

## ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ЛАТУНИ ПРИ СЛОЖНОМ НАГРУЖЕНИИ

В. И. МАКСАК, Г. А. ДОЩИНСКИЙ

(Представлена научным семинаром кафедры сопротивления материалов)

Неоднократно [1, 2, 3] отмечалась непригодность расширяющихся цилиндров Губера-Мизеса в качестве отображения сопротивляемости материалов пластическому деформированию. Однако экспериментальных данных, посвященных исследованию пластических деформаций при сложном нагружении по поверхности этого цилиндра (т. е. при постоянной интенсивности напряжений), чрезвычайно мало.

Так, в [1] подобному нагружению были подвергнуты два образца из стали 30ХНЗА, причем в процессе сложного нагружения главные оси напряжений сохраняли свое направление, а отношение между ними изменялось. В [3] таким же образом испытан образец из алюминиевого сплава 14S = Т6. В обоих случаях на участке сложного нагружения отмечалось приращение пластических деформаций.

Что касается сложного нагружения с поворотом осей главных напряжений, то здесь можно отметить лишь работу [4] «...Особенно интересен путь, при котором оси тензора напряжений вращаются без изменения инварианта  $\sigma_2$ ...», т. е. при постоянной интенсивности напряжений. Использовались образцы из «...тщательно отожденных мелкозернистых алюминия и  $\alpha$ -латуни...». К сожалению, количество образцов, испытанных при постоянной интенсивности напряжений, не указано. Авторы также отмечали приращение пластических деформаций в процессе сложного нагружения.

Ранее [5] были проведены опыты по выяснению качественной картины изменения деформаций при сложном нагружении с поворотом линейного сжимающего напряжения. Несмотря на то, что методика исследования имела некоторые недостатки, анализ результатов позволил сделать вывод, что при сложном нагружении с поворотом осей главных напряжений пластические деформации возрастают.

Ниже излагаются результаты экспериментального исследования пластических деформаций латуни при сложном нагружении.

Образцы представляли отрезки латунной трубы длиной по 200 мм, наружный диаметр 24 мм и толщиной стенки  $1^{+0,08}$  мм. Все образцы нарезаны из одной трубы длиной шесть метров. Для проверки свойств изотропии два образца были испытаны на растяжение в продольном и поперечном направлениях. На рис. 1 сплошной линией показана диаграмма растяжения в осевом направлении, пунктиром — в поперечном направлении, а точками нанесены данные по растяжению других тринадцати образцов, программа испытания которых предусматривала на первом этапе нагружения растяжение. Из графика видно, что мате-

риал образцов в достаточной степени изотропен и однороден. На основании этих испытаний получены следующие характеристики материала:

$$E = 8,45 \cdot 10^3 \text{ кг/мм}^2, \mu = 0,24, \sigma_s = 15,6 \text{ кг/мм}^2.$$

На сложное нагружение было испытано 16 образцов, причем результаты испытания двух из них показались сомнительными и были повторены. Испытания проводились на машине для сложного нагружения ZDMU=30. Образцы закреплялись в машине с помощью специально:о приспособления. Деформации на рабочем участке образца длиной 100 мм распределялись равномерно. Методика испытания и приборы для замера деформаций описаны в [6].

Проведено четыре серии опытов. При простом нагружении образец нагружался до определенного значения интенсивности напряжений, а затем путем соответствующего изменения осевой силы, внутреннего

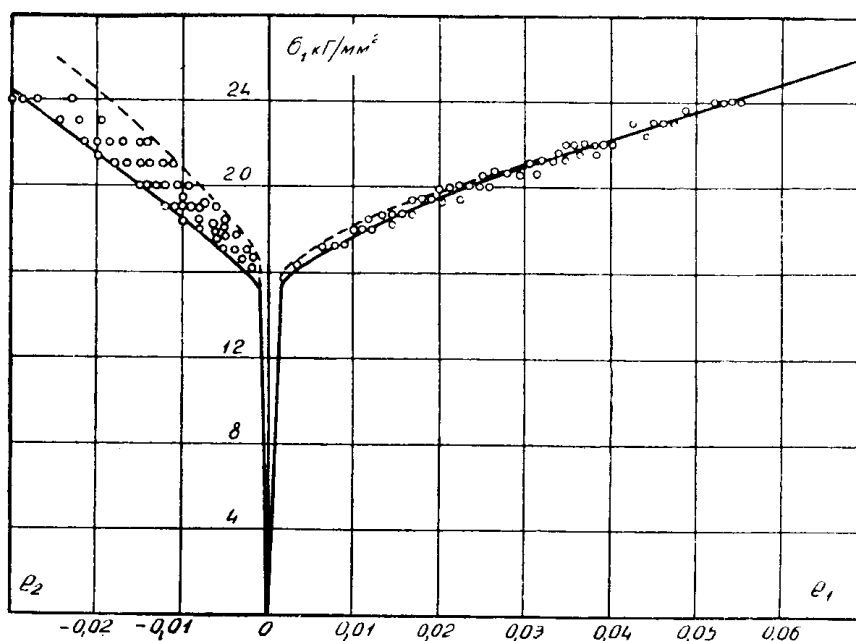


Рис. 1

давления и крутящего момента нагружение проводилось так, что интенсивность напряжения оставалась постоянной и равной своему значению в конце простого нагружения.

В каждой серии испытано четыре образца. Для первого образца сложное нагружение представляло поворот линейного постоянного растягивающего напряжения. Для второго — поворот плоского напряженного состояния, причем главные напряжения не менялись по величине, а их отношение  $\sigma_2/\sigma_1$  оставалось постоянным и равным 0,5. У третьего образца главные оси напряжений сохраняли свое направление, но менялось соотношение между ними, а интенсивность напряжений оставалась постоянной. Четвертый образец испытывался при растяжении и кручении, при этом главные напряжения поворачивались и менялось соотношение между ними; интенсивность напряжений оставалась постоянной.

В каждой серии интенсивность напряжений оставалась постоянной и равной соответственно  $18 \text{ кг/мм}^2$ ,  $20 \text{ кг/мм}^2$ ,  $22 \text{ кг/мм}^2$  и  $24 \text{ кг/мм}^2$ .

Таким образом, в каждой серии охвачен довольно широкий класс путей нагружения.

Обработка результатов экспериментов для всех образцов показала, что при сложном нагружении интенсивность деформаций  $l_i$  возрастает, хотя интенсивность напряжений  $\sigma_i$  остается постоянной.

Рассмотрим геометрическую картину процесса нагружения. Введем вместо компонентов тензора напряжений  $\sigma_z$ ,  $\sigma_\theta$  и  $\tau_{\theta z}$  величины [7].

$$S_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} \left( \sigma_z - \frac{1}{2} \sigma_\theta \right); \quad S_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} \sigma_\theta; \quad S_3 = \sqrt{2} \tau_{\theta z}, \quad (1)$$

которые представляют собой проекции вектора напряжений в прямоугольных координатах. Модуль его пропорционален интенсивности напряжений

$$|\bar{P}| = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_i,$$

а направление совпадает с направлением октаэдрического касательного напряжения.

Процесс нагружения можно геометрически представлять кривой, которую описывает конец этого вектора. Поверхность равной интенсивности напряжений представляет сферу с центром в начале координат, а все пути нагружения, по которым проводились опыты, лежат на ней, причем в каждой серии опытов для каждого из четырех образцов они имеют различный вид.

