7. **Панин В. Е., Лихачев В. А., Гриняев Ю. В.** Структурные уровни деформации твердых тел.— Новосибирск: Наука, 1985.
8. **Аэро Э. Л., Булыгин А. Н.** Гидромеханика жидких кристаллов // Итоги науки и техники. Сер. Гидромеханика.— М.: ВИНИТИ, 1973.— Т. 7.
9. **Новацкий В.** Теория упругости.— М.: Мир, 1975.
10. **Зубов Л. М.** О дислокациях Вольтерра в нелинейно-упругих телах // ДАН СССР.— 1986.— Т. 287, № 3.
11. **Гантмахер Ф. Р.** Теория матриц.— М.: Наука, 1967.
12. **Зубов Л. М., Карякин М. И.** Многозначные смещения и дислокации Вольтерра в плоской нелинейной теории упругости // ПМТФ.— 1987.— № 6.
13. **Nowacki W.** On discrete dislocations in micropolar elasticity // Arch. Mech.— 1974.— V. 26, N 1.
14. **Зубов Л. М.** Теория дислокаций Вольтерра в нелинейно-упругих телах // Изв. АН СССР. МТТ.— 1987.— № 5.

г. Ростов-на-Дону *Поступила 12/VII 1988 г.*

УДК 620.171.5

В. М. Тихомиров, В. П. Тырин

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА РАССЕЯННОГО СВЕТА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ K_{III} В ТРЕХМЕРНЫХ ЗАДАЧАХ

Для экспериментального определения коэффициента интенсивности напряжений (КИН) K_{III} при исследовании объемных элементов конструкций с поверхностными или внутренними трещинами используются методы «замораживания» деформаций [1, 2] и рассеянного света [3]. Метод рассеянного света обладает большими потенциальными возможностями и существенными преимуществами перед методом «замораживания», позволяя получать необходимые данные без разрезки модели. Однако из-за сложности эксперимента и интерпретации измеряемых величин этот метод не получил широкого применения. Например, в [3] предлагается просвечивать модель в плоскости, перпендикулярной фронту трещины, лучом света, пересекающим вершину трещины. Такая схема просвечивания требует тщательного подбора иммерсионной жидкости и обработки поверхности берегов трещины, а также вращения модели или установки вокруг точки пересечения лучом фронта трещины.

В настоящей работе описывается более простая методика проведения эксперимента, позволяющая перенести способы обработки экспериментальных данных для определения КИН, известные в плоской фотоупругости, на случай определения K_{III} для пространственных трещин.

При продольном сдвиге напряжения вблизи вершины трещины выражаются следующим образом [4]:

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = 0,$$
$$\tau_{xz} = K_{III}(2\pi r)^{-1/2}\sin(\theta/2), \quad \tau_{yz} = K_{III}(2\pi r)^{-1/2}\cos(\theta/2), \tag{1}$$

где x, y, z — ортогональная система координат, ориентированная таким образом, что ось z является касательной к фронту трещины в точке O (рис. 1); r, θ — полярные координаты.

Так как по методу рассеянного света измеряется величина оптической разности хода лучей света, обусловленная разностью квазиглавных напряжений, которые действуют в плоскости, перпендикулярной просвечивающему лучу, то наиболее эффективными будут просвечивания в плоскости xOy, параллельные оси x. Важным обстоятельством является то, что направления главных напряжений не меняют своей ориентации вдоль этих направлений (отсутствует вращение главных осей). В этом случае порядок полосы интерференции m_{ij} для точки x_i, взятой на луче $y = y_j$, связан с напряжениями зависимостью

$$m_{ij} = 2C\int_{x_0}^{x_i} \tau_{yz}\,dx \tag{2}$$

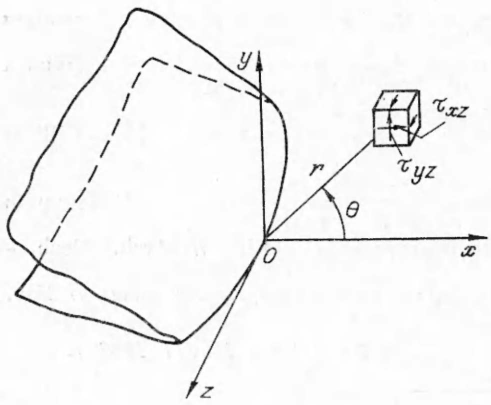


Рис. 1

(x_0 — координата точки входа луча света ($y = y_j$) в модель, C — оптико-механическая постоянная материала модели).

