

Обмен опытом

ОПИСАНИЕ УСТАНОВИВШЕЙСЯ ПОЛЗУЧЕСТИ
ПРИ РАСТЯЖЕНИИ И КРУЧЕНИИ ТРУБЧАТЫХ ОБРАЗЦОВ

Статья поступила 25 февраля 2014 г.

Как правило, для получения характеристик изотермической ползучести исследуемого материала при сложном напряженном состоянии проводят испытания на тонкостенных трубчатых образцах. Сложное напряженное состояние создается двумя независимыми стационарными усилиями: осевой силой F и крутящим моментом M (рис. 1). Под действием заданных усилий в тонкостенном трубчатом образце создаются нормальное и касательное напряжения [1]:

$$\sigma \text{ [МПа]} = \frac{12,5 \cdot 10^{-6} m_F}{D^2 - d^2} \text{ [кг, м]},$$

$$\tau \text{ [МПа]} = \frac{25 \cdot 10^{-6} D m_M}{D^4 - d^4} \text{ [кг, м]}, \quad (1)$$

где m_F и m_M — массы грузов при создании стационарных усилий F и M ; d и D — внутренний и внешний диаметры стенки поперечного сечения трубчатого образца. В условиях малости приращения длины $\Delta l = l - l_0$ и угла закручивания ϕ деформации растяжения и сдвига определяются выражениями

$$\varepsilon = \Delta l / l_0, \quad \gamma = \phi D / 2l_0. \quad (2)$$

Установка для проведения механических испытаний на сложное напряженное состояние (нагружение проводится ступенчато грузами, максимальная возможная температура внутри печи составляет 850 °С), а также средства измерений и обработки экспериментальных данных приведены в статье [2]. Система измерений состоит из датчика измерения осевого удлинения (максимальное перемещение 50 мм) и механизма измерения угла поворота. Данная система измерений позволяет в каждый момент времени t действия стационарных усилий F и M проследить теку-

щее состояние $\Delta l(t)$ и $\phi(t)$, а также зафиксировать момент времени разрыва t_{**} и предельные значения $\Delta l|_{t=t_{**}}$ и $\phi|_{t=t_{**}}$.

Для описания установившейся ползучести при сложном напряженном состоянии используют степенную зависимость [3]

$$\dot{\varepsilon}_{inv} = A^{-1} \sigma_{inv}^n, \quad A, n > 1, \quad (3)$$

где A , n — параметры изотермической ползучести; $\dot{\varepsilon}_{inv}$, σ_{inv} — инварианты тензоров скоростей деформаций и напряжений. В качестве инвариантов рассмотрим максимальные нормальные деформацию $\varepsilon_{\max}$ и напряжение $\sigma_{\max}$, максимальные сдвиговую деформацию $\gamma_{\max}$ и касательное напряжение $\tau_{\max}$. При выборе зависимости $\dot{\varepsilon}_{inv}(\sigma_{inv})$ найдем минимальное суммарное расхождение соответствующих теоретических и опытных значений:

$$\Delta = \min \left(\sum_{k=1}^N \left| \lg \dot{\varepsilon}_{inv}^{\text{теор}} - \lg \dot{\varepsilon}_{inv}^{\text{exper}} \right| \right), \quad (4)$$

где k — порядковый номер; N — количество опытов.

Максимальные деформации. Определим зависимости $\varepsilon_{\max}(\varepsilon, \gamma)$ и $\gamma_{\max}(\varepsilon, \gamma)$. Выразим $\varepsilon_{\max}$ и $\gamma_{\max}$ через главные деформации $\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3$ [4]:

$$\varepsilon_{\max} = \alpha_1, \quad \gamma_{\max} = \alpha_1 - \alpha_3. \quad (5)$$

Для ортогональных направлений $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ выполняется условие

$$\begin{vmatrix} \varepsilon - \alpha & \frac{1}{2}\gamma & 0 \\ \frac{1}{2}\gamma & -\frac{1}{2}\varepsilon - \alpha & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{2}\varepsilon - \alpha \end{vmatrix} = 0, \quad (6)$$

откуда следует характеристическое уравнение

$$\left[\alpha + \frac{\varepsilon}{2} \right] \left[\alpha^2 + \frac{\varepsilon}{2}\alpha + \frac{\varepsilon^2}{2} + \frac{\gamma^2}{4} \right] = 0. \quad (7)$$

Из решения алгебраического уравнения (7) находим главные деформации

$$\alpha_{1,3} = \frac{\varepsilon}{4} \pm \sqrt{\left[\frac{3\varepsilon}{4} \right]^2 + \left[\frac{\gamma}{2} \right]^2}, \quad \alpha_2 = -\varepsilon/2. \quad (8)$$

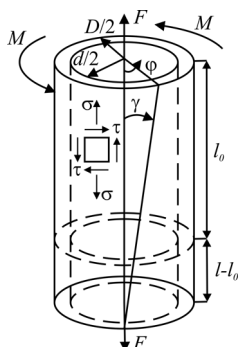


Рис. 1. Схема нагружения и равномерного деформирования тонкостенного трубчатого образца

