

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЛЬНОГО СЖАТИЯ ЦИЛИНДРА ИЗМЕРЕНИЕМ ТВЕРДОСТИ

Ю. С. БОГОМОЛОВ, Г. Д. ДЕЛЬ, Л. М. СЕДОКОВ, Л. Г. ЦЕХАНОВА

(Представлена научным семинаром кафедры сопротивления материалов)

В процессе радиального сжатия цилиндра между параллельными плитами, являющегося одним из распространенных случаев в обработке металлов давлением, создается весьма неоднородное поле напряжений и деформаций.

Теоретическое распределение напряжений по вертикальному диаметру идеально пластичного цилиндра получено А. Д. Томленовым [1].

В работах [2, 3] изложены результаты экспериментального исследования напряженного и деформированного состояний поляризационно-оптическим методом [2] и измерением твердости [3]. Для численного определения величины главных напряжений по результатам измерения твердости в работе [3] использовались их соотношения, полученные поляризационно-оптическим методом, когда степень пластической деформации имитировалась снятием лыски и рассматривалось упругое состояние, близкое к предельному [2]. Соотношение длины и диаметра цилиндра было мало, напряженное состояние было близким к плоскому.

В данной работе исследуется измерением твердости радиальное сжатие в условиях плоской деформации, которые более характерны для процессовковки и проката. Результаты измерения твердости расшифрованы методом, описанным в работе [4].

Сущность метода расшифровки заключается в решении методом линий скольжения системы дифференциальных уравнений равновесия при известной в различных точках интенсивности касательных напряжений K .

Соотношения на линиях скольжения:

$$\frac{\sigma}{2k} - \Theta = -A_\alpha, \quad \frac{\sigma}{2k} + \Theta = -A_\beta, \quad (1)$$

где σ — гидростатическое давление, Θ — угол наклона линии скольжения к оси x . Величины A_α и A_β определяются приближенным интегрированием. Так, например, в точке 3 рис. 3 A_α и A_β находятся по известным A_α и A_β в точках 1 и 2 из соотношений:

$$\left. \begin{aligned} (A_\alpha)_3 &= (A_\alpha)_2 - \frac{1}{2k_3} \cdot \frac{k_1 - k_3}{l_{1-3}} \cdot l_{2-3}; \\ (A_\beta)_3 &= (A_\beta)_1 - \frac{1}{2k_3} \cdot \frac{k_2 - k_3}{l_{2-3}} \cdot l_{1-3}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где l_{1-3} и l_{2-3} — расстояния между точками 1 и 3, 2 и 3.

По известным A_α и A_β определялись Θ и σ :

$$\left. \begin{aligned} \Theta &= \frac{1}{2} (A_\alpha - A_\beta), \\ \sigma &= -k (A_\alpha + A_\beta). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Компоненты напряжений:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma - k \sin 2\Theta, \\ \sigma_y &= \sigma + k \sin 2\Theta, \\ \sigma_{xy} &= k \cos 2\Theta. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Исследование напряженно-деформированного состояния при радиальном сжатии цилиндрических тел было проведено на образцах из высокопрочняющей стали X18H9T ($\sigma_T = 26 \text{ кг/мм}^2$; $\sigma_{\text{пч}} = 62 \text{ кг/мм}^2$; $\delta = 46,7\%$; $\psi = 70\%$).

Измерение твердости проводилось на твердомере алмазным конусом под нагрузкой 100 кг с отсчетом по шкале Д. Исходная твердость стали $HRD = 24$, что соответствует $HB = 150$.

Тарировочный график, связывающий твердость с интенсивностями напряжений и деформаций, был построен по результатам испытания исследуемой стали на кручение. Цилиндрический образец радиусом $R = 18 \text{ мм}$ закручивался до определенной величины удельного угла закручивания φ . По нему определялся сдвиг в наружном слое образца $\gamma = R\varphi$, а по последнему — логарифмический сдвиг [5]

$$g = \ln \left[1 + \frac{\gamma}{2} \left(\gamma + \sqrt{4 + \gamma^2} \right) \right]. \quad (5)$$

Интенсивность деформаций $e_i = \frac{1}{\sqrt{3}} g$.

