

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ОСАДКЕ ЦИЛИНДРА

В. А. ОГОРОДНИКОВ, Г. Д. ДЕЛЬ

(Представлена научным семинаром кафедры сопротивления материалов)

Многие технологические процессы холодной обработки металлов давлением сопровождаются осесимметричной деформацией обрабатываемого металла. Примерами таких процессов являются: осадка цилиндрической заготовки, ее прошивка, выдавливание (прессование), волочение, ковка турбинных дисков, фланцев и т. д.

Аналитические методы определения напряженно-деформированного состояния при осесимметричной пластической деформации разработаны еще недостаточно. В большинстве случаев решение таких задач получено для идеально пластического материала в предположении Хаара-Кармана о равенстве окружного напряжения одному из главных напряжений в меридиональных плоскостях [1].

В этом же предположении удается определить напряженное состояние упрочняющегося материала по распределению твердости [2]. Определение напряженного состояния, руководствуясь гипотезой Хаара-Кармана, в отдельных случаях обосновано [3], а в других случаях приводит к ошибкам неизвестной величины [4].

Целью данной работы является определение напряженно-деформированного состояния при осесимметричной осадке цилиндра и проверка в этих условиях предположения Хаара-Кармана.

Напряженно-деформированное состояние определялось методом измерения твердости. Деформации рассчитывались по методу, изложенному в статье [5].

Градуированный график «интенсивность напряжений  $\sigma_i$  — твердость,  $H_B$  — интенсивность деформаций  $\epsilon_i$ » построен по результатам испытания цилиндрических образцов из исследуемого материала на осевое сжатие и последующего измерения твердости сжатых до различной степени деформации образцов. Сжатие градуированных образцов производилось со смазкой торцов пастой из коллоидного графита и глицерина. Твердость измерялась в меридиональных сечениях.

Исследование напряженно-деформированного состояния выполнено на трех цилиндрических образцах из высокопрочняющейся стали 45Г17Ю3Х высотой 54 мм и диаметром 36 мм. Указанная сталь была выбрана с целью достижения наибольшей чувствительности твердости к приращению пластической деформации.

Испытуемые образцы подвергались осевому сжатию без смазки торцов с целью получения напряженно-деформированного состояния,

имеющего место при ковке цилиндрических заготовок. Величина осадки цилиндров  $\ln \frac{H_0}{H}$  составила 0,18, 0,13 и 0,48.

После сжатия торцы образцов полировались, твердость определялась по Бринеллю шариком  $D = 10$  мм под нагрузкой 1000 кг. Указанная нагрузка выбрана с целью получения наибольшего количества измерений твердости. Твердость градуировочных образцов определялась аналогично, поэтому заниженная твердость не могла сказаться на результатах испытания. Для получения распределения твердости по объему образцов сострагивались слои материала в плоскостях, перпендикулярных оси.

Высокая чистота поверхности и применение инструментального микроскопа позволили измерять диаметры отпечатков с точностью до 0,01 мм, чему соответствовала точность определения твердости до 3 единиц по Бринеллю.

По измеренной твердости из градуировочного графика определялась интенсивность деформаций  $e_i$ .

При исследовании осесимметричной деформации располагаем тремя уравнениями [5]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_r - e_\varphi)^2 + (e_r - e_z)^2 + (e_\varphi - e_z)^2 + \frac{3}{2} \gamma_{rz}^2} &= e_i, \\ e_r + e_z + e_\varphi &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\frac{de_\varphi}{dr} = \frac{1}{r} (e_r - e_\varphi). \quad (2)$$

Вдоль оси симметрии из условия симметрии  $e_r = e_\varphi$ ,  $\gamma_{rz} = 0$ , поэтому

$$e_r = e_\varphi = -\frac{1}{2} e_z = \frac{1}{2} e_i. \quad (3)$$

Радиальная  $e_r$  и окружная деформации  $e_\varphi$  рассчитывались также в горизонтальной плоскости симметрии перпендикулярной оси  $z$ .