При заданных параметрах ε и γ формулы (5), (8) определяют максимальные деформации при растяжении и кручении трубчатого образца:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\varepsilon}{4} + \sqrt{\left[\frac{3\varepsilon}{4}\right]^2 + \left[\frac{\gamma}{2}\right]^2}, \quad \gamma_{\max} = \sqrt{\left[\frac{3\varepsilon}{2}\right]^2 + \gamma^2}. \quad (9)$$

Максимальные напряжения. Определим зависимости $\sigma_{\max}(\sigma, \tau)$ и $\tau_{\max}(\sigma, \tau)$. Выразим $\sigma_{\max}$ и $\tau_{\max}$ через главные напряжения $\beta_1 > \beta_2 > \beta_3$:

$$\sigma_{\max} = \beta_1, \quad \tau_{\max} = \frac{\beta_1 - \beta_3}{2}. \quad (10)$$

Для ортогональных направлений $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ выполняется условие

$$\begin{vmatrix} \sigma - \beta & \tau & 0 \\ \tau & -\beta & 0 \\ 0 & 0 & -\beta \end{vmatrix} = 0, \quad (11)$$

откуда следует характеристическое уравнение

$$\beta[\beta^2 - \sigma\beta - \tau^2] = 0. \quad (12)$$

Из решения алгебраического уравнения (12) находим главные напряжения

$$\beta_{1,3} = \frac{\sigma}{2} \pm \sqrt{\left[\frac{\sigma}{2}\right]^2 + \tau^2}, \quad \beta_2 = 0. \quad (13)$$

При заданных параметрах σ и τ формулы (10), (13) определяют максимальные напряжения при растяжении и кручении трубчатого образца:

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma}{2} + \sqrt{\left[\frac{\sigma}{2}\right]^2 + \tau^2}, \quad \tau_{\max} = \sqrt{\left[\frac{\sigma}{2}\right]^2 + \tau^2}. \quad (14)$$

При статистической обработке использовали экспериментальные данные работы [5]. Испытания медных трубчатых образцов проводили при температуре 264 °С; при этом температура отжига 800 °С позволила получить равноосную структуру материала с крупными зернами. Трубчатые образцы подвергали либо только растяжению, либо испытывали в комбинации растяжения и кручения. Сформированная при отжиге структура меди с крупным зерном привела к хрупкому разрушению. Деформирование трубчатых образцов происходило с постоянными скоростями деформаций растяжения $\dot{\varepsilon}$ и сдвига $\dot{\gamma}$. При вычислении итерацион-

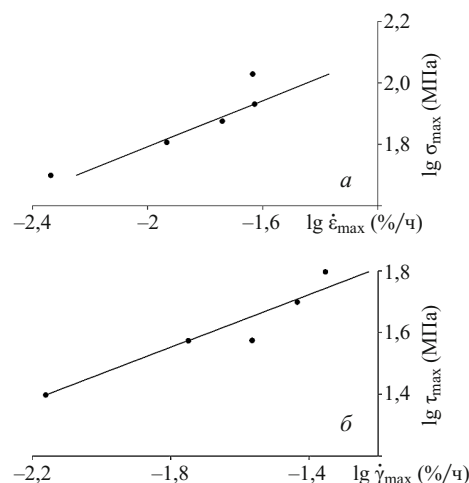


Рис. 2. Расчетные (линии) и опытные (значки) зависимости $\lg \dot{\varepsilon}_{\max} = 2,7 \lg \sigma_{\max} - 6,78$ (а) и $\lg \dot{\gamma}_{\max} = 2,31 \lg \tau_{\max} - 5,43$ (б)

ными методами погрешностей Δ расхождения опытных точек ($\lg \dot{\varepsilon}_{\text{inv}}; \lg \sigma_{\text{inv}}$) относительно теоретической прямой $\lg \dot{\varepsilon}_{\text{inv}} = n \lg \sigma_{\text{inv}} - \lg A$ получены параметры A, n (рис. 2). Установлено, что погрешность $\Delta = 0,42 \text{ \%}/\text{ч}$ зависимости $\dot{\varepsilon}_{\max}(\sigma_{\max})$ превосходит погрешность $\Delta = 0,33 \text{ \%}/\text{ч}$ зависимости $\dot{\gamma}_{\max}(\tau_{\max})$.

Таким образом, при описании установившейся ползучести при совместном растяжении и кручении трубчатых образцов следует использовать зависимость $\dot{\gamma}_{\max}(\tau_{\max})$.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Работнов Ю. Н.** Сопротивление материалов. — М.: Физматгиз, 1962. — 456 с.
2. **Ковальков В. К., Назаров В. В., Новотный С. В.** Методика проведения высокотемпературных испытаний при сложном напряженном состоянии / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2006. Т. 72. № 4. С. 42 – 44.
3. **Качанов Л. М.** Теория ползучести. — М.: Физматлит, 1960. — 455 с.
4. **Тимошенко С. П., Гудьер Дж.** Теория упругости. — М.: Наука, 1975. — 576 с.
5. **Назаров В. В.** Определение характеристик ползучести при растяжении и кручении медных трубчатых образцов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 8. С. 60 – 61.

© **В. В. Назаров**
НИИ механики МГУ имени М. В. Ломоносова,
Москва, Россия; e-mail: inmec130@mail.ru