

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОЖНОГО
НАГРУЖЕНИЯ С ПОВОРОТОМ ОСЕЙ ТЕНЗОРА НАПРЯЖЕНИЙ
ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ**

В. И. МАКСАК, Г. А. ДОЩИНСКИЙ

(Представлена научным семинаром кафедры сопротивления материалов)

В последние десятилетия в области механики сплошной среды интенсивное развитие получила теория пластической деформации. Однако достаточно надежные результаты получены пока лишь для простого нагружения, т. е. нагружения, при котором компоненты тензора напряжений (или его девиатора) растут пропорционально одному параметру. Для случая же сложного нагружения нет надежной теории, которая могла бы дать результаты, удовлетворяющие запросам практики.

Изучение закономерностей сложного нагружения целесообразно, пожалуй, подразделить на 3 следующих направления исследований:

- 1) компоненты тензора напряжений остаются постоянными по величине, но меняется направление главных напряжений;
- 2) величина компонентов тензора напряжений изменяется непропорционально одному параметру при неизменном направлении главных напряжений;
- 3) различные комбинации этих способов.

Исследования показывают, что очень сильное влияние на зависимости между напряжением и деформацией оказывает поворот осей главных напряжений. Состояние исследования сложного нагружения вообще сейчас таково, что в основном происходит накопление экспериментальных фактов для общей теории сложного нагружения. Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования направлены на отыскание общих закономерностей, которым подчиняется пластическая деформация поликристаллического материала при произвольном деформировании или нагружении [1].

Настоящее исследование представляет собой попытку выяснить качественный характер взаимосвязи напряжений и деформаций для линейного напряженного состояния при повороте осей, но при постоянном напряжении. В опытах применялось линейное сжатие образцов в форме кубиков и пластин. Поворот оси главного напряжения осуществлялся путем вырезания из образца, подверженного пластической деформации сжатия до определенного напряжения, нового образца, грани которого повернуты относительно старых на некоторый угол. Затем образец снова подвергался сжатию до того же напряжения, из него вырезался новый образец с повернутыми гранями и т. д.

В опытах исследовался дуралюмин Д16. Для устранения влияния исходной обработки материала на результаты эксперимента образцы перед опытом были подвергнуты отжигу.

При вырезании новых образцов у кубиков сохранялось подобие формы; у пластин их толщина оставалась постоянной.

Вырезание образцов проводилось на строгальном станке, при режимах, обеспечивающих незначительный наклеп при обработке. Для выяснения влияния операции строгания на результаты экспериментов был проведен следующий опыт. После деформирования образца из него вырезался новый так, что грани его оставались параллельными прежним. Затем образец сжимался в том же направлении и до того же напряжения, что и вначале. Дополнительная пластическая деформация при этом практически отсутствовала.

Деформация измерялась механическими тензомерами типа Гугенберга с ценой деления 1 микрон. Отсчеты деформаций производились спустя полминуты после установления нагрузки.

Очевидными недостатками примененной методики эксперимента являются: неоднородность напряженного состояния, возникающая вследствие неравномерного распределения давления на грань кубика, трение на торцах образца, отсутствие непрерывности при повороте из-за разгрузки образца перед поворотом осей напряжения.

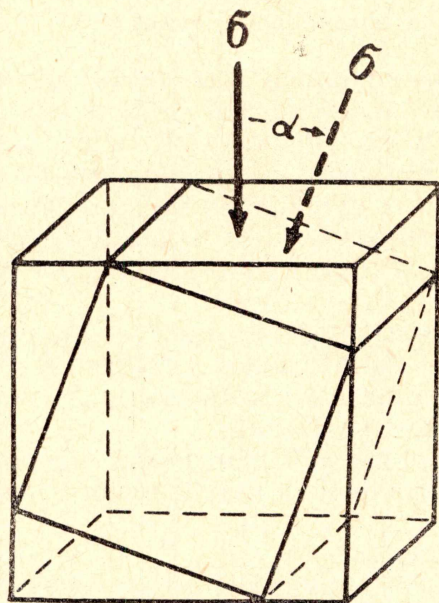


Рис. 1.

Однако испытание образцов в виде кубиков находит применение в исследовании законов теории пластической деформации. В частности, оно было использовано при исследовании влияния шарового тензора и вида девиатора в работах Виноградова, Чаплинского, Ягна [2], [3] и др. Поскольку целью настоящего исследования является выяснение лишь качественных зависимостей, то эта методика, несмотря на ее недостатки, могла быть приемлемой.

Деформированное состояние при линейном сжатии характеризуется тремя главными удлинениями: e_1, e_2, e_3 . В качестве меры напряженности и деформированности в деформацион-

ной теории пластичности используются интенсивности напряжений и деформаций, определяемые выражениями:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 - \sigma_2 \cdot \sigma_3 - \sigma_3 \cdot \sigma_1},$$

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_1 - e_2)^2 + (e_2 - e_3)^2 + (e_3 - e_1)^2}.$$

Для линейного напряженного состояния они соответствуют:

$$\sigma_i = \sigma, \quad e_i \approx e,$$

Проведено две серии опытов. В первой испытано 8 образцов в форме кубика. Два образца были использованы для получения диаграммы линейного сжатия. Остальные образцы были сжаты до напряжения 16000 н/см^2 и разгружены. Из образцов № 3, 4, 5 были вырезаны кубики, грани которых были повернуты на угол $\alpha = 10^\circ$ относительно старых, причем две вертикальные грани оставались перпендикулярными оси поворота. Образцы сжимались вновь до напряжения

16000 н/см² и разгружались. Эта операция повторялась 3 раза, т. е. угол поворота напряжения достиг 30°. На рис. 2 приведены исходная диаграмма и кривые пластического деформирования образца № 5 для отдельных этапов испытания. Для других образцов кривые были подобны.

