С.С. Гурин

ТЕРМИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В КОЛЬЦЕВЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТЛИВКАХ С ПОДПЛАВЛЯЮЩИМИСЯ ПЕРЕГОРОДКАМИ

При изготовлении биметаллических отливок можно применять подплавляющиеся перегородки,устанавливаемые в зоне перехода одного металла в другой. Наличие такой перегородки препятствует перемешиванию расплавов при заливке, а ее подплавление в процессе заливки обеспечивает диффузионную связь отдельных частей отливки, залитых разнородными сплавами.

В процессе остывания в отливке возникают напряжения, обусловленные неравномерностью температурного поля и механическим взаимодействием металла отливки с перегородкой, а также неоднородностью пластических деформаций и структурных превращений при высоких температурах. Ввиду сложности задачи будем предполагать, что напряженное состояние в биметаллической отливке с перегородкой мало чем отличается от напряженного состояния в отливке без перегородки, то есть при непосредственном контактировании обоих материалов. Нами также не будут учитываться напряжения, обусловленные неоднородностью пластических деформаций и структурными превращениями.

Задача решается в квазистатической постановке теории упругости, поскольку температурное поле при температурах, соответствующих упругому поведению металлов, меняется медленно.

Введем обозначения:

R_1 – радиус тонкостенной перегородки; R_2 – наружный радиус отливки; E, γ и α – модуль Юнга, коэффициенты Пуассона и линейного расширения материалов отливки; $T = T(r, t)$ – температура в какой-либо точке отливки в момент времени t на расстоянии r от оси отливки; $T_o = const = 20^\circ C$. Индекс 1 относится к внутренней части отливки (цилиндрической), индекс 2 – к ее наружной (кольцевой) части; σ_r, σ_θ, σ_z – температурные радиальные, касательные и осевые напряжения в отливке; $U_r(r, t)$ – радиальные перемещения цилиндрической и кольцевой части отливки; δ_2 и δ_1 – перемещения кольцевой и цилиндрической частей отливки.

Рассмотрим граничные условия задачи:

1. На поверхностях контакта цилиндрической и кольцевой частей отливки радиальные напряжения в контактирующих металлах равны.

2. На наружной поверхности кольцевой части отливки радиальные напряжения равны нулю.

3. Радиальные перемещения в контактирующих металлах на поверхностях контакта не равны, так как они должны отсчитываться от тех положений, которые заняли бы границы цилиндрической и кольцевой части отливки при беспрепятственной усадке.

Если коэффициенты линейной усадки α не равны, эти положения не будут совпадать. Разность между радиальными перемещениями $U_r^{(2)}(r,t)$ и $U_r^{(1)}(r,t)$ в точках контакта составит $R_1\alpha_2 - R_1\alpha_1 = R_1(\alpha_2-\alpha_1)$. Тогда третье граничное условие задачи будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
&\sigma_r^{(1)}\Big|_{r=R_1} = \sigma_r^{(2)}\Big|_{r=R} \\
&\sigma_r^{(2)}\Big|_{r=R_2} = 0 \qquad\qquad (1)\\
&\varepsilon_o^{(2)}(R_1,t) - \varepsilon_o^{(1)}(R_1,t) = \alpha_2 - \alpha_1
\end{aligned}$$

где ε_o – радиальные деформации; $\varepsilon_o = \dfrac{U_r^c}{r}$.

Обозначим $\sigma_r^{(1)}\Big|_{r=R_1} = \sigma_r^{(2)}\Big|_{r=R_1} = -P$.

Тогда напряжения в цилиндрической части отливки можно рассматривать как совокупность температурных напряжений, соответствующих свободной границе, и напряжений, вызванных наружным давлением.

Напряжения в кольцевой части отливки можно рассматривать как совокупность температурных напряжений, соответствующих свободным границам, и напряжений, вызванных внутренним давлением P.

Используя известные формулы для температурных напряжений в сплошном диске, а также формулы для напряжений, вызываемых наружным и внутренним давлением [1, 2, 3] , получаем:

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

$$\sigma_\Theta^{(1)} = \frac{\alpha_1 E_1}{2}\left[\Theta_1(R_1,T) + \Theta_1(r,T) - 2(T-T_o)\right] - P;$$

$$\sigma_r^{(2)} = \frac{\alpha_2 E_2}{2}\left[\left(1+\frac{R_1^2}{r^2}\right)\Theta_2(R_2,T) + \right.$$

$$\left. + \left(1-\frac{R_1^2}{r^2}\right)\Theta_2(r_1 T) - 2(T-T_o)\right] + \frac{R_1^2}{R_2^2-R_1^2}\left(1-\frac{R_2^2}{r^2}\right)P;$$

$$\sigma_\Theta^{(2)} = \frac{\alpha_2 E_2}{2}\left[\left(1+\frac{R_1^2}{r^2}\right)\Theta_2(R_2,T) + \left(1-\frac{R_1^2}{r^2}\right)\Theta_2(r_1 T) - \right.$$

$$\left. - 2(T-T_o)\right] + \frac{R_1^2}{R_2^2-R_1^2}\left(1+\frac{R_2^2}{r^2}\right)P; \quad \sigma_z^{(1)} = \sigma_z^{(2)} = 0.$$

При этом первые два граничные условия выполняются тождественно.

