

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛАСТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ ВОКРУГ КОНЦЕНТРАТОРОВ

Б. П. ЧЕБАЕВСКИЙ, Г. Д. ДЕЛЬ

(Представлена научным семинаром кафедры сопротивления материалов)

Аналитические и экспериментальные исследования концентрации напряжений в упругой области [1] показали, что напряжения вблизи концентраторов в 3—10 раз выше средних по сечению напряжений. В связи с этим очень часто материал в этой зоне деформируется пластически. В ряде случаев (например, при проектировании конструкций минимального веса), если материал детали достаточно пластичен, целесообразно сознательно допустить некоторые пластические деформации, так как это устранит недогрузку основного материала в 3—10 раз. Но при этом возникает опасность появления трещин. Для того, чтобы избежать их, необходимо знать напряженное состояние в пластической области при сравнительно больших пластических деформациях. Между тем в выполненных ранее исследованиях [2], [3] определялось распределение напряжений лишь при малых пластических деформациях.

Цель настоящего исследования — экспериментальное изучение напряженного состояния в пластической области при растяжении полос с концентраторами и оценка возможности определения напряжений в этом случае методами теории идеально-пластических тел.

Испытывались полосы из стали ст. 3 с поперечным сечением 50×5 мм. Концентрация напряжений изучалась у отверстий различного диаметра, у острых надрезов с различной глубиной и переменным углом раствора и у надрезов с круглым основанием (рис. 2, 3). Напряжения определялись при нескольких ступенях нагружения вплоть до появления трещин. После каждой ступени нагружения строились эпюры  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  по опасному сечению.

Главные напряжения рассчитывались по формуле [4]

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_i}{e_i} \left[ -e_3 \pm \frac{\sqrt{e_i - e_3}}{\sqrt{3}} \right],$$

где

$\sigma_i$  — интенсивность напряжения,  $e_i$  — интенсивность деформаций,  $e_3$  — поперечная деформация.

Для расчета напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  в какой-либо точке оси симметрии достаточно знать две главные деформации в этой точке. Эти деформации могут быть определены экспериментально, а третью деформацию можно рассчитать из условия постоянства объема. Для определения продольной деформации  $e_1$  на пластину накатывалась делительная сет-

ка, в качестве матрицы использовалось растровое клише с базой 0,376 мм [5]. Измерение производилось на базе шести клеток сетки (2,26 мм). Замеры производились на инструментальном микроскопе. Точность измерения — 0,01 мм. Использование в качестве сетки изображения растрового клише имеет большие преимущества: база сетки исключительно точная и достаточно мелкая, а это позволяет исследовать малые области пластического деформирования. Методика позволяет определять пластические деформации в 1—1,5%.

