

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВИВШЕЙСЯ ПОЛЗУЧЕСТИ СТЕРЖНЯ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ С КРУЧЕНИЕМ

Д.т.н. проф. Романов К.И., студент МГТУ им. Н.Э. Баумана Мильков А.В.

Комбинированное нагружение в условиях установившейся ползучести рассматривалось в ряде работ [1-4]. В частности, в работе [3] предложен вариант решения краевой задачи кручения с растяжением стержня круглого поперечного сечения. Однако, мощность рассеиваемая в процессе ползучести в зависимости от величины приложенной дополнительной нагрузки не определялась. Между тем, решение этого вопроса в аналитической форме представляет значительный интерес, во-первых, для проектирования современных процессов горячего формоизменения металлов и, во-вторых, с целью оценки ресурса бездефектного деформирования заготовок [5-7].

Рассмотрим нагружение стержня круглого поперечного сечения (рис.1) осевой силой P и дополнительным моментом M в условиях установившейся ползучести.

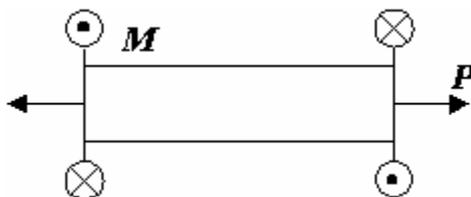


Рис.1. Схема нагружения стержня

Примем уравнение состояния материала в виде:

$$\sigma_e = \alpha \xi_e^m \quad (1)$$

где σ_e и ξ_e - эквивалентные напряжение и скорость деформации, соответственно; α и m - постоянные, определяемые экспериментально при данной температуре.

На основании гипотезы плоских сечений скорости осевой ξ и угловой η деформаций связаны со скоростями растяжения υ и скручивания ω зависимостями:

$$\xi = \frac{\upsilon}{l}, \quad \eta = \frac{r\omega}{l}, \quad (2)$$

где r - радиальная координата, $0 \leq r \leq R$, R - радиус стержня; l - длина стержня.

Определяющие уравнения Сен-Венана-Леви-Мизеса [8] с учетом (1) и (2) дают возможность представить напряжения в виде:

$$\tilde{\sigma} = \frac{\beta^2(m+1) \left(1 + \frac{1}{3}\beta^2 \left(\frac{r}{R}\right)^2\right)^{\frac{m-1}{2}}}{6\pi \left(1 + \frac{1}{3}\beta^2\right)^{\frac{m+1}{2}} - 1} \quad \tilde{\tau} = \frac{\beta^3(m+1) \left(1 + \frac{1}{3}\beta^2 \left(\frac{r}{R}\right)^2\right)^{\frac{m-1}{2}}}{18\pi \left(1 + \frac{1}{3}\beta^2\right)^{\frac{m+1}{2}} - 1} \frac{r}{R}, \quad (3)$$

где $\tilde{\sigma} = \sigma R^2/P$ и $\tilde{\tau} = \tau R^2/P$ - безразмерные осевое и касательное напряжения, соответственно; $\beta = \omega R/\upsilon$ - безразмерный параметр.

На рис.2 построены по уравнениям (3) эпюры напряжений в поперечном сечении стержня при фиксированном параметре жесткого нагружения $\beta=9.0$ и различных значениях показателя m с шагом 0.1 в уравнении состояния (1).

Как и следовало ожидать, при $m=1$ распределение напряжений совпадает с решением задачи в пределах упругости, а в случае $m=0$ получаем эпюры напряжений, аналогичные эпюрам σ и τ в предельном состоянии теории пластичности.

Осевая сила и крутящий момент связаны с напряжениями уравнениями равновесия:

$$P = \int_0^R 2\pi \cdot \sigma \cdot r dr \quad M = \int_0^R 2\pi \cdot \tau \cdot r^2 dr, \quad (4)$$

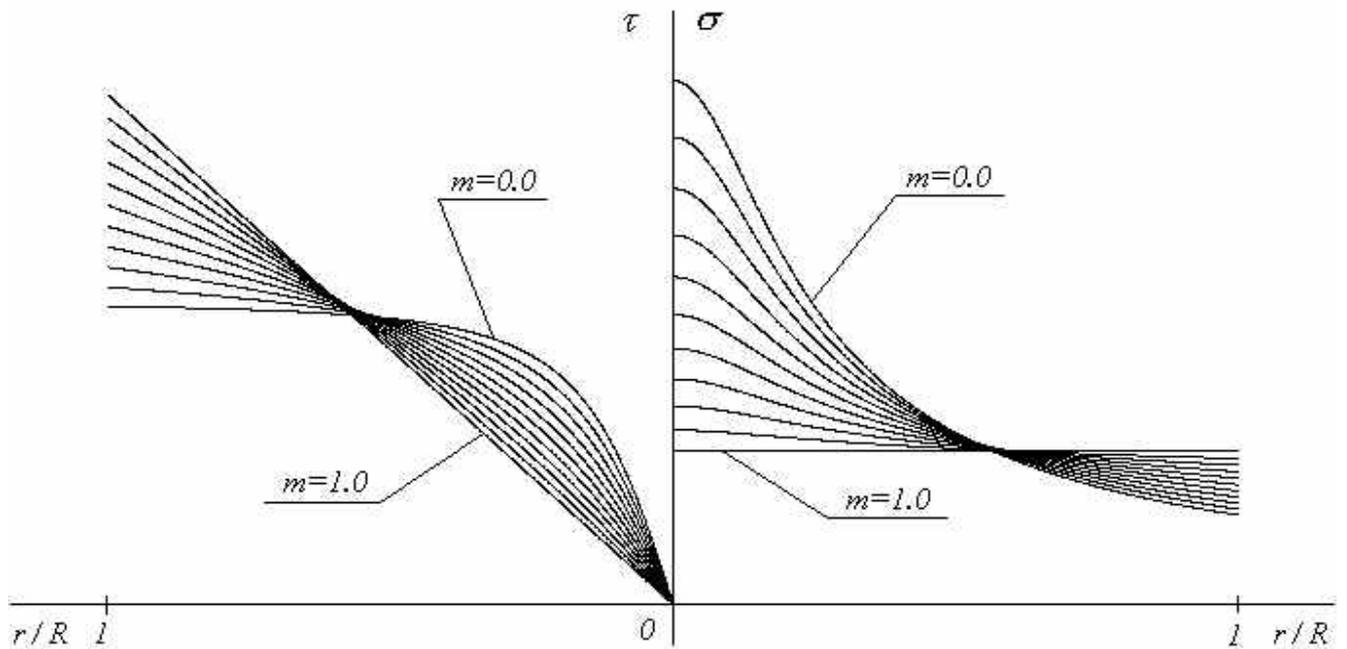


Рис. 2. Эпюры осевых и касательных напряжений в стержне

Мощность процесса установившейся ползучести определяется по формуле:

$$W = \int_F (\sigma \xi + \tau \eta) dS = P v + M \omega \quad (5)$$

где интегрирование выполняется по площади всего поперечного сечения F .

Подставляя в уравнение (5) зависимости (3,4), получим:

$$\tilde{W} = 1 + \frac{1}{m+3} \frac{\left(1 + \frac{1}{3}\beta^2\right)^{\frac{m+1}{2}} \left(\frac{1}{3}\beta^2(m+1) - 2\right) + 2}{\left(1 + \frac{1}{3}\beta^2\right)^{\frac{m+1}{2}} - 1} = 1 + \beta \frac{\tilde{M}}{\tilde{P}} \quad (6)$$

где \tilde{P} , \tilde{M} , \tilde{W} - безразмерные осевая сила, крутящий момент и мощность.

В таблице 1 приведены величины снижения осевого усилия \tilde{P} / \tilde{P}_0 и увеличения затрат по мощности \tilde{W} / \tilde{W}_0 в зависимости от параметра жесткого нагружения β , рассчитанные по формулам (4), (6) при фиксированном показателе упрочнения материала $n = 1/m = 5$ и $\tilde{P}_0 = \tilde{P}(\beta = 0) = \pi$, $\tilde{W}_0 = \tilde{W}(\beta = 0) = (1/\pi)^n$

Таблица 1

β	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
\tilde{P} / \tilde{P}_0	1.000	0.997	0.990	0.977	0.961	0.942	0.921	0.898	0.875
\tilde{W} / \tilde{W}_0	1.000	1.007	1.027	1.060	1.105	1.163	1.234	1.316	1.409

Из таблицы 1 видно, что приложение дополнительного воздействия (скорости скручивания ω) ведет к снижению основного деформирующего усилия с одновременным увеличением затрат по мощности.

Таким образом, выполненный анализ дает информацию, необходимую для проектирования технологических процессов при комбинированном нагружении.

Литература

1. Drucker D. Introduction to mechanics of deformable solids, N.Y. McGraw-Hill Book Company, 1967.
2. Piechnik S. Steady - State creep of Solid bar under combined load. Tekniska hogskolan. Stockholm, 1962, №190.
3. Piechnik S. Stationary creep of a solid curcular bar and tube under torsion and tension. Tekniska hogskolan. Stockholm, 1962, №192.
4. Piechnik S. Combined tension-bending creep for a solid bar. Tekniska hogskolan. Stockholm, 1962. №194.
5. Закономерности ползучести и длительной прочности. Справочник / Под общ. ред. С.А. Шестерикова, М.: Машиностроение, 1983.
6. Соснин О.В., Горев Б.В., Никитенко А.Ф. Энергетический вариант теории ползучести. Новосибирск, Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1986.
7. Романов К.И. Механика горячего формоизменения металлов. М.: Машиностроение, 1993.
8. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести, М.: Машиностроение, 1975.