

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ  
РАДИАЛЬНОМ СЖАТИИ ЦИЛИНДРА**

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

(Рекомендована к печати научным семинаром кафедры сопротивления материалов)

Анализ напряженного состояния цилиндров при радиальном сжатии между параллельными плитами прессы в пластической области представляет большой интерес, так как служит основой для изучения процессов поперечнойковки и прокатки.

Исследование проведено на образцах из сильно упрочняющейся стали X18H9T методом измерения твердости. Основные характеристики этой стали следующие: предел текучести  $26 \text{ кг/мм}^2$ , предел прочности  $62 \text{ кг/мм}^2$ , условное относительное удлинение  $\delta = 46,7 \%$  и условное относительное сужение  $\psi = 55 \%$ . Выбор стали для постановки эксперимента объясняется весьма значительным изменением ее твердости при пластическом деформировании.

Измерение твердости производилось на твердомере по шкале  $D$  под нагрузкой  $100 \text{ кг}$ . Эта шкала оказалась наиболее удобной для выбранного материала с исходной твердостью  $H_v = 150$ . Для сохранения подобия отпечатков использовался алмазный конусный наколечник.

Зависимость между твердостью стали и степенью ее деформации (интенсивностью напряженного состояния) определялась при линейном сжатии.

Чтобы получить значительные деформации при осевом сжатии и избежать существенного влияния трения на торцах, образцы деформировались последовательно в семь этапов. Первоначальные размеры образцов: высота  $h_0 = 60 \text{ мм}$  и диаметр  $d_0 = 24 \text{ мм}$  — выбраны с отношением  $\frac{h_0}{d_0} = 2,5$ . Это отношение принято на основании анали-

за кривых сжатия, полученных М. А. Большаниной [1]. Применение образцов с еще большим отношением высоты к диаметру приведет к потере устойчивости образца при его пластическом деформировании.

На первом этапе нагружение производится ступенями по 10 тонн. После каждого увеличения нагрузки измеряются размеры деформированного образца и твердость его. При отношении  $\frac{h_i}{d_{\max}} \approx 1$ , что

соответствует нагрузке 100 тонн, деформированные образцы перетачивались. Здесь и в дальнейшем под  $h_i$  понимается изменяющаяся высота образца в процессе деформирования, а  $d_{\max}$  — его максимальный диаметр в тот же момент. При переточке высота образцов оста-

ется неизменной, а диаметр уменьшается до значения  $d_i$  так, чтобы получить отношение  $\frac{h_i}{d_i}$  равным 1,5. Как показали опыты, образцы диаметром  $d_i \leq 20$  мм при отношении  $\frac{h_i}{d_i} > 1,5$  при нагрузке в несколько десятков тонн дают перекося. Поэтому в дальнейшем на остальных этапах нагружения отношение  $\frac{h_i}{d_i}$  принимается не более 1,5.

После переточки на втором этапе образцы вновь подвергались сжатию до уменьшения отношения  $\frac{h_i}{d_i} \approx 1$  и измерялись как твердость, так и изменяющиеся размеры образцов. Далее следовала вторая переточка с уменьшением диаметра образцов, чтобы получить отношение  $\frac{h_i}{d_i}$  равным 1,5; затем следующий этап деформирования и т. д.

На седьмом этапе деформирования после шестой переточки размеры образцов составляли  $h_i = 7,5$  мм и  $d_i = 5$  мм.

Интенсивность напряжения  $\sigma_i$  при осевом сжатии равна истинному напряжению сжатия

$$\sigma_i = S_{сж} = \frac{P}{F_0} (1 - \epsilon_{сж}). \quad (1)$$

Здесь  $P$  — нагрузка в кг,

$F_0$  — площадь первоначального сечения в мм<sup>2</sup>;

$\epsilon_{сж}$  — относительная деформация при сжатии.

Интенсивность деформации при осевом сжатии определяется из соотношения:

$$e_i = \ln \frac{h_0}{h_i} + \frac{\sigma_i}{3G} \approx \ln \frac{h_0}{h_i}, \quad (2)$$

где  $h_0$  — первоначальная высота образца до деформирования в мм;

$h_i$  — высота образца

после приложения нагрузки, мм;

$G$  — упругий модуль сдвига, кг/мм<sup>2</sup>.