Касательное напряжение определялось по крутящему моменту из соотношения [6]

$$\tau = \frac{3}{2\pi R^3} \left(M + \frac{1}{3} \gamma \frac{dM}{d\gamma} \right). \quad (6)$$

Интенсивность напряжений при плоской деформации $\sigma_i = \sqrt{3} \tau$.

Твердость измерялась в десяти точках по наружному диаметру. С найденными изложенным способом интенсивностями напряжений и деформаций сопоставлялась твердость, средняя из этих десяти измерений.

Спаренный тарировочный график представлен на рис. 1.

Предварительно было выявлено соотношение между длиной l и диаметром d , при котором в средней части образца имеет место плоская деформация. С этой целью на трех образцах диаметром 30 мм и длиной 30, 60 и 90 мм были накернены точки на небольших лысках, снятых по длине образцов. Образцы подвергались радиальному сжатию в 2 этапа деформирования до величины осадки $\delta = \frac{d-h}{d} 100\%$, соответственно, 25,7 и 40%.

Измерение расстояния между накерненными точками после осадки дало возможность определить осевую деформацию e_z . Распределение e_z по длине образцов при осадке 40% приведено на рис. 2.

Из этого графика видно, что на расстоянии одного диаметра от торца образца осевая деформация e_z практически отсутствует.

Таким образом, принимая для основной серии размеры образцов $d = 30$ мм и $l = 60$ мм, можно получить в среднем сечении по длине плоскую деформацию.

Величина нагрузки P , ширина контактной площадки a , соответствующие им центральные углы α , высоты сечения h и условная степень

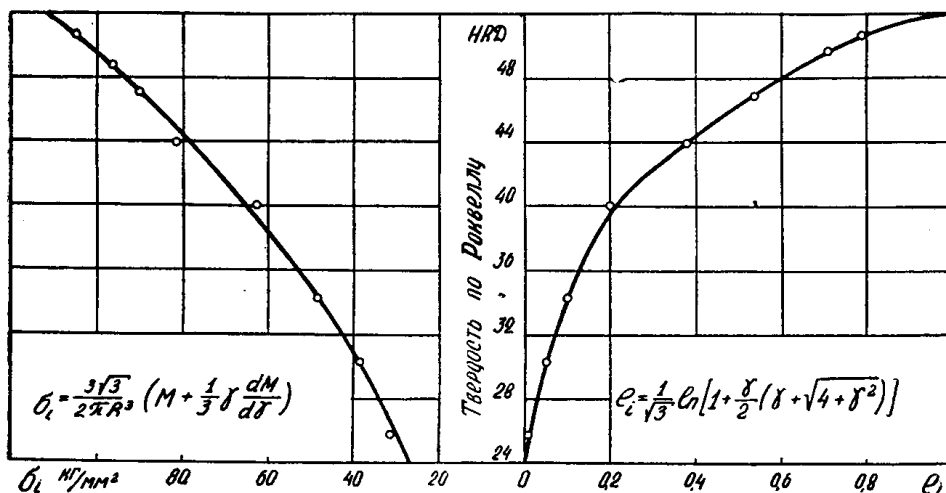


Рис. 1. Тарировочный график

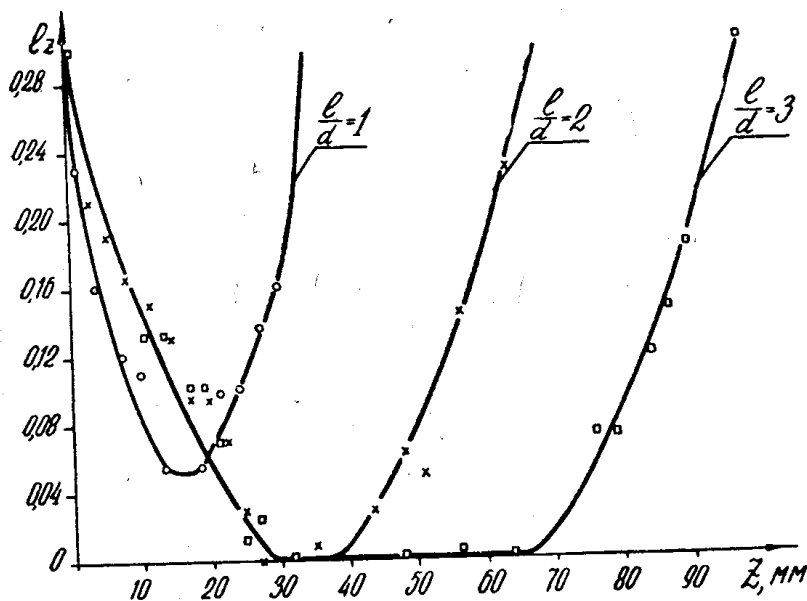


Рис. 2. Зависимость осевой деформации от длины образца

деформации для испытанных образцов приведены в таблице.

