

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТУПИЦЫ ТУРБИННОГО ДИСКА

Г. Д. ДЕЛЬ, Б. П. ЧЕБАЕВСКИЙ, В. Д. ДЕЛЬ, А. Ф. ПРОНКИН

(Представлена научным семинаром лаборатории пластических деформаций)

Развиваемый в последнее время метод определения напряженно-деформированного состояния в пластической области измерением твердости [1—3] может быть применен для определения напряжений и нагрузок в момент разрушения по твердости разрушенной детали. Это может оказаться полезным при выяснении причин аварий, а в ряде случаев позволяет избежать дорогостоящих натурных испытаний, так как информация, являющаяся результатом таких испытаний, может быть получена исследованием разрушившихся ранее деталей. Если же натурные испытания проводятся, то измерением твердости разрушенной детали можно значительно расширить получаемую при этом информацию. В настоящей статье приводятся результаты исследования напряженно-деформированного состояния в ступице турбинного диска из стали ЭИ437Б, разрушившегося при испытании турбинной установки. Размеры ступицы: наружный диаметр — 130 мм, диаметр отверстия — 33 мм, высота — 60 мм.

Из недеформированной стали ЭИ437Б, имеющей ту же термообработку, что и материал диска, изготавливались призматические образцы с размерами 20×20×15 мм. Образцы сжимались со смазкой до различных степеней деформации. После деформирования на боковой поверхности призм измерялась твердость НВ шариком 10 мм под нагрузкой в 3000 кг. Интенсивность напряжений σ_i определялась по деформирующему усилию P и площади F поперечного сечения образца

$$\sigma_i = \frac{P}{F}.$$

Интенсивность деформации e_i определялась по формуле

$$e_i = \frac{h_0 - h}{h_0},$$

где h_0 , h — высота образца до и после деформации. По результатам испытаний на сжатие строился тарировочный график, связывающий твердость НВ с интенсивностью напряжений и деформаций. Затем в 41 точке торца ступицы диска замерялась твердость. По твердости из тарировочного графика « σ_i — НВ — e_i » определяли величины σ_i , e_i в различных точках радиуса. Изменение НВ, σ_i , e_i вдоль радиуса диска показано на рис. 1.

При осесимметричном деформировании несжимаемого материала радиальная деформация e_r и окружная e_φ связаны с e_i следующим соотношением:

$$e_\varphi^2 + e_r^2 + e_\varphi \cdot e_r = \frac{3}{4} e_i^2. \quad (1)$$

Решая систему из уравнения (1) и уравнения совместности деформаций

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

определяли e_r и e_φ . Полученные эпюры приведены на рис. 2.

Совместное решение уравнений (1), (2) осуществлялось методом конечных разностей. Деформации на контуре отверстия в ступице ($e_i = e_{\varphi_0}$, $e_{r_0} = e_{z_0} = -\frac{e_{\varphi_0}}{2}$) использовались в качестве граничных условий.

Деформации e_r , e_φ , e_z , найденные по твердости, были сопоставлены с деформациями, вычисленными по изменению диаметра отверстия. Их расхождение составило 8%. Такое близкое совпадение указывает на то, что нагрев ступицы при ее работе не повлиял существенно на связь между твердостью, напряжениями и деформациями.

В точке 1, расположенной на расстоянии Δr от контура отверстия, согласно (2)

$$e_{\varphi_1} = e_{\varphi_0} + \frac{1}{2} \left(\frac{e_{r_0} - e_{\varphi_0}}{r_0} + \frac{e_{r_1} - e_{\varphi_1}}{r_1} \right) \Delta r. \quad (3)$$

Цифра в индексе указывает номер точки, к которой относится данная величина. Из (3) находим

$$e_{\varphi_1} = B_1 + C_1 e_{r_1}, \quad (4)$$

где

$$B_1 = \frac{r_1 [2r_0 e_{\varphi_0} + \Delta r (e_{r_0} - e_{\varphi_0})]}{r_0 (2r_1 + \Delta r)},$$

$$C_1 = \frac{\Delta r}{2r_1 + \Delta r}.$$

Решив совместно уравнения (1), (4), получаем

$$e_{r_1} = \frac{-B_1 (2C_1 + 1) \pm 1,73 \sqrt{(e_i)^2 (1 + C_1 + C_1^2) - B_1^2}}{2(1 + C_1 + C_1^2)}.$$

Поперечная деформация e_z определялась из условия несжимаемости

$$e_z = -e_r - e_\varphi.$$

Окружное σ_φ и радиальное σ_r напряжения определялись из соотношений [3]:

$$\sigma_\varphi = \sigma_i \left[-\frac{e_z}{e_i} + \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{1 - \left(\frac{e_z}{e_i} \right)^2} \right],$$

$$\sigma_r = \sigma_i \left[-\frac{e_z}{e_i} - \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{1 - \left(\frac{e_z}{e_i} \right)^2} \right].$$

Расчет деформаций, как уже указывалось, начинается от отверстия. Однако у отверстия диска велик градиент деформаций (рис. 2), этим объясняется зависимость точности расчета от величины шага. Аппроксимация исходных данных позволяет выполнить ряд расчетов при изменяющемся шаге. За достоверное принимаются деформации и напряжения, полученные в случае, когда дальнейшее уменьшение Δr не приводит к заметному изменению напряжений и деформаций.

