриваемом слое отливки. Из геометрических соотношений схемы получим

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{X_2 - X_3}{T_a - T_{\Theta} + \Delta T} \approx \frac{X_2 - X_3}{T_a - T_{\Theta}}. \quad (17)$$

Тогда время зарождения

$$t^* = \frac{\Delta T \operatorname{tg} \alpha}{dX_3/dt}. \quad (18)$$

Принимая в (12)  $S = 2$ , получим для пятого—седьмого периодов

$$N = N_0 + \frac{n^*(T_{\Theta} - T_M)^3(1 - \mu)^3(X_2 - X_3)}{2[T_a - T_{\Theta} + (1 - \mu)(T_{\Theta} - T_M)]dX_3/dt}. \quad (19)$$

Для восьмого периода

$$t^* = \frac{(T_{\Theta} - T_M)(1 - \mu)(X_0 - X_3)}{-(h+1)(F_0 - F_07) + (1 - \mu)(T_{\Theta} - T_M)dX_3/dt} \cdot e^{[(T_a - T_{\Theta})e]}. \quad (20)$$

Во все последующие периоды начиная с пятого

$$dQ_{3\text{ак}} = \frac{1}{h+1} F \rho_1 c_1 (1 - \mu) (T_{\ominus} - T_M) dX_3. \quad (21)$$

В четвертом периоде  $X_4 = 0$ .

В уравнениях теплового баланса для пятого – десятого периодов присутствует  $dQ_4$ :

$$dQ_4 = \frac{1}{h+1} F \rho_4 c_4 [T_{\ominus} - (1 - \mu)(T_{\ominus} - T_M - T_{05})] \times \\ \times \frac{1 + 2h\lambda_4/\alpha X_4}{(1 + h\lambda_4/\alpha X_4)^2} \cdot dX_4. \quad (22)$$

В девятом периоде температура центра отливки снижается от  $T_{\ominus}$  до величины  $(1 - \mu)(T_{\ominus} - T_M)$ . Пренебрегая тепловым эффектом роста готовых центров кристаллизации в начальный период их развития, можно определить изменение во времени температуры центра ( $T_{\text{ц}}$ ):

$$F_0 - F_{08} = \frac{1}{h+1} \ln \frac{(1 - \mu)(T_{\ominus} - T_M)}{T_{\text{ц}} - T_{\ominus} + (1 - \mu)(T_{\ominus} - T_M)}. \quad (23)$$

Принимая значение  $T_{\text{ц}}$  близким к  $T_{\ominus} - (1 - \mu)(T_{\ominus} - T_M)$ , находим продолжительность девятого периода и от нее переходим к расчету числа центров кристаллизации и  $dQ_{3\ominus}$ .

Дополнительные уравнения, необходимые для исключения из уравнений теплового баланса лишних переменных  $X_2$ ,  $X_3'$  и  $X_4$ , можно составить исходя из равенства тепловых потоков на границе смежных зон. Предлагаемый вариант решений не учитывает изменения распределения температур в зоне I вследствие выделения аустенита. При желании решения можно уточнить путем составления дополнительных уравнений теплопроводности в зоне I для каждого из периодов.

В конечном итоге структура чугуновых отливок определяется числом А-Г ячеек и скоростью их роста в рассматриваемом сечении отливки. Разбивая отливку на ряд плоскопараллельных сечений, можно для каждого из них установить N и на основании разности времени подхода к ним зоны III и зоны IV найти продолжительность и среднюю скорость роста ячеек. В дальнейшем, используя решения Тиллера, можно перейти от скорости роста к частоте ветвления графитного скелета, т. е. к структуре чугуновых отливок.