После деформирования образцы разрезались в средней по длине плоскости. В полученном сечении измерялась твердость. Результаты измерения твердости были статистически обработаны. По усредненной твердости из тарировочного графика определялась величина интенсив-

ности касательных напряжений $k = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_i$. Распределение $\kappa(x, y)$ представлено на рис. 3.

№ п/п	P , т	a , мм	α , град.	h , мм	δ , %
1	61	12	48	26,5	11,7
2	105	17	70	24	20
3	175	24	101	21	30

Граничные условия при расшифровке были приняты следующими: боковая поверхность свободна от нагрузки, трением на контактных площадках пренебрегалось (заметим, что это допущение могло сказаться только на результатах в области CAF , рис. 3), вдоль осей симметрии угол наклона линий скольжения равен 45° .

Расшифровка выполнена следующим образом. В области ABL решена задача Коши, в областях BLD , $DACE$ и DEO решались смешанные задачи.

В результате решения получены сетки линий скольжения, показанные на рис. 3, для одной четверти образца вследствие его симметричности.

На этой же фигуре приведены эпюры деформаций $e_x = -e_y$ для горизонтального и вертикального диаметров. По графику зависимости

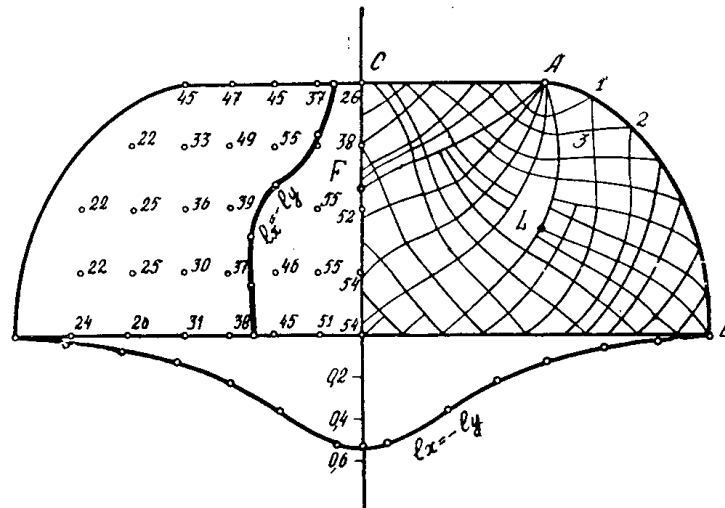


Рис. 3. Радиальное сжатие цилиндра

между твердостью и интенсивностью деформаций (рис. 2) можно определить e_i в различных точках горизонтального и вертикального диаметров.

Значения главных деформаций определяются из соотношения [4]

$$e_1 = -e_3 = \frac{\sqrt{3}}{2} e_i. \quad (7)$$

Эпюры $e_x = -e_y$ для горизонтального диаметра имеют параболический характер с максимумом в центре образца при различных степенях осадки. Для вертикального диаметра максимум эпюр

$e_x = -e_y$ при осадке 11,7 и 20% находится на некотором расстоянии от центра образца и лишь при $\delta = 30\%$ перемещается в центральную часть цилиндра.

На рис. 4 показаны эпюры напряжений σ_x и σ_y вдоль горизонтального диаметра деформированных образцов. Напряжения σ_y изображены толстыми линиями, σ_x — более тонкими. Кружочками обозначены экспериментальные точки при степени осадки 11,7%, крестиками — при $\delta = 20\%$ и треугольниками — при $\delta = 30\%$.

Эпюры σ_y не являются монотонными. Они имеют два минимума, которые примерно совпадают с проекцией границ, контактной площадки при данной степени осадки на горизонтальный диаметр.

С увеличением степени осадки значительно возрастают максимальные значения σ_y в центре образца, несколько увеличиваются местные максимумы для крайних частей эпюры и повышаются значения минимумов. Положительные (растягивающие) напряжения σ_x уменьшаются, а затем меняют знак в центральной части образца. Максимальные значения σ_x соответствуют минимумам на эпюрах σ_y .

