

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ОКОЛО ОТВЕРСТИЙ В ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧКАХ

Л. А. ПОЛИНОВСКИЙ

(Представлена научным семинаром лаборатории пластических деформаций)

Тонкостенные оболочки, отношение толщины стенки которых к диаметру срединной поверхности составляет менее 0,07, широко применяются в энергетическом и химическом машиностроении, причем многие из них имеют боковые отверстия для ввода патрубков. Напряженное состояние в тонкостенных оболочках приближенно можно считать плоским [1]. Около концентраторов в оболочках часто допускается местная пластическая деформация, при исследовании которой все большее значение приобретают экспериментально-аналитические методы, позволяющие получать нужную количественную информацию с учетом реальных свойств материала. Среди других экспериментально-аналитических методов метод измерения твердости пластически деформированного материала [2, 3] отличается своей простотой и универсальностью. Он применим для исследований концентрации напряжений в мелких деталях и моделях, а также на реальных оболочках таких, как оболочки барабанов котлов с внутренним диаметром 1600—1800 мм и толщиной стенки 92—115 мм.

Последовательность исследования напряженно-деформированного состояния методом измерения твердости следующая:

1. Одноосным растяжением образцов из материала оболочки строится тарировочный график в координатах: твердость ( $H$ ) — интенсивность напряжений ( $\sigma_i$ ).

2. В исследуемой области измеряется твердость. Способ измерения зависит от размеров пластической зоны и условий исследования: на наружной поверхности малых оболочек и моделях твердость измеряется по Виккерсу, на внутренней поверхности крупных оболочек — по Бригеллю. Результаты замеров твердости обрабатываются построением графиков изменения твердости по координатам, при этом происходит сглаживание значений твердости.

3. Поле распределения твердости в области концентратора при помощи тарировочного графика переводится в соответствующее ему поле распределения интенсивности напряжений.

4. Совместным решением двух дифференциальных уравнений равновесия и выражения  $\sigma$  через компоненты тензора напряжений  $T$ , определяются три неизвестных тензора, характеризующих плоское напряженное состояние. Дифференциальные уравнения интегрируются методом конечных разностей с использованием условий на свободном

контуре, где одно из главных напряжений равно нулю, а другое —  $\sigma_t$ , причем свободный контур является траекторией этого главного из напряжений.

Исследование производилось на оболочке барабана котла при ее гидропрессовке. На рис. 1 приведен тарировочный график для материала оболочки, на рис. 2 — поле распределения твердости и интенсивности

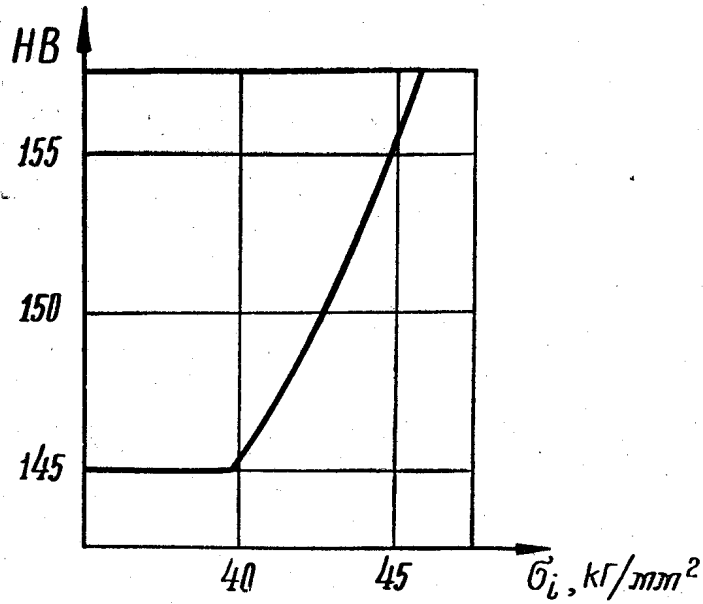


Рис. 1. Тарировочный график: твердость Н — интенсивность напряжений  $\sigma_t$ .

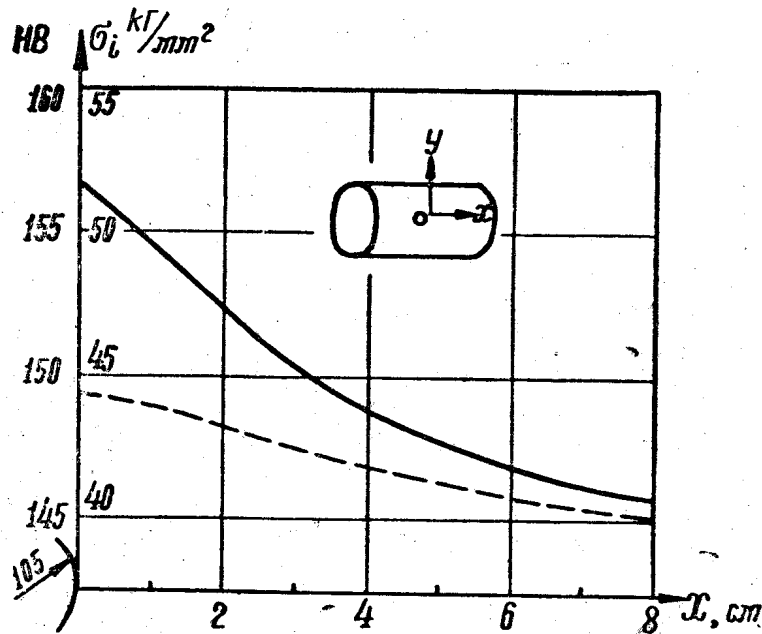


Рис. 2. Изменение твердости и интенсивности напряжений у отверстия по осевому сечению оболочки

