ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 173 1970

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ РАДИАЛЬНОМ СЖАТИИ ЦИЛИНДРА

Ю. С. БОГОМОЛОВ, Г. Д. ДЕЛЬ

(Представлена научным семинаром кафедры сопротивления материалов)

Знание напряженного состояния при радиальном сжатии цилиндрических образцов между параллельными плитами необходимо для более рационального проведения таких процессов обработки металлов давлением, как поперечная ковка и прокатка, а также для обоснования более надежных методов механических испытаний ряда хрупких материалов.

В литературе приводятся результаты экспериментальных исследований напряжений по горизонтальной оси симметрии [1, 2, 3]. Однако наибольшее значение и в теории обработки металлов давлением и в связи с испытанием хрупких материалов на радиальное сжатие имеют исследования напряжений вдоль вертикальной оси симметрии. Это связано с тем, что пластическая деформация зарождается в окрестности контактных площадок, захватывая все большую часть вертикальной оси симметрии, и лишь при больших степенях осадки распространяется на всю горизонтальную ось симметрии. При испытании хрупких материалов трещина возникает в различных точках вертикальной оси симметрии.

Аналитическое решение А. Д. Томленова [4], в результате которого рассчитаны напряжения вдоль вертикальной оси симметрии, получено для идеально пластического материала, что несколько ограничивает его область применения.

Основной задачей настоящей работы является экспериментальное определение напряжений вдоль вертикальной оси симметрии цилиндра из упрочняющегося материала, сжимаемого по радиусу между параллельными плитами пресса.

Исследование выполнено по методике, изложенной в статье [5]. Для расчета напряжений по этой методике необходимо знать поперечную деформацию e_z и интенсивности деформаций и напряжений. Опыты проведены на дисках из Ст. 3 диаметром 160 и 32 *мм* и толщиной 50 и 10 *мм*, что позволило выяснить влияние размеров образцов на характер и величину напряженно-деформированного состояния.

Для определения деформации e_x по осям симметрии образцов были нанесены параллельные риски. Измеряя расстояния между рисками на инструментальном микроскопе в различных точках диска после его осадки, находим из соотношения:

$$e_x = \ln \frac{a}{a_0},$$

где a_0 и a — расстояния между рисками до и после осадки.

Измерение поперечной деформации e_z осуществлялось при помощи индикатора по осям симметрии диска при установке его на горизонтальной плите. Расчетная формула:

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

где h_0 и h — толщина диска до и после осадки.

Деформацию e_y определяли из условия постоянства объема:

$$e_x + e_y + e_z = 0.$$

Интенсивность деформаций

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_x - e_y)^2 + (e_y - e_z)^2 + (e_z - e_x)^2}.$$

Зная интенсивность деформации, можно определить интенсивность напряжений σ_i по кривой течения, полученной при линейном сжатии, следующим образом. Из исследуемого материала было изготовлено 8 цилиндрических образцов, которые сжимались со смазкой в осевом направлении до различных степеней осадки. По известным соотношениям определены интенсивности напряжений σ_i и деформаций e_i для каждого из образцов (рис. 1). В нескольких точках меридионального сечения образцов определялась твердость по Роквеллу *HRB*. По результатам экспериментов построен градуировочный график σ_i — *HRB*. Один из дисков был сжат по радиусу на 30%. По искажению делительной сетки, нанесенной на поверхность диска до осадки, определялась в различных точках интенсивность деформаций. Измерение твердости в этих же точках длины позволило по тарировочному графику σ_i — *HRB* определить интенсивность напряжений. Полученные, таким образом, значения σ_i и e_i в различных точках диска нанесены на кривую течения, полученную при линейном сжатии, и дали разброс в пределах естественной погрешности эксперимента (рис. 1). Это позволило использовать кривую течения при линейном сжатии в нашем исследовании.

Рис. 1. Кривая течения Ст. 3: ○ — осевое сжатие, × — радиальное сжатие

Главные напряжения определяются из соотношения [5]:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_i}{e_i}\left(-e_z^2 \pm \sqrt{\frac{e_i^2 - e_z^2}{3}}\right).$$

Осадка испытуемых дисков проводилась со смазкой из смеси графита и глицерина для уменьшения возможности появления напряжений вдоль оси Z, т. е. для получения плоского напряженного состояния. Диск диаметром 160 *мм* был осажен на 3; 5, 6 и 11,7%.

Характер изменения деформированного состояния, изученный достаточно подробно, получил в настоящей работе подтверждение и подробно не рассматривается.