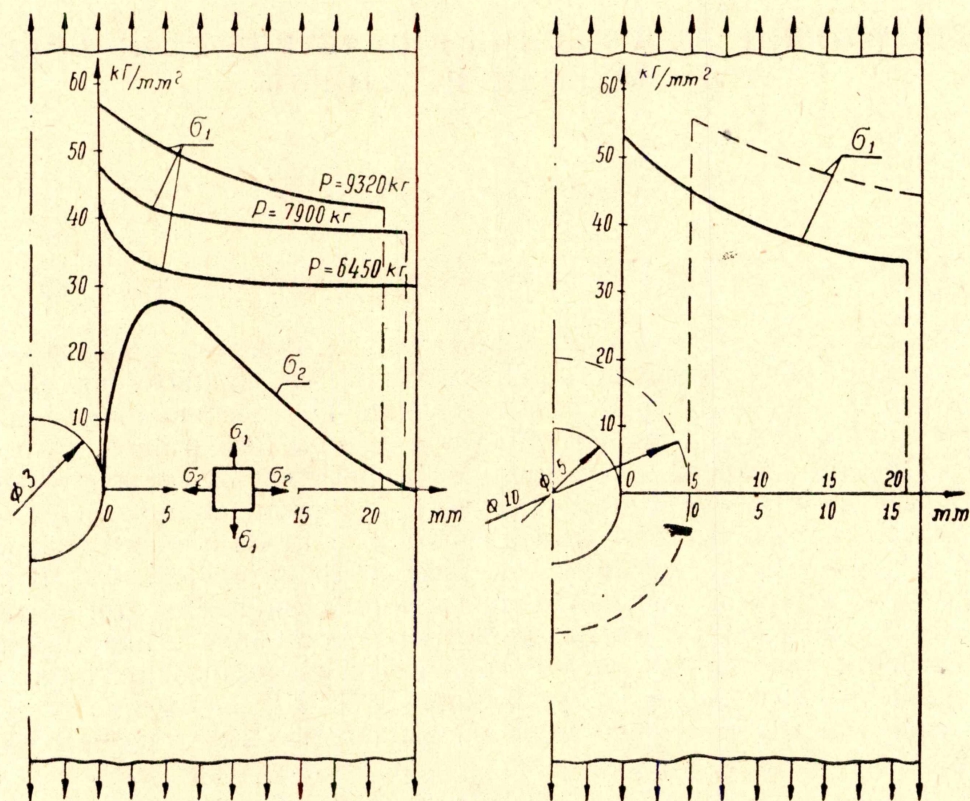


Рис. 1. Концентрация напряжений у отверстий

Деформация  $e_2$  (рис. 1) сравнительно мала, градиент же изменения ее вдоль оси велик. А это ограничивает базу, на которой производится измерение, и, следовательно, снижает точность определения этой деформации. Поэтому целесообразно определять наряду с  $e_1$  поперечную деформацию  $e_3$ . При ее определении предполагаем, что деформация в поперечном направлении однородна и в силу этого

$$e_3 = \ln \frac{h}{h_0},$$

где

$h_0$  и  $h$  — толщина полосы до и после деформации. В наших опытах измерение толщины пластины производилось индикатором часового типа с точностью до 0,01 мм. Вначале снималась топография поверхности, затем по этим данным определялась толщина пластины в точках по оси симметрии и вычислялась деформация  $e_3$ .

Полученные эпюры напряжений у отверстий различных диаметров показаны на рис. 1. Характер эпюр качественно не меняется при изменении диаметра отверстия. Для отверстия диаметром 3 мм приведены эпюры напряжений при трех ступенях нагружения.

Распределение напряжений в пластинах с надрезами приведено на рис. 2, 3. Эпюры соответствуют моменту появления видимой трещины у концентратора напряжений и практически не зависят от угла раствора или радиуса закругления. При различных ступенях нагружения эпюры напряжений идентичны приведенным. Однако коэффициент концентрации напряжений, определяемый как

$$\alpha = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{ном}}},$$

где

$\sigma_{\max}$  — максимальное напряжение в эпюре напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_{\text{ном}}$  — номинальное напряжение по сечению, различен для каждой ступени нагружения.

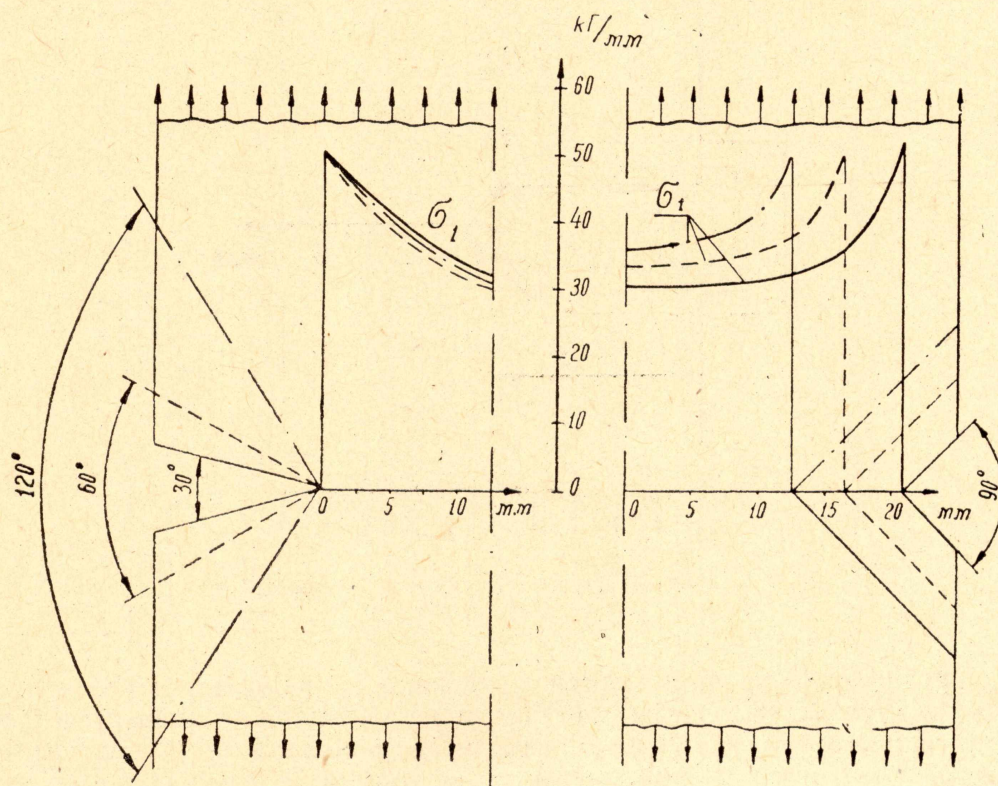


Рис. 2. Концентрация напряжений у острых надрезов

Точность определения главного напряжения  $\sigma_1$  по сечению оценивалась путем сравнения расчетного и действительного усилия деформации. Среднее из 34 сравнений отклонений расчетной и действительной сил составляет 6%.

