

Таблица

Условия литья	Содержание меди по сечению цилиндри- ческой отливки				Добавка
	центр	15 мм от центра	30 мм от центра	поверх- ность	
Графитовая	4,33	4,46	4,62	4,66	-
форма	4,22	4,45	4,79	4,82	Ca
	4,41	4,42	4,47	4,59	Ni

Поверхностно-активный элемент (кальций) усиливает как макро- так и микроликвацию меди по сечению отливки и сосредотачивается в межосных промежутках, затвердевающих в последнюю очередь. Никель (инактивный элемент), равномерно распределенный по сечению зерна, уменьшает макро- и микроликвацию меди по сечению отливки. Таким образом, состав сплава оказывает большое влияние на макро- и микроликвацию элементов в сплаве. Распределение элементов сплава определяется их поверхностной активностью и характером циркуляции жидкой фазы в переходной зоне затвердевающей отливки.

#### Л и т е р а т у р а

1. Соболев В.Ф. О причинах появления ликвационных наплывов. В сб. "Вопросы прочности и пластичности" Минск, "Наука и техника", 1972.

А.М. Дмитривич, С.С. Гурии, В.П. Бугай

#### ТЕРМИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ПОЛЫХ КОЛЬЦЕВЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТЛИВКАХ

Температурные напряжения, возникающие в полых кольцевых биметаллических отливках, обусловлены в основном неравномерностью температурного поля отливки и препятствием усадке залитой части отливки со стороны полый вставки. Если между вставкой и заливаемым расплавом находится легкоплавкий промежуточный слой, нанесенный на вставку заранее, то он снижает термические напряжения в отливке, поскольку подплавляется залитым расплавом, частично выдавливается силой усадки в специальную полость в форме и, следовательно, не оказывает существенного сопротивления температурному сжатию отливки. Только после полного затвердевания легкоплав-

кого слоя возникает силовое взаимодействие между поллой вставкой и залитой частью отливки, что обуславливает их напряженное состояние.

Исходя из поставленной задачи, необходимо опередить:

а) термические напряжения до момента затвердевания легкоплавкого промежуточного слоя;

б) термические напряжения после затвердевания промежуточного слоя;

в) остаточные термические напряжения (возникающие после окончательного остывания отливки).

Эти задачи будут решаться в предположении, что начиная с момента затвердевания промежуточного слоя, поведение материала залитой части отливки и вставки можно считать упругим. Будем считать напряженное состояние в отливке плоским.

Примем обозначения:

$\delta_r, \delta_\theta$  — радиальные и окружные напряжения;  $E$  — модуль Юнга;  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $\alpha$  — коэффициент линейного расширения;  $T_0$  — "начальная" температура;  $T$  — температура в произвольный момент времени;  $R$  — наружные радиусы вставки и отливки;  $\rho$  — внутренний радиус вставки;  $r$  — расстояние рассматриваемой точки отливки до ее оси симметрии.

Во всех случаях данные, относящиеся к внутренней части отливки, будем помечать индексом (1), данные, относящиеся к внешней части отливки — индексом (2).

Используя уравнения осесимметричной задачи термоупругости и проведя математические преобразования применительно к условиям получения биметаллических отливок с легкоплавким промежуточным слоем, получаем:

а) термические напряжения до момента затвердевания промежуточного слоя

$$\delta_r^{(1)} = \frac{\alpha_1 E_1}{2} \left(1 - \frac{\rho^2}{r^2}\right) [\Theta_1(R_1, T) - \Theta_1(r_1, T)]$$

$$\delta_\theta^{(1)} = \frac{\alpha_1 E_1}{2} \left[ \left(1 + \frac{\rho^2}{r^2}\right) \Theta_1(R_1, T) + \left(1 - \frac{\rho^2}{r^2}\right) \times \right. \\ \left. \times \Theta_1(r, T) - 2(T - T_0) \right],$$

$$\delta_r^{(2)} = \frac{\alpha_2 E_2}{2} \left(1 - \frac{R_1^2}{r^2}\right) [\Theta_2(R_2, T) - \Theta_2(r, T)],$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta}^{(2)} = & \frac{\alpha_2 E_2}{2} \left[ \left(1 + \frac{R_1^2}{r^2}\right) \Theta_2(R_2, T) + \right. \\ & \left. + \left(1 - \frac{R_1^2}{r^2}\right) \Theta_2(r, T) - 2(T - T_0) \right]; \end{aligned}$$