На рис. 2 приведены эпюры главных напряжений по осям симметрии диска. Напряжения σ_x у контактной площадки являются сжимаю-

щими и составляют 18—28 *кг/мм*^{2} в зависимости от степени осадки. Затем они изменяют знак и становятся растягивающими в центральной части диска. Максимум эпюры σ_x при осадке 11,7% равен 25 *кг/мм*^{2} и расположен в центре диска. При меньших осадках максимум эпюры σ_x лежит примерно на расстоянии одной трети высоты диска от центра.

Максимум эпюры σ_y, составляющий 34—60 *кг/мм*^{2}, находится у контактной площадки, минимум — в центре диска.

Рис. 2. Эпюры главных напряжений вдоль осей симметрии цилиндров, сжатых по радиусу между параллельными плитами.
Цилиндр $d = 160$ *мм*, $l = 50$ *мм*.
Вдоль вертикальной оси: ○ — главные напряжения при $\delta = 3\%$, × — главные напряжения при $\delta = 5{,}6\%$, Δ — главные напряжения при $\delta = 11{,}7\%$.
Вдоль горизонтальной оси: ⊙ — σ при $\delta = 11{,}7\%$, ● — σ при $\delta = 11{,}7\%$.
Цилиндр $d = 32$ *мм*, $l = 10$ *мм*, □ — главные напряжения при $\delta = 11{,}7\%$

Для оценки зависимости напряженного состояния от диаметра образца были определены напряжения при осадке на 11,7% диска диаметром 32 *мм*. Результаты расчета, приведенные на рис. 2, указывают на сравнительно небольшое изменение напряженного состояния с изменением размеров цилиндра.

Ранее был предложен метод определения предела прочности хрупких материалов при радиальном сжатии цилиндрических образцов.

Оценка прочности производится по формуле:

$$\sigma_{\text{пч}} = A\frac{P}{dl},$$

где P — разрушающая сила,
d и l — диаметр и длина образца.

У ряда хрупких материалов коэффициент A по первой теории прочности согласно известному решению Герца составляет примерно 0,64. У материалов, обладающих некоторой пластичностью, замечено возрастание указанного коэффициента. Коэффициент A, по-видимому,

зависит также от упрочняемости материала и в некоторой мере от размера образцов.

Проведенное исследование позволяет дать оценку влияния пластичности и упрочняемости материала на величину коэффициента A.

Приняв за критерий прочности наибольшее растягивающее напряжение по первой теории прочности, можно получить график зависимости коэффициента A от степени осадки (рис. 3). Из графика видно, что коэффициент A не остается постоянным и существенно зависит от пластичности материала.

Рис. 3. График зависимости коэффициента A от осадки цилиндра

Для оценки влияния упрочняемости был выполнен расчет напряжений при $\sigma_i = \text{Const}$, т. е. для идеально пластического материала. Напряжения определялись по деформации указанного выше диска диаметром 160 *мм*, осаженного на 11,7%. При этом согласно выполненным ранее исследованиям [6] принималось, что деформированное состояние практически не зависит от свойств материала.

В результате расчета установлено, что при одной осадке у неупрочняющегося материала коэффициент A на 25% ниже, чем у хрупкого материала той же упрочняемости, что и Ст. 3.

Выводы

1. При радиальном сжатии диска напряжения σ_y вдоль вертикальной оси являются сжимающими и возрастают с увеличением осадки. Максимального значения они достигают у контактной площадки, минимального — в центре цилиндра. Напряжения σ_x при малых осадках отрицательны у контактной площадки и положительны в центре цилиндра.

2. Отношение предела прочности к среднему напряжению в диаметральном сечении при испытании хрупких материалов на радиальное

сжатие сильно зависит от пластичности материала, в несколько меньшей мере — от упрочняемости и практически не зависит от размеров образца.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. П. Унксов, В. М. Заварцева. Исследование напряжений в металле при ковке валов и штанг. Вестник машиностроения, № 3, 1955.
2. Ю. С. Богомолов, Л. М. Седоков, Л. Г. Цеханова. Исследование напряженного состояния при поперечной ковке и прокатке методом измерения твердости. Кузнечно-штамповочное производство, № 6, 1964.
3. Ю. С. Богомолов, Г. Д. Дель, Л. М. Седоков, Л. Г. Цеханова. Исследование радиального сжатия цилиндра измерением твердости. Изв. ТПИ, т. 133. Изд. ТГУ, 1965.
4. А. Д. Томленов. Об особенностях расчета напряженного состояния, возникающего при ковке плоскими бойками. Вестник машиностроения, № 3, 1959.
5. Г. Д. Дель. Исследование пластической деформации измерением твердости. Изв. Томского политехнического института, т. 138, 1966.
6. Ю. С. Богомолов. Влияние механических свойств материала на деформированное состояние цилиндрических образцов при радиальном сжатии, (в печати).