На основании формулы $\varepsilon_o = \frac{1}{E}(\sigma_\Theta - \gamma\sigma_r) + \alpha(T-T_o)$ определяем $\varepsilon_\Theta^{(1)}(R_1 T)$, $\varepsilon_\Theta^{(2)}(R_1,T)$.

$$\varepsilon_\varepsilon^{(1)}(R_1,T) = \alpha_1\Theta_1(R_1,T) + \frac{P(\gamma_1-1)}{E_1}$$

$$\varepsilon_\Theta^{(2)}(R_1,T) = \alpha_2\Theta_2(R_1,T) + \frac{P}{E_2}\left(\frac{R_2^2+R_1^2}{R_2^2-R_1^2} + \gamma_2\right). \tag{3}$$

Подставляя уравнение (3) в третье граничное условие (1), определяем P:

$$P = \frac{(\delta_2-\delta_1) - \left[\alpha_2\Theta_2(R_2 T) - \alpha_1\Theta_1(R_1,T)\right]}{L}, \tag{4}$$

где $$L = \frac{1}{E_2}\left(\frac{R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} + \gamma_2\right) + \frac{1-\gamma_1}{E_1}.$$

После выравнивания температурного поля напряжения в биметаллической отливке могут сохраняться даже в случае отсутствия неоднородности пластических деформаций. Остаточные термоупругие напряжения тогда определяются по формулам (2) и (4), если положить $T = T_0$, $\Theta_2(r,T) = \Theta_1(r,T) = 0$.

$$\sigma^{(1)}_{r\,ост} = -P_{ост}$$

$$\sigma^{(1)}_{\Theta\,ост} = -P_{ост}$$

$$\sigma^{(2)}_{r\,ост} = -\frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2}\left(\frac{R_2^2}{r^2} - 1\right) P_{ост} \qquad (5)$$

$$\sigma^{(2)}_{\Theta\,ост} = \frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2}\left(1 + \frac{R_2^2}{r^2}\right) P_{ост},$$

где $$P_{ост} = \frac{\delta_2 - \delta_1}{\frac{1-\gamma_1}{E_1} + \frac{1}{E_2}\left(\frac{R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} + \gamma_2\right)}.$$

Как видно из вышеприведенных формул, радиальные и касательные остаточные напряжения в кольцевой части отливки достигают максимума на ее внутренней поверхности:

$$\sigma^{(2)}_{r\,ост\,max} = -P_{ост}; \quad \sigma^{(2)}_{\Theta\,ост\,max} = \frac{R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} P_{ост}.$$

При достаточно большой разности $\delta_2 - \delta_1$ может произойти разрушение отливки. При этом касательные напряжения по модулю будут больше радиальных. Если $\delta_2 > \delta_1$, то $\sigma^{(2)}_{\Theta}(R_1)$ будет растягивающим. Поэтому вдоль радиуса отливки может возникнуть трещина.

Если $\delta_1 > \delta_2$, то $\sigma_\Theta^{(2)}(R_1)$ будет сжимающим, $\sigma_r^{(2)}(R_1)$ – растягивающим.

При этой же абсолютной разности $(\delta_2 - \delta_1)$ случай $\delta_1 > \delta_2$ представляется нам менее опасным, чем случай $\delta_2 > \delta_1$, так как $\left|\sigma_r^{(2)}\right|_{r=R_1} < \left|\sigma_\Theta^{(2)}\right|_{r=R_1}$ и вызывающие опасность возникновения трещин максимальные растягивающие напряжения будут меньше, чем в случае $\delta_2 > \delta_1$. При $\delta_1 > \delta_2$ трещины могут возникнуть в кольцевой части отливки в любом направлении и в любом месте.

Литература

1. Безухов Н.И., Баженов В.Л. и др. Расчеты на прочность и колебания в условиях высоких температур. М., 1965.
2. Коваленко А.Д. Введение в термоупругость. Киев, 1970.
3. Абрамов В.В. Остаточные напряжения и деформации в металлах. М., 1963.