

УДК 621.165

О. Т. ИЛЬЧЕНКО, д-р техн. наук, *Р. Г. АКМЕН*, канд. техн. наук,
Ю. В. ПЕТЕЛЬГУЗОВ, *Л. В. ПОВОЛОЦКИЙ*, канд. техн. наук,
В. А. ПАЛЕЙ, канд. техн. наук

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ТЕРМОУПРУГОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ТЕЛА**

В энергетическом машиностроении значительное внимание уделяется проблеме термической стойкости корпусных элементов турбин. Трудности теоретических исследований данной проблемы общеизвестны. Поэтому в настоящее время основным методом изучения термических напряжений является экспериментальный.

При исследовании термических деформаций с помощью высокотемпературных тензорезисторов изменение сопротивления тензорезистора в зависимости от температуры может в десятки раз превышать изменение сопротивления его вследствие деформации. Поэтому проверка применяемого метода и техники измерения термических деформаций — важный этап эксперимента.

В данном исследовании, являющемся продолжением ранее проведенных работ [1, 2], при измерении деформаций в случае переменных температур использовали способ внесения поправки на температурное приращение сопротивления тензорезистора. Этот метод заключается в том, что температурное приращение сопротивления исключается путем введения соответствующей поправки, определяемой по предварительно измеренной кривой температурного приращения сопротивления рабочих тензорезисторов.

Для проведения сравнительного экспериментального и расчетного исследований термонапряженного состояния в теле осесимметричной формы была создана опытная установка.

Полый толстостенный цилиндр (диаметром $0,191 \times 0,035 \times 0,5$ м) из стали 15X1M1Ф установлен вертикально. Для измерения температурного поля цилиндр препарировался в радиальном и осевом направлениях 44 хромель-алюмелевыми термопарами. Три прямоугольные розетки тензорезисторов (типа НМП-430) расположены в среднем по длине сечения на наружной поверхности стенки цилиндра и ориентированы по линиям действия главных напряжений в аксиальном и тангенциальном направлениях. Наружная поверхность теплоизолирована. Нагрев осуществляли электрическим графитовым нагревателем. Температурный перепад для получения термических деформаций в стенке цилиндра создавался путем интенсивного охлаждения водой внутренней поверхности.

Для замера деформации тензорезисторов в качестве регистрирующей аппаратуры использовали цифровой тензометрический мост ЦТМ-3; для записи температур — осциллограф Н-700 и потенциометр типа ЭПП-09.

Опытная установка создана с целью сравнить фактически измеренные термические напряжения с рассчитанными аналитическим путем. Поэтому наряду с экспериментами устанавливали расчетные значения напряжений.

В аналитической постановке задачи термические напряжения на наружной поверхности цилиндра ($\rho=1$) определяли по выражению [3]

$$\dot{\sigma}_a = \sigma_T = \frac{\alpha E}{1-\nu} \left[\frac{2}{1-k^2} \int_k^1 \rho t(\rho, \tau) d\rho - t(\rho, \tau) \right], \quad (1)$$

где α — коэффициент линейного расширения; E — модуль упругости; ν — коэффициент Пуассона; $k=R_1/R_2$; R_1, R_2 — радиусы внутренней и наружной стенок цилиндра соответственно; $\rho=r/R_2$; r — текущий радиус.

При наличии температурного градиента по толщине стенки цилиндра в последней возникают аксиальные, тангенциальные и радиальные напряжения. На поверхностях радиальные напряжения отсутствуют, а тангенциальные и аксиальные равны между собой.

Для решения уравнения (1) необходимо знать температурное поле тела, т. е. решить дифференциальное уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) \quad (2)$$

в области $R_1 \leq r \leq R_2$ при краевых условиях

$$t(r, 0) = t_0; \quad (3) \quad \frac{\partial t(R_2, \tau)}{\partial r} = 0; \quad (4) \quad t(R_1, \tau) = f(\tau), \quad (5)$$

где a — коэффициент температуропроводности.

