

## ИССЛЕДОВАНИЕ БОЛЬШИХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ СЛОЖНОМ НАГРУЖЕНИИ

В. И. МАКСАК, Г. А. ДОЩИНСКИЙ

(Представлена научным семинаром кафедры сопротивления материалов)

В настоящее время интенсивно проводятся экспериментальные и теоретические исследования пластической деформации металлов в различных условиях.

Однако имеющиеся данные дают лишь приближенное представление о характере пластической деформации в условиях произвольного нагружения. Если для малых деформаций существует довольно значительное количество опытных данных, то этого нельзя сказать о больших пластических деформациях. Экспериментальные данные по исследованию больших деформаций в условиях сложного нагружения практически отсутствуют. В то же время такие исследования необходимы для решения многих технологических вопросов теории пластичности.

Анализ экспериментальных данных показывает, что наибольшие расхождения существующих теорий с опытом имеют место при сложном нагружении с поворотом осей тензора напряжений. Ниже на основании предложенного авторами метода, позволяющего по сравнению с обычными исследованиями производить исследования пластического поведения металлов при существенно увеличенных значениях деформаций [1], излагаются результаты экспериментального исследования пластических деформаций при сложном нагружении с постоянной интенсивностью напряжений.

Нагружение осуществлялось следующим образом. Вначале большой и малый образцы закручивались на одинаковый угол. Для этого угла по замеренным моментам  $M_1$  и  $M_2$  вычислялся момент для «трубки»  $M_0 = M_1 - M_2$  и соответствующая этому интенсивность напряжений. Затем растягивающая сила и момент в каждом из двух сплошных образцов изменялись таким образом, что в «трубке» обеспечивалось нагружение  $\sigma_i = \text{Const}$ .

Напряжения  $\bar{\sigma}_z$  и  $\bar{\tau}_{\theta z}$  связаны с интенсивностью напряжений следующей зависимостью

$$\sigma_i = \sqrt{\bar{\sigma}_z^2 + 3\bar{\tau}^2}.$$

Подставляя значения истинных напряжений  $\bar{\sigma}_z$  и  $\bar{\tau}_{\theta z}$  [1], получим

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{P^2}{4\pi^2 R_0^2 t_0^2} \left(\frac{l}{l_0}\right)^2 + 3 \frac{M^2}{4\pi^2 R_0^4 t_0^2} \left(\frac{l}{l_0}\right)^3}. \quad (1)$$

В начале сложного нагружения  $P = 0$ , поэтому

$$\sigma_i = \frac{M}{2\pi R_0^2 t_0} \sqrt{3 \left(\frac{L}{L_0}\right)^3}. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1) и производя упрощения, получим соотношение между  $M_0$ ,  $M$  и  $P$ , обеспечивающее сложное нагружение  $\sigma_i = \text{Const}$ .

$$P = \frac{\sqrt{3}}{R_0} \sqrt{\frac{L}{L_0}} \sqrt{M_0^2 - M^2}. \quad (3)$$

При сложном нагружении программа рассчитывалась так же в процессе испытания, т. е. как и при простом нагружении [1].

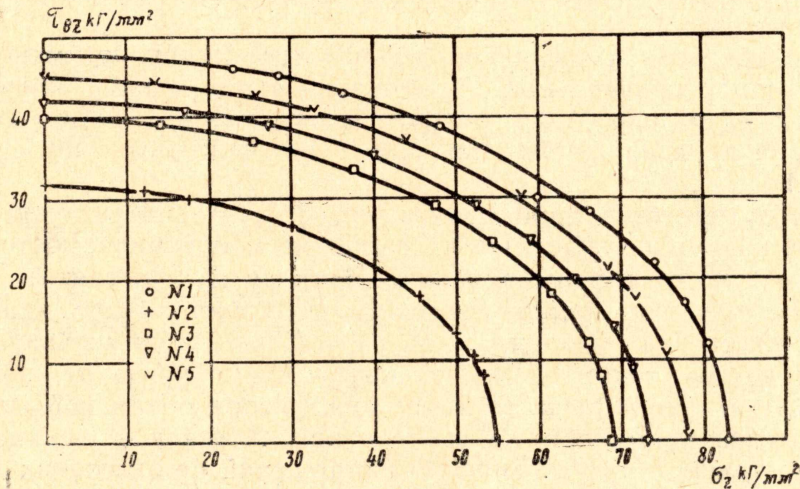


Рис. 1

Испытано пять пар образцов. В каждом опыте интенсивность напряжений оставалась постоянной и равной соответственно 83, 55, 69, 73 и 78  $\text{кг/мм}^2$ . Пути нагружения, полученные в результате обработки данных опытов, в координатах  $\tau_{\theta z} - \sigma_z$  представлены на рис. 1. Сплошные линии соответствуют запланированным путям нагружения. Совпадение планируемых и полученных путей нагружения свидетельствует о хорошей устойчивости результатов и при сложном нагружении.

В этих опытах так же, как и при малых деформациях [2, 3, 4], систематически наблюдалось увеличение пластических деформаций на участке сложного нагружения. Если за меру изменения напряженного состояния для нагружения  $\sigma_i = \text{Const}$  принять, как и для малых деформаций [2—4], длину дуги  $S$  пути нагружения в координатах вектора напряжения, то изменение интенсивности пластических деформаций на участке сложного нагружения может быть связано с длиной дуги.

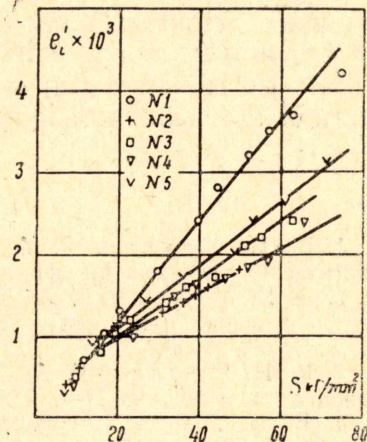


Рис. 2

На рис. 2 представлена эта зависимость для всех испытанных пар образцов. Для первой «трубки», испытанной при  $\sigma_i = 83 \text{ кг/мм}^2$ , экспериментальные точки расположены выше, чем для других «трубок», и

группируются довольно близко к одной прямой, что качественно соответствует результатам опытов при малых деформациях. Для других «трубок» в начале участка сложного нагружения дополнительная пластическая деформация возросла примерно до 0,1% более интенсивно, чем на оставшейся части участка. Однако, на графике можно заметить, что после этого опытные точки для «трубок» № 2 ( $\sigma_i = 55 \text{ кг/мм}^2$ ) и № 5 ( $\sigma_i = 78 \text{ кг/мм}^2$ ) располагаются на соответствующих прямых.

Характерным для этих опытов является незначительный прирост пластических деформаций за период сложного нагружения по сравнению с предварительной деформацией. Так, для «трубки» № 1 ( $\sigma_i = 83 \text{ кг/мм}^2$ ) сложное нагружение, изменившее напряженное состояние от сдвига до чистого растяжения, вызвало увеличение интенсивности пластических деформаций на 0,4%, а предварительная деформация составляла около 47%.

Таким образом, приращение деформации составляет менее одного процента от предварительной. Естественно, что на кривой течения в координатах  $\sigma_i - e_i$  сложному нагружению  $\sigma_i = \text{Const}$  будет соответствовать горизонтальная площадка, длина которой мала по сравнению со всей деформацией.

В литературе высказывается мнение [5], что при сложном нагружении наблюдается тенденция к снижению сопротивляемости материала пластическому деформированию. Поэтому можно считать, что при простом нагружении сопротивляемость материала будет наибольшей, а при сложном нагружении типа  $\sigma_i = \text{Const}$  — наименьшей. В силу этого для других видов сложного нагружения, когда  $\sigma_i$  возрастает, кривая  $\sigma_i - e_i$  будет располагаться между горизонтальной площадкой и кривой течения при простом нагружении. А так как сложное нагружение с постоянной интенсивностью напряжений при больших деформациях вызывает незначительное увеличение пластических деформаций и кривая  $\sigma_i - e_i$  по напряжениям мало отличается от кривой при простом нагружении, то и другие пути нагружения при возрастании  $\sigma$  дадут кривую течения, мало отличающуюся от кривой простого нагружения.

Это позволяет сделать вывод о том, что при больших деформациях сложное нагружение слабо влияет на кривую течения в координатах  $\sigma_i - e_i$ .

Качественное совпадение результатов опытов при больших деформациях с данными, полученными при малых деформациях, и соответствие планируемых путей нагружения полученным в опытах свидетельствуют о возможности применения методики для исследований пластичности и при сложном нагружении.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Максак, Г. А. Дошинский. Методика и исследование больших пластических деформаций при простом нагружении, настоящий сборник.
2. В. И. Максак, Г. А. Дошинский. Экспериментальное исследование сложного нагружения с поворотом осей тензора напряжений при одноосном сжатии. Изв. ТПИ, т. 133, 1965.
3. В. И. Максак, Г. А. Дошинский. Пластическая деформация латуни при сложном нагружении. Изв. ТПИ, т. 147, 1966.
4. В. И. Максак. Пластическая деформация стали при сложном нагружении. Изв. ТПИ, т. 139, 1966.
5. В. С. Ленский. Экспериментальная проверка основных постулатов общей теории упруго-пластических деформаций. Вопросы теории пластичности. Изд. АН СССР. 1961.