Направления главных напряжений ориентированы одинаково во всех точках плоскости xOy, что позволяет регистрировать картину полос интерференции при просвечивании этой плоскости ножом поляризованного света, направленным вдоль оси x. При этом пучок света располагается выше или ниже трещины и не пересекает ее фронт. Выбрав n точек на прямых, параллельных оси x ($y = \mathrm{const}$), с известными значениями порядка полосы интерференции и принимая во внимание соотношения (1) и (2), имеем

$$K_{\mathrm{III}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{k} \sum_{i=1}^{l_j} \frac{\Delta m_{ij}}{\int\limits_0^{x_i} f(x, y_j)\, dx}, \tag{3}$$

где k и l_j — количество прямых $y = \mathrm{const}$ и точек на них, взятых в расчет; $n = \sum\limits_{j=1}^{k} l_j$; $\Delta m_{ij} = m_{0j} - m_{ij}$ (m_{0j} — порядок полосы на прямой y_j при $x = 0$); $f(x, y_j) = C \left[\dfrac{y_j + (x^2 + y_j^2)^{1/2}}{2\pi (x^2 + y_j^2)} \right]^{1/2}$. Формула (3) предполагает определение K_{III} самым простым способом обработки экспериментальной информации. Однако возможность получения большого числа экспериментальных данных Δm_{ij} по одной картине полос позволяет применить и более сложные методы обработки.

Описанный способ основан на решении (1), справедливом в ограниченной зоне у вершины трещины. При изготовлении модели трещина, как правило, имитируется надрезом [3] (поверхностная) или полостью с антиадгезионной вставкой [5] (внутренняя). В том и другом случае радиус закругления ρ в вершине «трещины» имеет вполне конкретную величину, что искажает поле моделируемых напряжений и приводит к существенным ошибкам. Учесть влияние ρ можно, использовав решение о кручении бесконечного осесимметричного тела с внешним гиперболическим вырезом [6]:

$$\tau_{yz} = \frac{3p\left(\sqrt{a/\rho + 1} + 1\right)\sqrt{a/\rho}}{4\left(2\sqrt{a/\rho + 1} + 1\right)\left(\sqrt{a/\rho + 1} - 1\right)} \frac{\sin v \cos v}{(\mathrm{sh}^2 u + \cos^2 v)\, \mathrm{ch}\, u}. \tag{4}$$

Здесь a — радиус неповрежденной части; p — параметр нагрузки; u, v — эллиптические координаты. В нашем случае связь между системами координат запишем как

$$x = a(\mathrm{sh}\, u \cos v - 1), \quad y = a\, \mathrm{ch}\, u \sin v.$$

Подберем параметры a и p так, чтобы напряжения в модели и теле с гиперболическим вырезом в некоторой области совпадали, принимая при этом, что величина ρ для выреза равна радиусу закругления вершины «трещины» в модели, т. е. по измеренным в n точках плоскости xOy порядкам полос минимизируем функцию

$$F(a, p) = \sum_{j=1}^{k} \sum_{i=1}^{l_j} \left[\Delta m_{ij} - 2C \int_0^{x_i} \tau_{yz}(a, p)\, dx \right]^2 \tag{5}$$

(τ_{yz} определяется по (4)).

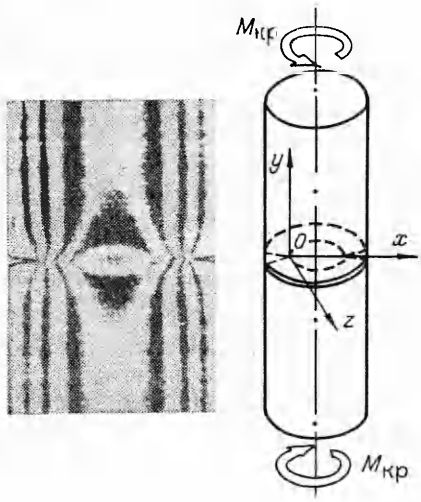
Таким образом, по величинам a^* и p^*, соответствующим минимуму $F(a, p)$, предполагая, что предельный переход по напряжениям от тела с гиперболическим вырезом к телу с внешней кольцевой трещиной подобен переходу от модели с надрезом к расчетному элементу конструкции с трещиной, имеем