В точке 1 этой плоскости, совпадающей с вертикальной осью симметрии, имеем  $e_r = e_\varphi = \pm \frac{1}{2} e_i$ . В следующей точке 2, расположенной на расстоянии  $\Delta r = r_2 - r_1 = 2$  мм, деформации рассчитывались по формулам

$$e_{r_2} = \frac{-B(2C+1) + 1,73 \sqrt{e_i^2(1 \pm C + C^2) - B^2}}{2(1+C+C^2)}, \quad (4)$$

$$e_{\varphi_2} = B + Ce_{r_2}, \quad (5)$$

где

$$\left. \begin{aligned} B &= \frac{r_2 [2r_1 e_{\varphi_1} \pm \Delta r (e_{r_1} - e_{\varphi_1})]}{r_1 (2r_2 \pm \Delta r)} \\ C &= B + Ce_r \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Аналогично рассчитывались окружная и радиальная деформации в остальных точках горизонтальной плоскости симметрии. Выполненный расчет проверен путем сопоставления полученной в результате величины окружной деформации на контуре с результатами расчета по формуле.

$$e_\varphi = \ln \frac{D_5}{D_0}, \quad (7)$$

где  $D_0$  и  $D_5$  — диаметры до и после деформации в среднем (по высоте) сечении образцов.

Наибольшее расхождение не превышало 6%. На высокую точность определения деформаций по распределению твердости указывают и результаты проверки эпюр интенсивности деформаций  $e_i$ , построенных вдоль вертикальной оси  $z$ . Расхождение средней величины деформации  $e_i$ , найденной по этим эпюрам с  $\ln \frac{l_n}{l_0}$ , не превышало 1%. Полученные

результаты указывают на значительную неравномерность распределения деформаций вдоль оси  $Z$ . Вдоль горизонтальной оси симметрии деформации распределяются более равномерно.

Наибольшая величина деформации имеет место в центре образца, там же зафиксирована наибольшая твердость. Окружная деформация не равна радиальной — наибольшее расхождение имело место у наиболее деформированного образца и составило примерно 50%.

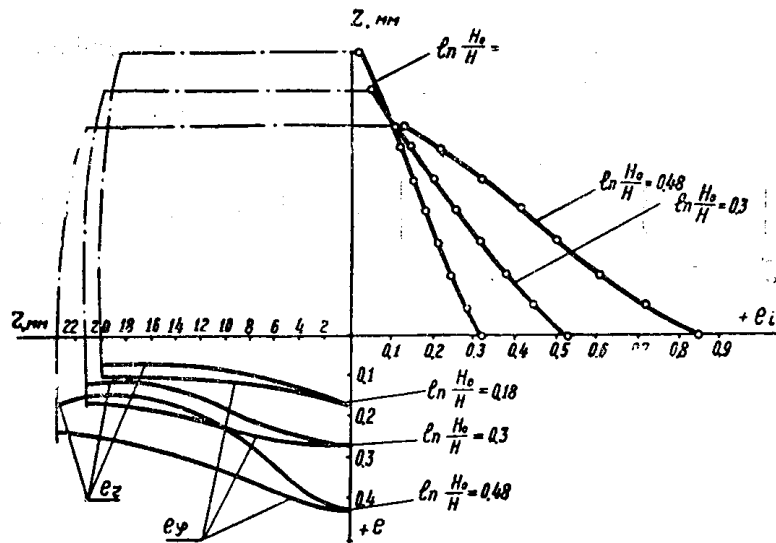


Рис. 1. Деформации при осадке цилиндра

Полученные эпюры (рис. 1) качественно совпадают с эпюрами деформаций, полученными другими методами [6].