Элемент длины дуги кривой пути нагружения выражается

$$dS = \sqrt{dS_1^2 + dS_2^2 + dS_3^2}. \quad (2)$$

Согласно (1), (2) и формул плоского напряженного состояния длина дуги для сложного нагружения с поворотом осей при постоянных главных напряжениях  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$

$$S = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sqrt{2}} \arcsin \frac{\tau_{\theta z} \sqrt{2}}{\sigma_1 - \sigma_2}. \quad (3)$$

Для нагружения с сохранением направлений осей напряжений и нагружения при растяжении с кручением аналогичные выкладки приводят к выражениям:

$$S = \sigma_i \sqrt{\frac{2}{3}} \arcsin \frac{\sigma_\theta \sqrt{3}}{2\sigma_i}, \quad (4)$$

$$S = \frac{\tau_i}{\sqrt{3}} \arcsin \frac{\tau_{\theta z} \sqrt{3}}{\sigma_i}. \quad (5)$$

Принимая за параметр нагружения длину дуги согласно (3), (4), (5), изменение интенсивности деформаций можно представить в функции этого параметра.

На рис. 2 представлена эта зависимость для каждой серии опытов. Видно, что все экспериментальные точки располагаются довольно близко к одной прямой. Сплошные линии, проведенные на графиках, получены обработкой экспериментальных данных по способу наименьших квадратов.

Учитывая это обстоятельство, можно предположить, что для такого класса сложных нагружений приращение интенсивности деформаций есть функция длины дуги, не зависящая (или слабо зависящая) от вида нагружения при данной интенсивности напряжений.

При различных значениях  $\sigma_i$  наклон прямой на графиках рис. 2 почти одинаков. Конечно, он должен зависеть от величины  $\sigma_i$ , однако для большого разброса экспериментальных точек для цветных металлов и при слабом упрочнении латуни в области малых деформаций эта зависимость, вероятно, лежит в пределах погрешностей опыта. Незначительные отклонения в напряжениях от программы нагружения вызывают при слабом упрочнении значительные отклонения для компонентов деформации. Вероятно, для выяснения этой зависимости необходимо весьма и весьма точно задавать силу, крутящий момент и внутреннее давление.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

При сложном нагружении латуни, характеризующемся постоянством интенсивности напряжений, интенсивность деформаций возрастает.

Приращение интенсивности деформаций в функции длины дуги пути нагружения зависит слабо от вида нагружения, и эта зависимость близка к линейной.

Для определения зависимости величины приращения интенсивности деформаций от величины интенсивности напряжений для латуни, и, вероятно, для других слабо упрочняющихся материалов необходимы более тщательные эксперименты.

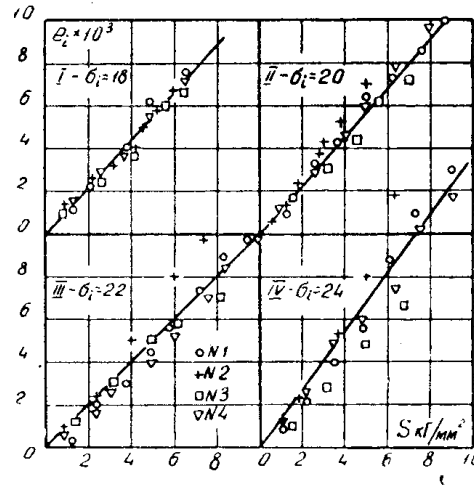


Рис. 2

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Жуков. О пластических деформациях изотропного металла при сложном нагружении. Изв. АН СССР, ОТН, № 12, 1956.
2. А. М. Жуков. Некоторые особенности кривой нейтрального нагружения. Изв. АН СССР, ОТН, № 8, 1958.
3. I. Marin, L. W. Hu. On the Validity of Assumption Made in Theories of Plasticity for Metals, Trans. ASME, v. 75, № 6, 1953.
4. U. Dehlinger, I. Diehl, I. Meissner. Das Fließgesetz vielkristalliner Metalle, Z. Naturforschung B. 11-a, № 1, 1956.
5. В. И. Максак, Г. А. Дошинский. Сложное нагружение с поворотом осей тензора напряжений при линейном сжатии. Изв. ТПИ, т. 133, 1965.
6. В. И. Максак, Г. А. Дошинский. К методике исследования пластической деформации при сложном нагружении. Изв. ТПИ, т. 147, 1966.
7. А. А. Ильшин. Пластичность. Изд. АН СССР, 1963.