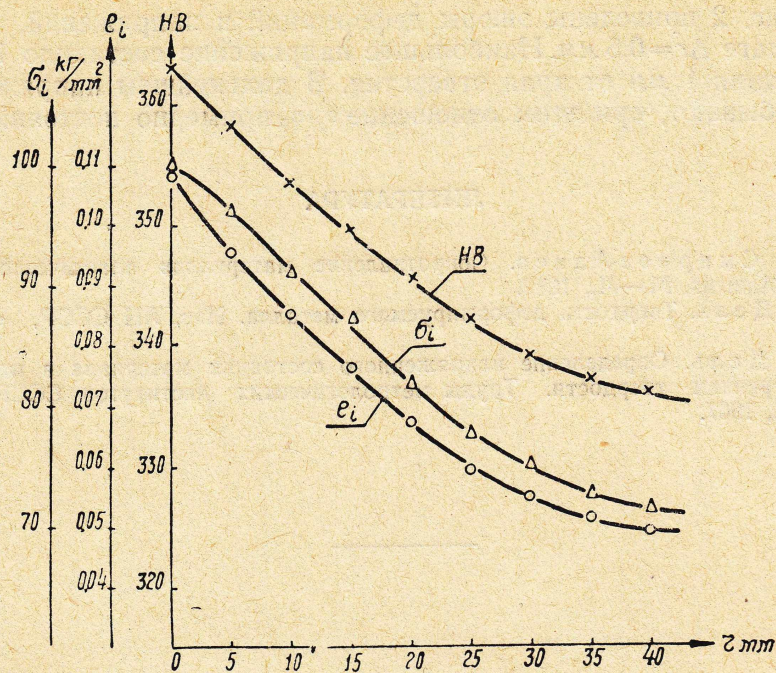


Рис. 1. Изменение HB , σ_i , e_i вдоль радиуса ступицы диска

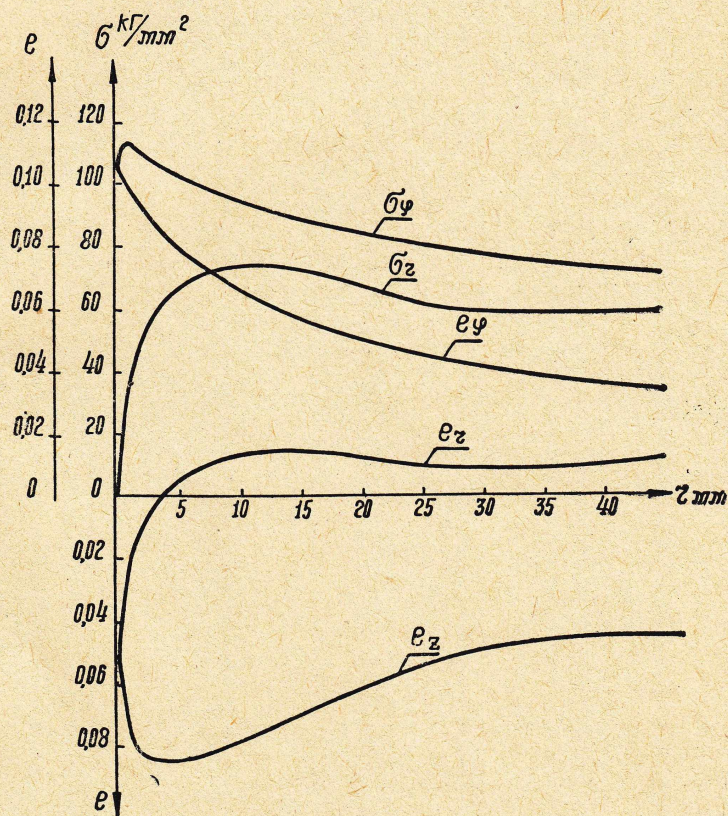


Рис. 2. Деформации и напряжения вдоль радиуса ступицы диска

На рис. 2 приведены эпюры деформаций и напряжений, полученных при шаге $\Delta r = 0,5$ мм. Наибольшее напряжение составило 113 кг/мм^2 на расстоянии 1 мм от края отверстия. В дальнейшем напряжения монотонно убывают, при этом отношение σ_r/σ_φ примерно постоянно и равно 0,8.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Смирнов-Аляев. Сопротивление материалов пластическому деформированию. Машгиз, М.—Л., 1962.
2. Г. Д. Дель. Твердость деформируемого металла. Изв. АН СССР, «Металлы», № 4, 1967.
3. Г. Д. Дель. Определение напряженного состояния материала в пластической области измерением твердости. Труды метрологических институтов СССР, вып. 91 (151), М.—Л., 1967.