На основании результатов опытов построены графики зависимости интенсивности напряжений и интенсивности деформаций от твердости (рис. 1). Полученный тарировочный график следует считать приближенным, так как, несмотря на принятые меры, деформация образцов была неравномерной, а твердость измерялась на торцах, где, как известно

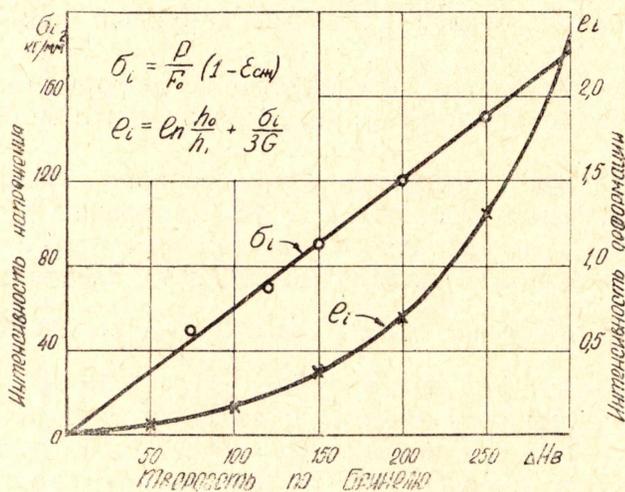


Рис. 1. Зависимость между интенсивностью напряжения (деформации) и твердостью.

[1], деформация несколько меньше, чем определяемая по формуле (2).

Из теории малых упруго-пластических деформаций известно [2], что интенсивность напряжений является вполне определенной функцией интенсивности деформаций, не зависящей от характера напря-

женного состояния. В первом приближении можно предположить, что зависимость напряжения от твердости (рис. 1) при осевом сжатии может быть распространена на случай радиального сжатия, представляющий плоское напряженное состояние.

Таким образом, графики рис. 1 могут быть использованы для того, чтобы по величине изменяющейся твердости пластически деформируемого цилиндра судить об интенсивности деформации (напряжения).

Основная серия опытов приводилась на 6 дисках диаметром 45 мм и длиной 20 мм. Эти диски подвергались радиальному сжатию, т. е. сжимались между двумя параллельными плитами таким образом, что ось образцов оставалась параллельной плитам прессы. Величина нагрузки, определяющая степень обжатия, составляла 11,5; 20, 30, 50, 70 и 95 тонн, условная относительная деформация изменялась от 2,7 до 39 %.

Продеформированные образцы торцевались на несколько миллиметров для снятия наплывов металла, обусловленных деформированием по направлению оси дисков, и подвергались шлифовке. По торцам образцов наносились рейсмусом сетки рисок с шагом 1,5 — 2 мм. В точках пересечения рисок измерялась твердость на половине площади торцов вследствие симметрии дисков. Для некоторых образцов (сжатых до нагрузки 20 и 30 тонн) с целью проверки и усреднения результатов твердость измерялась по всей площади торца диска.

Полученные данные о величине твердости в различных точках торцов образцов позволили построить изоскляры (линии равных твердостей). Картины изоскляр (рис. 2) довольно близко соответствуют фотографиям изохром (линий главных касательных напряжений), приведенным в работе [3] для случаяковки на прямоугольных бойках. Это обстоятельство позволяет сделать вывод, что, несмотря на ряд допущений, Е. Н. Унксовым и В. Н. Заварцевой получена вполне реальная качественная картина распределения напряжений по сечению вала методом фотоупругости.

Обработка результатов исследования для определения напряжений в точках поперечного сечения образцов выполнена в двух вариантах расчета. В первом варианте за основу принята зависимость величины максимальных касательных напряжений при осевом сжатии от твердости. Максимальное касательное напряжение для линейного сжатия

$$\tau_{\max} = \frac{S_{\text{сж}}}{2} = \frac{\sigma_i}{2}, \quad (3)$$

поэтому его величина легко определяется из графика (рис. 1).

Распространяя зависимость между максимальными касательными напряжениями и твердостью при линейном сжатии на случай радиального сжатия диска, можно определить по изменившейся величине твердости значения максимальных касательных напряжений в точках поперечного сечения образцов.

Во втором варианте расчета по изменившейся твердости в точках поперечного сечения цилиндра при радиальном сжатии определяется интенсивность напряжения. Для перехода от интенсивности напряжения  $\sigma_i$  к главным нормальным и максимальным касательным напряжениям использованы эпюры распределения напряжений и соотношения главных напряжений, приведенные в работе [3].

Разница между максимальными касательными напряжениями, определенными двумя вариантами расчета, невелика и составляет 5 — 7 %. Следовательно, предлагаемая методика определения компо-

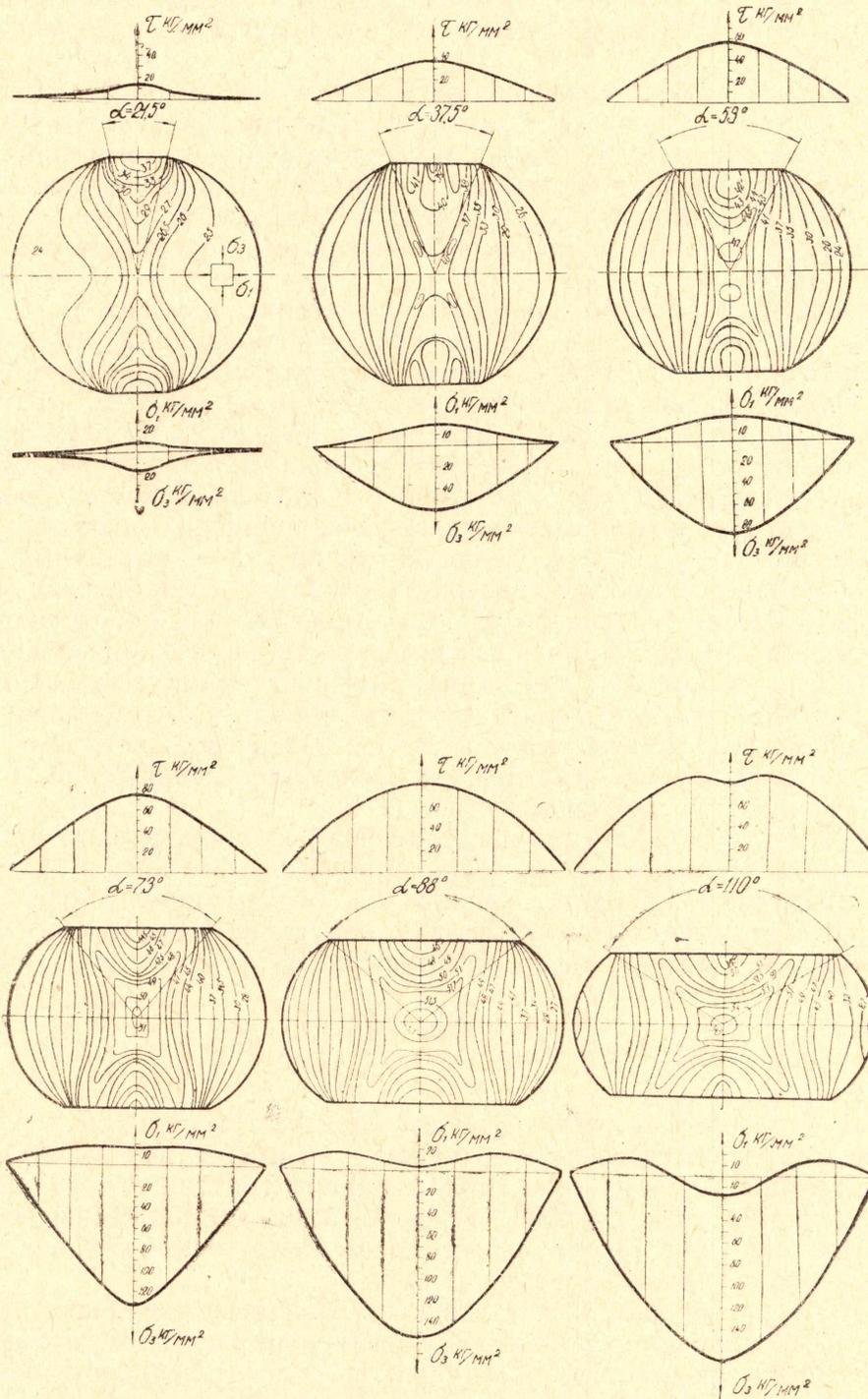


Рис. 2. Изоскляры при различных степенях обжатия образцов.

нентов напряженного состояния испытанием твердости может быть признана удовлетворительной.

Проведенное исследование позволяет зафиксировать первоначальные очаги возникновения пластической деформации, оценить степень неравномерности перехода металла в пластическое состояние. Так, на рис. 3 приведена зависимость интенсивности напряжения для нескольких точек поперечного сечения образца от погонной нагрузки. Эти графики показаны для тех характерных точек, в которых на разных этапах деформирования интенсивность напряжения была максимальной.