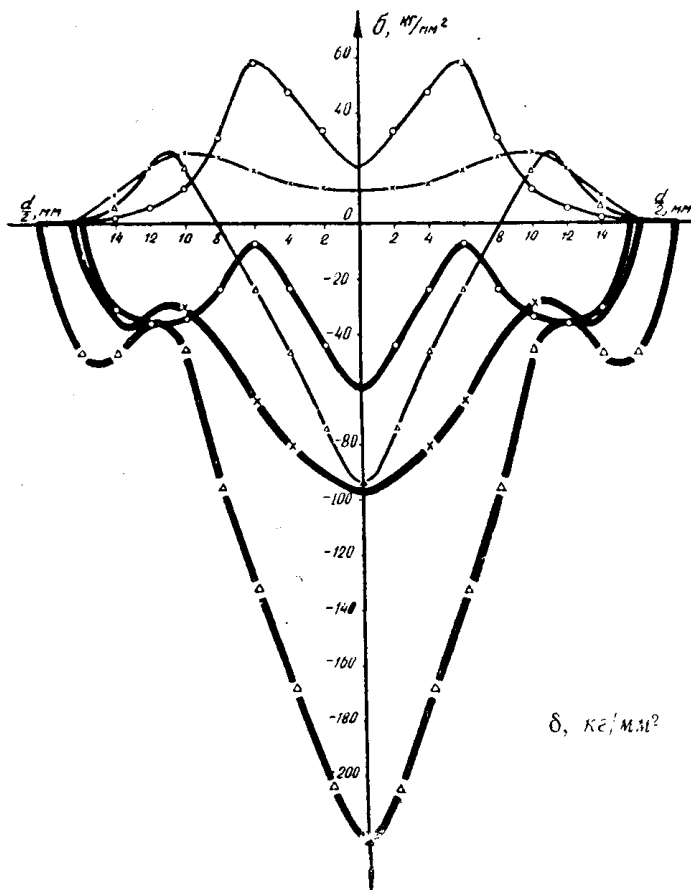


Рис. 4. Эпюры главных напряжений вдоль горизонтального диаметра:
 ○ — осадка 11,7%; × — осадка 20%; Δ — осадка 30%.

По эпюре σ_y была вычислена деформирующая сила, которая затем сопоставлялась с фактической. При осадках 11,7% и 20% расчетное усилие оказалось меньше действительного на 8 и на 4%. При наибольшей осадке расчетное усилие оказалось завышенным на 23%. Значительная величина ошибки в последнем случае объясняется, очевидно,

накоплением погрешности в процессе приближенного решения дифференциальных уравнений равновесия.

Следовательно, предложенный метод расшифровки [4] в ряде случаев позволяет получать надежные результаты, но необходимо разработать методы уточнения решений.

В выполненной работе подтверждены основные качественные выводы исследований [2, 3] и количественно оценивается изменение главных напряжений с ростом осадки образцов. При значительных степенях осадки ($\delta=30\%$) результаты данной работы примерно соответствуют результатам исследования [3]. В этом случае не столь существенно и различие в эпюрах σ_r .

Можно считать установленным, что при небольших степенях осадки в центральной части образца имеет место разноименное напряженное состояние. При значительных же осадках σ_r меняет знак на отрицательный и в центре образца возникает одноименное напряженное состояние.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Д. Томленов. Об особенностях расчета напряженного состояния, возникающего при ковке плоскими бойками. Вестник машиностроения, № 3, 1959.
2. Е. П. Унксов, В. М. Заварцева. Исследование напряжений в металле при ковке валов и штанг. Вестник машиностроения, № 3, 1955.
3. Ю. С. Богомолов, Л. М. Седоков, Л. Г. Цеханова. Исследование напряженного состояния при поперечной ковке и прокатке методом измерения твердости (находится в печати).
4. Г. Д. Дель. Исследование пластической деформации измерением твердости. Известия ТПИ, т. 138, 1965.
5. Я. Б. Фридман, Т. К. Зилова, Н. И. Демина. Изучение пластической деформации и разрушения методом накатанных сеток. Оборонгиз, 1962.
6. В. Д. Кузнецов. Физика твердого тела. Т. 2, Томск, 1941.