$$K_{\mathrm{III}} = (3/8)p^* \sqrt{\pi a^*}. \tag{6}$$

Для проверки точности изложенной методики были исследованы следующие тестовые задачи: кручение цилиндра с кольцевой трещиной и цилиндра с радиальной трещиной. С этой целью изготовлены две модели.

Первая модель — цилиндр диаметром 37,6 мм с кольцевым надрезом глубиной 5 мм, радиус закругления в вершине которого $\rho_1 = 0{,}05$ мм (рис. 2). Материал модели — эпоксидный компаунд на основе смолы ЭД-16, для которого $C_1 = 13{,}5$ кН/м. Вторая модель из полиуретана СКУ-6 — цилиндр диаметром 44 мм — имела радиальный надрез глубиной 22 мм по всей длине образующей (рис. 3). Надрез в образце изготавливался в два этапа. Сначала осуществлялась заливка полиуретанового компаунда с последующей полимеризацией в форме цилиндра с радиальным вырезом глубиной 18 мм и шириной 0,5 мм, затем острым лезвием производился надрез до необходимой глубины. При этом $\rho_2 = 0{,}1$ мм. Такой способ изготовления трещины позволил исключить трение по большей поверхности ее берегов при кручении модели. Оптико-механическая постоянная материала СКУ-6 $C_2 = 0{,}239$ кН/м.

Исследования проводились на установке рассеянного света, состоящей из следующих оптических элементов: источник поляризованного света He — Ne-лазер ЛГ-75; полуволновая пластинка для поворота плоскости поляризации света; две цилиндрические линзы и щелевая диафрагма, преобразующие луч света в световой нож шириной 37 мм и толщиной до 0,5 мм; модель в иммерсионной ванне, прикрепленной к нижнему захвату нагрузочного устройства; фотоприемник для регистрации интерференционных картин. В соответствии с описанной методикой модели просвечивались ножом поляризованного света в плоскости xOy (см. рис. 2 и 3). Картины интерференции регистрировались в направлении Oz для первой модели и под углом 70° к плоскости xOy — для второй. На рис. 2 приведена картина полос, наблюдаемая в первой модели, нагруженной



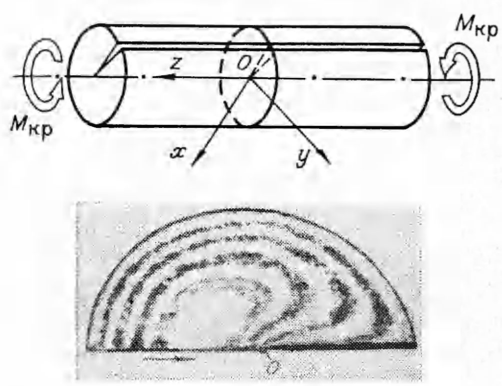


Рис. 3

Рис. 2

Номер модели	$M_{кр}$, Н·м	r, мм	n	K_{III}	$K^{т}_{III}$	δ, %
				Н/мм$^{3/2}$		
I	14,4	3,0 (1,5)	25 (10)	8,06 (8,51)	7,81	3,1 (8,8)
	19,2	3,0 (1,5)	25 (10)	10,93 (9,85)	10,43	4,8 (—5,5)
	24,0	3,0 (1,5)	25 (10)	13,40 (13,66)	13,04	3,1 (5,0)
II	0,87	2,0 (1,0)	20 (10)	0,384 (0,346)	0,371	3,5 (—6,7)

крутящим моментом $M_{кр} = 2{,}4$ Н·м, и совмещенная для двух положений светового ножа: выше и ниже плоскости трещины. Картина полос во второй модели показана на рис. 3 ($M_{кр} = 0{,}87$ Н·м; стрелкой обозначено направление просвечивания; точка O соответствует вершине трещины).

При каждом нагружении для увеличения числа полос интерференции регистрировали картины полос целых и половинных порядков. