

**РАСЧЕТ ТЕРМОНАПРЯЖЕНИЙ В ФУТЕРОВКЕ СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОГО КОВША**

Сталеразливочный ковш представляет собой достаточно сложную конструкцию, состоящую из различных материалов. При заливке в ковш жидкой стали с температурой порядка 1600°C имеет место явление “теплого удара”, при котором внутренняя поверхность и близлежащая к ней область футеровки за счет контакта с жидким металлом резко нагревается. В результате возникают значительные температурные напряжения, которые вызывают образование трещин и могут существенно снизить срок службы ковша. Для уменьшения величины напряжений осуществляют предварительный разогрев футеровки на специальных стендах. При этом в процессе разогрева в ней также появляются термонапряжения, которые ограничивают скорость подъема температуры и соответственно увеличивают энергозатраты и продолжительность процесса.

Для изучения описанных явлений применяются математические модели, основанные на решении задачи термоупругости [1,2]. Наиболее сложные из них учитывают трехмерную геометрию ковша и для практической реализации используют коммерческие пакеты программ для компьютера, например [3]. Недостатком такого подхода является ограничения, присущие даже наиболее универсальным пакетам программ, что не позволяет в полной мере учесть особенности технологии и процессов теплообмена, происходящих при эксплуатации сталеразливочных ковшей. Поэтому для оценки термонапряженного состояния футеровки ковшей можно использовать приближенный подход, основанный на допущении об определяющем влиянии градиента температур в радиальном направлении, т.е. по толщине цилиндрической части ковша. Основанием для такого допущения служит симметричный характер нагрева, а также незначительная неравномерность температуры по высоте ковша, что было получено ранее при моделировании тепловой задачи для сталеразливочного ковша [4].

Математическая постановка задачи термоупругости для двухслойной цилиндрической стенки ковша имеет вид дифференциального уравнения для радиального перемещения слоев с соответственными начальными и граничными условиями:

$$\frac{d^2 u_i}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_i}{dr} - \frac{u_i}{r^2} - \frac{1 + \nu_i}{1 - \nu_i} \beta_{ti} \frac{dt_i}{dr} = 0, \quad (1)$$

где  $u_i$  – радиальное перемещение слоя  $i$ ,  $r$  – радиальная координата,  $\beta_{ti}$  – коэффициент температурного расширения материала для  $i$ -го слоя,  $\nu_i$  – коэффициент Пуассона для материала  $i$ -го слоя,  $t_i$  – температура  $i$ -го слоя.

Решение уравнения (1) записывается в интегрально-дифференциальном виде. Радиальные и окружные напряжения в слое рассчитываются по формулам:

$$\sigma_{ri}(r) = C_i \frac{E_i}{(1 + \nu_i)(1 - 2\nu_i)} - C_{i+1} \frac{E_i}{(1 + \nu_i)r^2} - \frac{\beta_{ti} E_i}{(1 - \nu_i)r^2} \int_{R_i}^r t_i(r) r dr, \quad (2)$$

$$\sigma_{\theta i}(r) = \frac{C_i E_i}{(1 + \nu_i)(1 - 2\nu_i)} + \frac{C_{i+1} E_i}{(1 + \nu_i)r^2} - \frac{\beta_{ti} E_i t_i(r)}{1 - \nu_i} + \frac{\beta_{ti} E_i}{(1 - \nu_i)r^2} \int_{R_i}^r t_i(r) r dr, \quad (3)$$

где  $C_i, C_{i+1}$  – постоянные интегрирования, значения которых определяются из граничных условий.

Постоянные интегрирования уравнений (2) и (3) могут быть вычислены подстановкой соответствующих выражений для напряжений и перемещений.

### Список литературы

1. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1975. – 576 с.
2. Коваленко А.Д. Термоупругость. Киев: Вища школа, 1975. – 216 с.
3. И. Н. Салмаш, А. Н. Смирнов Исследование напряженного состояния и прочности футеровки сталеразливочных ковшей. *Металл и литье Украины*, №9-10, 2010. – С. 48-53.
4. Романько В.В. Математическое моделирование процессов теплообмена при электронагреве сталеразливочных ковшей / В.В. Романько, Я.В. Романько, А.О. Ерёмин // Международная научно-практическая конференция «Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло», 2014.– С. 332–336.