Правая часть условия (5) предполагает наиболее близкую аппроксимацию экспериментальной зависимости изменения температуры внутренней поверхности цилиндра в режиме охлаждения. Таким образом, действительные нелинейные краевые условия третьего рода внутри цилиндра заменены краевыми условиями первого рода. Анализ экспериментальных данных показал, что наиболее целесообразной формой аппроксимации является экспонента

$$f(\tau) = t_c + D \exp(-b\tau). \quad (6)$$

Тогда решение уравнения (2) при краевых условиях (3) — (5) с учетом (6) может быть записано

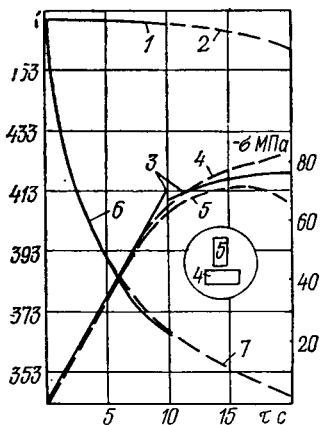
$$t(r, \tau) = t_c + D \left\{ \left[\frac{Y_1(\beta) J_0(\beta \rho) - J_1(\beta) Y_0(\beta \rho)}{J_0(\beta k) Y_1(\beta) - Y_0(\beta k) J_1(\beta)} \right] \times \right. \\ \left. \times \exp(-b\tau) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[Y_1(\mu_n) J_0(\mu_n \rho) - J_1(\mu_n) Y_0(\mu_n \rho)] \exp(-\mu_n^2 Fo)}{\mu_n \left(1 - \frac{\mu_n^2 a}{b R_2^2} \right) \{ k [J_1(\mu_n k) Y_1(\mu_n) - J_1(\mu_n) Y_1 \times \right.} \\ \left. \times (\mu_n k)] + J_0(\mu_n) Y_0(\mu_n k) - J_0(\mu_n k) Y_0(\mu_n) \} \right.$$

где J_0, J_1 и Y_0, Y_1 — функции Бесселя первого и второго рода нулевого и первого порядков соответственно;

$\beta = \sqrt{\frac{b}{a}} R_2$; $\mu_n (n = 1, 2, 3 \dots \infty)$ — корни характеристического уравнения $J_0(\mu k) Y_1(\mu) - J_1(\mu) Y_0(\mu k) = 0$; $Fo = a\tau/R_2^2$ — критерий Фурье.

На рисунке приведены экспериментальные и расчетные кривые распределения температур и напряжений по толщине стенки цилиндра одного из экспериментов.

Опытная кривая 7 падения температуры на внутренней поверхности стенки аппроксимировалась экспонентой $6 t = 90 +$



Кривые изменения температурного и напряженного состояний в стенке полого цилиндра: — — — результаты расчета; - - - - экспериментальные данные; 1, 2, 6, 7 — температура на наружной и внутренней поверхности стенки соответственно; 3 — расчетные напряжения; 4, 5 — соответственно аксиальные и тангенциальные напряжения сжатия на наружной поверхности стенки.

$+107 \exp(-0,344\tau)$ с достаточной степенью приближения до $\tau = 10$ с. Начиная с 10 с и до конца опыта (кривая 3) напряжения рассчитывались для модели плоского осесимметричного температурного поля.

Как видно из рисунка (кривые 3—5), в первые 10 с опыта напряжения, фиксируемые тензорезисторами, хорошо согласуются с расчетными, расхождение не превышает 5%. Данный период опыта характеризуется осесимметричностью температурного поля цилиндра и, следовательно, стабильностью показаний розетки тензорезисторов в аксиальном и тангенциальном направлениях как по знаку, так и по величине деформаций.

Далее, начиная с 10 с опыта, вследствие более интенсивного теплообмена на верхнем торце появилась температурная неравномерность по длине цилиндра, что в свою очередь нарушило равенство аксиальных и тангенциальных напряжений в центральном сечении наружной поверхности цилиндра.

Таким образом, проведенные сравнительные экспериментальные и расчетные исследования подтвердили правильность выбора метода и техники измерения термических деформаций с помощью высокотемпературных тензорезисторов.