Из образцов № 6, 7, 8 были вырезаны кубики, грани которых были повернуты соответственно на 20°, 30°, 40°. Затем они сжимались до напряжения 16000 н/см².

Во второй серии испытано 5 пластин из того же материала размерами 50 × 50 × 9 (мм). Пластины сжимались до напряжения 12000 н/см² и разгружались. Из пластинок № 2 и 6 вырезались новые с поворотом граней на 15°. Из пластинок № 4 и 5 вырезались новые образцы с поворотом на 30°, а для пластинки № 1 — на 45°. Затем все они сжимались до напряжения 12000 н/см² и разгружались. Подобная операция повторялась 3 раза. Кривые пластического деформирования для отдельных этапов испытания у пластинок аналогичны соответствующим кривым для испытания кубиков, поэтому здесь не приводятся.

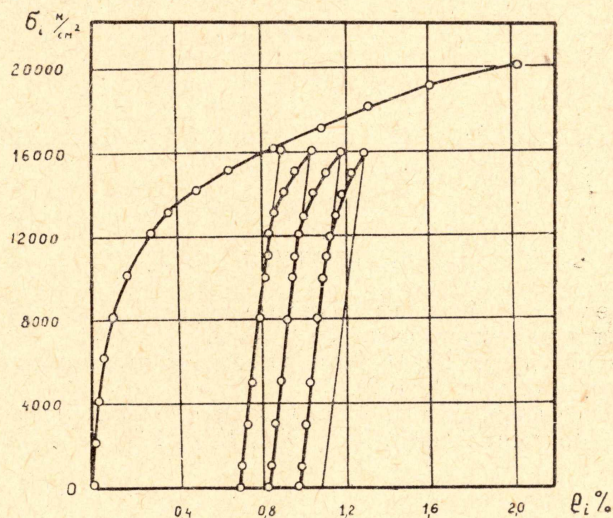


Рис. 2.

Для простого нагружения изотропно упрочняющегося материала при постоянной интенсивности напряжений не происходит изменения интенсивности деформации, т. е. пластическая деформация не возрастает. В приведенных экспериментах наблюдалось следующее. Если при простом сжатии процессы разгрузки и повторной нагрузки до того же напряжения являются упругими процессами, то при повороте осей при повторном нагружении систематически возникала некоторая дополнительная пластическая деформация. Если из образцов, которые продеформированы с поворотом оси напряжения на угол α_1 , вырезать новые образцы с углом поворота $\alpha_2 = \alpha_1 + \Delta\alpha$, то при нагружении снова происходит некоторая пластическая деформация. В опытах наблюдалось некоторое сокращение линейного участка упругой деформации повторного нагружения по мере увеличения угла поворота, т. е. развитие пластической деформации начиналось при меньших значениях сжимающего напряжения по сравнению с начальными этапами. Характер увеличения интенсивности деформации в зависимости от угла поворота при постоянной интенсивности напряжения показан на рис. 3.

Во всех случаях приращение интенсивности деформаций (суммарное при последовательных этапах) оказывалось приблизительно пропорционально возрастающим при увеличении угла поворота оси главного сжимающего напряжения.

Таким образом, в условиях проведенных экспериментов отмечалось, что поворот главных осей напряжений при неизменной величине интенсивности напряжения для линейного напряженного состояния связан с нарастанием степени пластической деформации.

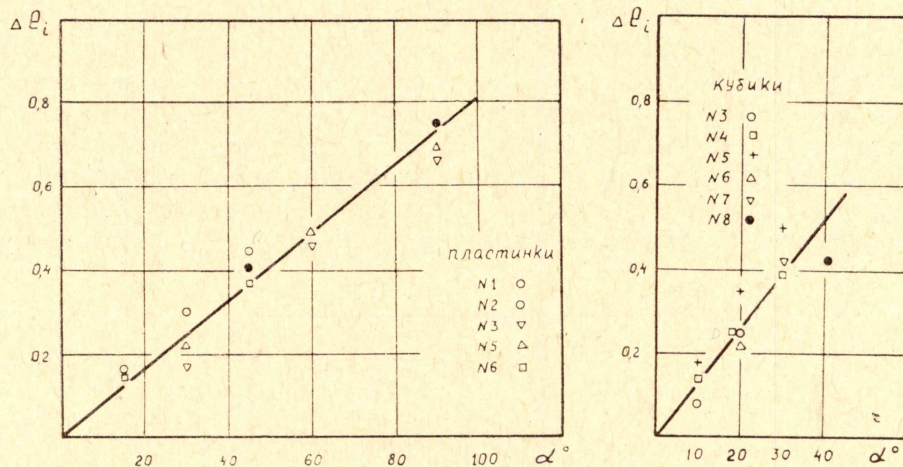


Рис. 3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Н. Работнов. Механика твердого тела и пути ее развития. Известия АН СССР, Механика и машиностроение, № 2, 1962.
2. И. Н. Виноградов, Ю. И. Ягн. О законах пластичности. Физика металлов и металловедение, т. 3, вып. 1, 1956.
3. И. А. Чаплинский, Ю. И. Ягн. О сопротивлении металлов пластическому деформированию. Доклады АН СССР, т. ХС, № 6, 1953.