На первом этапе деформирования при нагрузке до  $600 \text{ кг/мм}$  максимальная интенсивность напряжения наблюдается в точке А, лежащей практически на площадке, по которой происходит действие сжимающей силы. Далее с увеличением погонной нагрузки от  $1000$  до  $1500 \text{ кг/мм}$  максимальная интенсивность напряжения отмечается в точке В. Таким образом, волна распространения наибольшей интенсивности напряжения, а следовательно, и наибольших деформаций, переходит с поверхности в глубь цилиндра.

Наконец, при увеличении погонной нагрузки до  $2500 \text{ кг/мм}$  максимальная интенсивность напряжений оказывается в центре диска, в точке О. После этого дальнейшего увеличения нагрузки (в опытах она достигала  $4700 \text{ кг/мм}$ ) не приводит к изменению расположения зоны максимальной интенсивности напряжения. Она остается в центральной части цилиндра.

Таким образом, при увеличении степени деформирования текущая поверхность слоев первоначально максимальная, затем затормаживается и идет вглубь, распространяясь в центральную часть цилиндра. Очевидно, непрокованный металл будет иметь место до тех пор, пока максимальная интенсивность не появится в центре цилиндра. Эта степень деформации характеризуется погонной нагрузкой  $2500 \text{ кг/мм}$  и условной относительной деформацией  $\delta = 20\%$ .

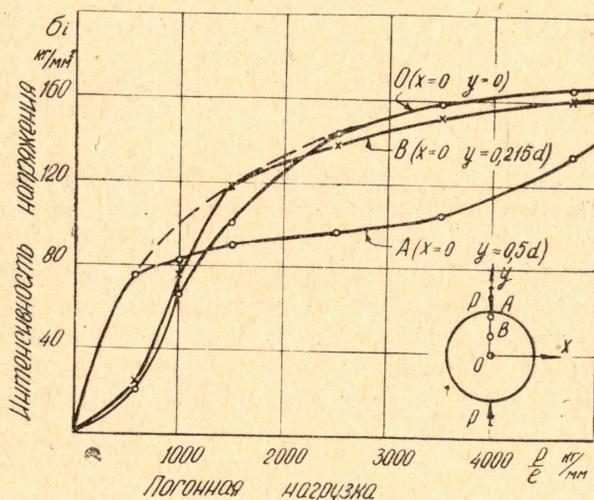


Рис. 3. Зависимость интенсивности напряжения для точек поперечного сечения образца от величины погонной нагрузки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Д. Кузнецов. Физика твердого тела. Т. 2, Томск, изд-во, ТГУ, 1941.
2. Г. А. Смирнов-Аляев. Сопротивление материалов пластическому деформированию. Машгиз, 1961.
3. Е. П. Унксов, В. М. Заварцева. Исследование напряжений в металле при ковке валов и штанг. Вестник машиностроения, № 3, 1955.