напряжений около отверстия. Решение удалось получить при записи уравнений равновесия в траекториях главных напряжений:

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial S_1} + (\sigma_1 - \sigma_2) \frac{\partial \nu}{\partial S_2} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \sigma_2}{\partial S_2} + (\sigma_1 - \sigma_2) \frac{\partial \nu}{\partial S_1} = 0, \quad (2)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2$  — главные напряжения;  
 $S_1, S_2$  — координаты, отсчитываемые вдоль траекторий  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ ;  
 $\nu$  — угол наклона главного напряжения к оси  $X$ .  
 Третьим уравнением было

$$\sigma_i^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2. \quad (3)$$

Уравнения решались при одновременном построении сетки траекторий главных напряжений. Наибольший интерес представляет распределение напряжений в наиболее опасном, осевом сечении оболочки. Порядок построения сетки траекторий главных напряжений показан в [4]. После определения положения очередной узловой точки из уравнения (1) определялся  $\nu$  для точки следующего ряда, и из уравнения (2) —  $\sigma_2, \sigma_1$  определялось из уравнения (3).

Расшифровка была устойчивой благодаря тому, что из уравнения (3) определялось большее главное напряжение

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_2 \pm \sqrt{4\sigma_2^2 - 3\sigma_2^2}}{2},$$

и вычитаемое под знаком радикала было значительно меньше уменьшаемого.

При исследовании напряженного состояния около отверстия диаметром 105 мм в оболочке барабана котла с внутренним диаметром 1600 мм и толщиной стенки 115 мм при ее гидропрессовке под давлением 200 атм было установлено, что в области, примыкающей к осевому сечению оболочки, траектории  $\sigma_1$  близки к дугам окружностей, центр

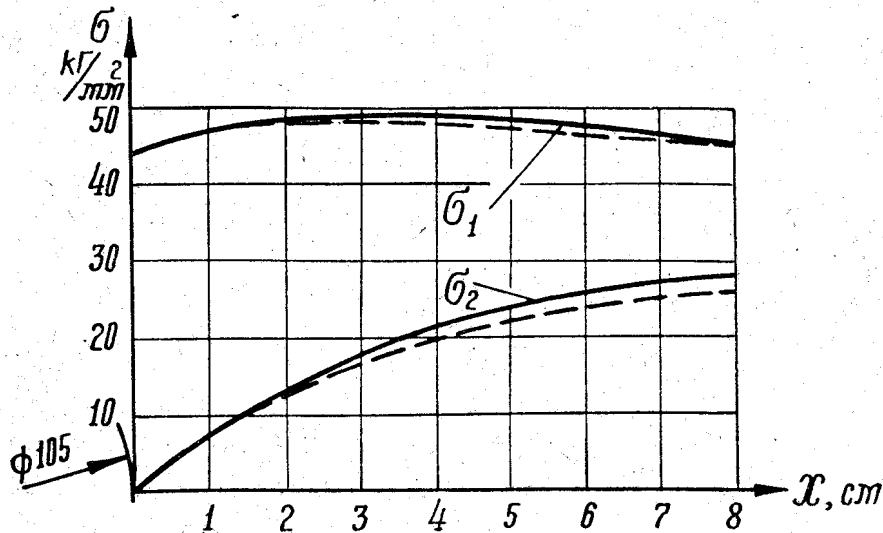


Рис. 3. Эпюры главных напряжений по осевому сечению оболочки

которых совпадает с центром отверстия, т. е. деформация близка к осесимметричной. Это обстоятельство позволило значительно упростить методику исследования.

По упрощенной методике достаточно замерить твердость вдоль следа осевого сечения (ось  $X$  на рис. 2) и решить совместно уравнения (2) и (3). Из уравнения (2), записанного для данного случая

$$\frac{\partial \sigma_2}{\partial X} + \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{X} = 0, \quad (4)$$

определяется  $\sigma_2$ ;  $\sigma_1$  — из уравнения (3).

В качестве граничных использовались условия на свободном контуре, где  $\sigma_2 = 0$ ,  $\sigma_1 = \sigma$ . Изменение интенсивности напряжений по оси  $X$  также приведено на рис. 2. Полученные эпюры главных напряжений показаны на рис. 3. Разница максимального значения  $\sigma_1$ , рассчитанного численным решением системы уравнений (1), (2), (3) (эпюры приведены на рис. 3 пунктиром) в области, примыкающей к оси  $X$ , и определенного решением уравнений (4), (3), составляет 2,5%, наибольшие отклонения  $\sigma_2$  на границе пластической зоны составляют 6,5% за счет накопленной ошибки принятого упрощения. Приближенный расчет можно применять, когда область определения напряжений ограничена размером 0,8 от диаметра отверстия.

### Выводы

1. Разработана упрощенная экспериментально-аналитическая методика исследования концентрации напряжений около отверстий в тонкостенных оболочках, находящихся под внутренним давлением.
2. По разработанной методике определены напряжения в опасном сечении оболочки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. М. Беляев. Сопротивление материалов. ГИФМИ, М., 1956.
2. Г. А. Смирнов-Аляев. Сопротивление материалов пластическому деформированию. Машгиз, М.—Л., 1961.
3. Г. Д. Дель. Твердость деформированного металла. Изв. АН СССР, «Металлы», № 4, М., 1967.
4. Г. Д. Дель. Определение напряженного состояния материала в пластической области измерением твердости. Труды метрологических институтов СССР, вып. 91 (151). Исследования в области измерения твердости. М.—Л., 1967.