По измеренной твердости из градуировочного графика определялась также интенсивность напряжений  $\sigma$ . На контуре деформированных образцов по соотношениям деформационных теорий пластичности определялись окружные  $\sigma_\theta$  и главное напряжение  $\sigma_z$ , направленное по касательной к контуру.

$$\sigma_z = \frac{2}{3} \frac{\sigma_i}{e_i} (e_3 - e_2), \quad (8)$$

$$\sigma_\theta = \frac{2}{3} \frac{\sigma_i}{e_i} (e_\varphi - e_1), \quad (9)$$

где  $e_3, e_2$  — главные деформации, определяемые из системы (1).

$$e_\varphi = n \frac{l_0 \delta}{L_0}$$

Таким образом были рассчитаны напряжения  $\sigma_\theta$  и  $\sigma_z$  на контуре деформированных образцов (рис. 2) в сечениях  $\frac{Z}{H} = 0$  (среднее по вы-

соте сечение, кривые 1),  $\frac{Z}{H} = \frac{1}{8}$  (кривые 2),  $\frac{Z}{H} = \frac{1}{4}$  (кривые 3),  
 $\frac{Z}{H} = \frac{3}{8}$  (кривые 4),  $\frac{Z}{H} = \frac{1}{2}$  (кривые 5).

Из полученных эпюр следует, что интенсивность напряжений  $\sigma_i$  и главное напряжение  $\sigma_3$  возрастают с увеличением степени осадки.

На контуре сечения  $Z = \frac{H}{2}$

главное напряжение с увеличением степени осадки возрастает, а затем убывает. Окружное напряжение  $\sigma_\theta$  составляет около 40% от главного напряжения  $\sigma_3$ . Исходя из предположения Хаара-Кармана, оно должно быть равно нулю.

Выполненное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. В среднем (по высоте) сечении без смазки сжимаемого образца окружная деформация превышает радиальную. В силу этого предположение определять среднюю интенсивность деформации при осевом сжатии как удвоенный логарифм отношения диаметров образца после и до сжатия является, по-видимому, ошибочным, так как средняя интенсивность деформации при этом завышается.

2. В силу неравенства радиальной и окружной деформаций не равны и соответствующие им напряжения, предположение Хаара-Кармана, таким образом, не подтверждается в условиях осесимметричной осадки.

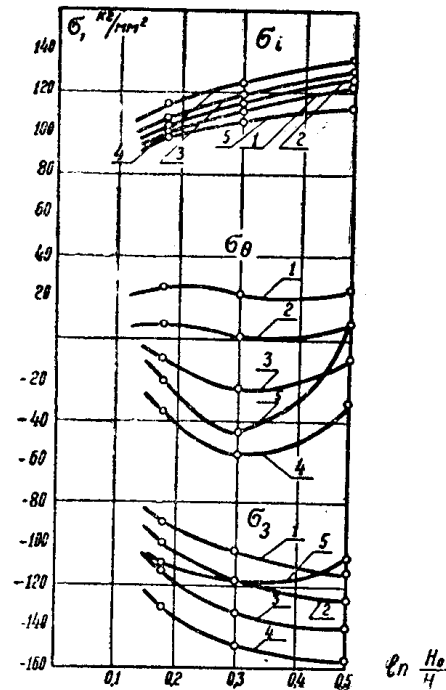


Рис. 2. Напряжения при осадке цилиндра

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ю. Ишлинский. Прикладная математика и механика. Т. VII, вып. 3, 1944.
2. Г. Д. Дель. Исследование пластической деформации измерением твердости. Изв. ТПИ, т. 138, 1965.
3. Л. М. Качанов. Основы теории пластичности. Гостехиздат. 1956.
4. Р. Хилл. Математическая теория пластичности. ИИЛ. 1956.
5. Г. Д. Дель. Определение деформированного состояния в пластической области по распределению твердости. Изв. ТПИ, т. 157, 1968.
6. П. О. Пашков. Пластичность и разрушение металлов. Судпромгиз, 1950.