б) термоупругие напряжения после затвердевания промежуточного слоя

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(1)} = & \frac{\alpha_1 E_1}{2} \left(1 - \frac{\nu^2}{r^2}\right) [\Theta_1(R_1, T) - \Theta_1(r, T)] - \\ & - \frac{R_1^2}{R_1^2 - \nu^2} \left(1 - \frac{\nu^2}{r^2}\right) P, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta}^{(1)} = & \frac{\alpha_1 E_1}{2} \left[ \left(1 + \frac{\nu^2}{r^2}\right) \Theta_1(R_1, T) + \left(1 - \frac{\nu^2}{r^2}\right) \times \right. \\ & \times \Theta_1(r, T) - 2(T - T_0) \left. \right] - \frac{R_1^2}{R_1^2 - \nu^2} \left(1 + \frac{\nu^2}{r^2}\right) P, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(2)} = & \frac{\alpha_2 E_2}{2} \left(1 - \frac{R_1^2}{r^2}\right) [\Theta_2(R_2, T) - \Theta_2(r, T)] + \\ & + \frac{R_1^2 P}{R_2^2 - R_1^2} \left(1 - \frac{R_1^2}{r^2}\right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta}^{(2)} = & \frac{\alpha_2 E_2}{2} \left[ \left(1 + \frac{R_1^2}{r^2}\right) \Theta_2(R_2, T) + \right. \\ & \left. + \left(1 - \frac{R_1^2}{r^2}\right) \Theta_2(r, T) - 2(T - T_0) \right] + \frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \times \\ & \times \left(1 + \frac{R_1^2}{r^2}\right) P; \end{aligned}$$

в) термоупругие остаточные напряжения

$$\sigma_{\text{рост}}^{(1)} = - \frac{R_1^2}{R_1^2 - \rho^2} (1 - \frac{\rho^2}{r^2}) P_{\text{ост}},$$

$$\sigma_{\Theta \text{ ост}}^{(1)} = - \frac{R_1^2}{R_1^2 - \rho^2} (1 + \frac{\rho^2}{r^2}) P_{\text{ост}},$$

$$\sigma_{\text{рост}}^{(2)} = \frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} (1 - \frac{R_2^2}{r^2}) P_{\text{ост}},$$

$$\sigma_{\Theta \text{ ост}}^{(2)} = \frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} (1 + \frac{R_2^2}{r^2}) P_{\text{ост}}.$$

Значения  $P$  и  $P_{\text{ост}}$  определяют по формулам:

$$P = \frac{\alpha_2 S_2 - \alpha_1 S_1 - [\alpha_2 \Theta_2(R_2, T) - \alpha_1 \Theta_1(R_1, T)]}{L}$$

$$P_{\text{ост}} = \frac{\alpha_2 S_2 - \alpha_1 S_1}{L},$$

где

$$L = \frac{1}{E_2} \left[ \frac{R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} + \nu_2 \right] + \frac{1}{E_1} \left[ \frac{R_1^2 + \rho^2}{R_1^2 - \rho^2} - \nu_1 \right];$$

$$\Theta_1(r, T) = \frac{2}{r^2 - \rho^2} \int_{\rho}^r (T - T_0) r dr;$$

$$\Theta_2(r, T) = \frac{2}{r^2 - R_1^2} \int_{R_1}^r (T - T_0) r dr.$$

Анализ приведенных формул показывает, что термоупругие напряжения в полых кольцевых биметаллических отливках определяются средними температурами вставки и залитой части отливки в заданный момент времени, а также температурными константами, характеризующими свойства материалов, составляющих отливку.

## Л и т е р а т у р а

1. Коваленко А.Д. "Введение в термоупругость", М., Машгиз, 1970.

### В.И. Тугов, В.А. Гринберг, А.П. Михалевич РАСЧЕТ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ПЛОСКОЙ НЕПРЕРЫВНОЙ ОТЛИВКИ

Проектирование технологии непрерывного литья невозможно без теоретического анализа процесса, который предполагает установление взаимосвязи между технологическими параметрами процесса, термофизическими свойствами материала отливки и условиями ее охлаждения.

Рассмотрим решение этой задачи для бесконечной пластины при граничных условиях третьего рода.

Выделим в процессе затвердевания промежуток времени и запишем для него условие теплового равновесия системы жидкий металл - затвердевшая часть отливки - окружающая среда в виде

$$dQ_{ж} + dQ_{Т} + dQ_{к} = 0, \quad (1)$$

где  $dQ_{ж}$  - изменение теплосодержания жидкой фазы за время  $dt$ ;  $dQ_{Т}$  - изменение теплосодержания затвердевшей отливки за время  $dt$ ;  $dQ_{к}$  - количество тепла, отведенное в окружающую среду за время  $dt$ .

В формуле (1) теплота перегрева включена в теплосодержание жидкого металла. Учет теплоты перегрева производится следующим образом. Задаваясь временем снятия теплоты перегрева  $t_{п}$ , меньшим полного времени затвердевания отливки  $t_{з}$ , вводим понятие интенсивности выделения теплоты перегрева  $i_{пер}$ :

$$i_{пер} = \frac{dQ_{пер}}{dV}, \quad (2)$$

где  $Q_{пер}$  - теплота перегрева, снятая при затвердевании металла объемом  $V$