Напряжение  $\sigma_1$  достигает максимального значения вблизи концентратора напряжений. У идеально-пластичного тела у концентратора напряжений  $\sigma_1$  минимально. Это объясняется следующим. Условие пластичности Мизеса при плоском напряженном состоянии имеет вид

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 = \sigma_i^2,$$

где

$\sigma_1$  и  $\sigma_2$  — главные напряжения,  $\sigma_i$  — постоянный по объему предел текучести. Так как  $\sigma_1 > \sigma_2 \geq 0$ , то  $\sigma_1 \geq \sigma_i$ . На границе напряженного состояния является линейным и поэтому  $\sigma_1 = \sigma_i$ . Для идеально-пластичского материала это минимальное значение  $\sigma_1$ .

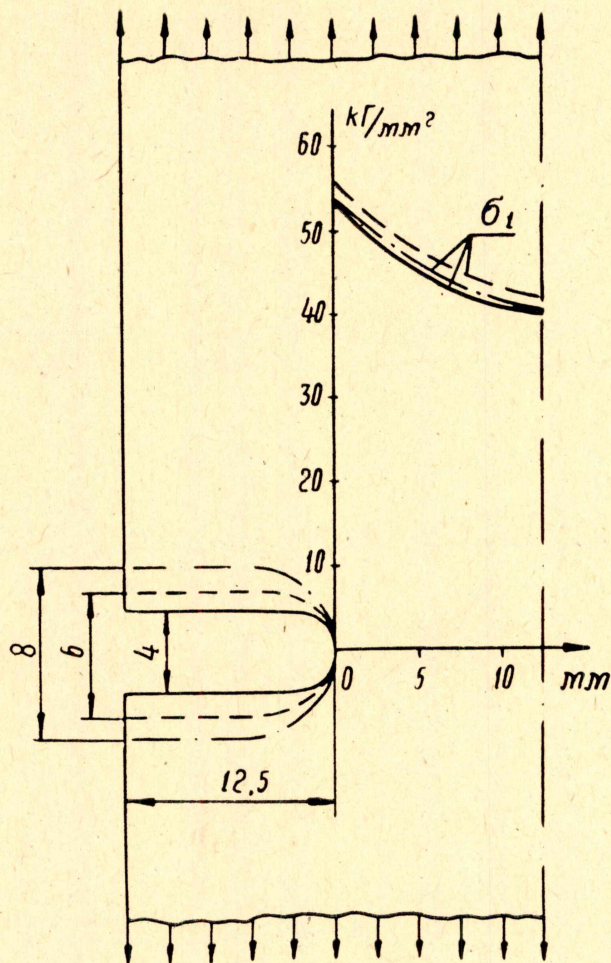


Рис. 3. Концентрация напряжений у надрезов с круглым основанием

У реального упрочняющегося материала  $\sigma_i$  изменяется по объему детали и зависит от деформации. По мере удаления от концентратора  $\sigma_2$  увеличивается, а  $\sigma_i$  убывает, так как деформация у концентратора много больше, чем в любой другой точке пластины. Увеличение  $\sigma_1$ , вызванное ростом  $\sigma_2$ , незначительно, тогда как уменьшение  $\sigma_1$ , вызванное уменьшением  $\sigma_i$ , очень велико. В результате напряжение  $\sigma_1$  оказывается максимальным у концентратора. Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Концентрация напряжений в упругой и пластической области имеет некоторые общие черты. В обоих случаях главные напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  положительны, продольные напряжения  $\sigma_1$  максимальны у концентратора.

2. Концентрация напряжений при пластическом деформировании упрочняющегося материала существенно отличается от концентрации напряжений у идеально пластических тел. Чем выше упрочняемость материала, тем выше это различие. Поэтому сомнительна возможность применения теории идеально-пластических тел к расчету коэффициента концентрации при обычных температурно-скоростных условиях.

3. Коэффициент концентрации напряжений в пластической области значительно меньше, чем в упругой, и зависит от нагрузки.

4. Необходимы дальнейшие экспериментальные исследования для

установления зависимости коэффициента концентрации от относительных размеров концентратора, нагрузки и механических свойств материала.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Нейбер. Концентрация напряжений. ОГИЗ, М., 1947.
  2. А. И. Кодаев. Концентрация напряжений в пластической области. Труды академии им. Н. Е. Жуковского, вып. 316, 1949.  
М. Х. Ахметзянов. Исследование концентрации напряжений в пластической области при помощи фотоупругих покрытий. Изв. АН СССР, отд. техники, мех. и машиностроения, № 1, 1963.
  4. Г. Д. Дель. Определение напряженного состояния в пластической области измерением твердости. Труды институтов Госкомитета стандартов, мер и измерительных приборов, 1966.
  5. Г. Д. Дель, М. Г. Гольдшмидт. Исследование пластической деформации на моделях из растровых клише. Завод. лабор., № 4, 1966.
-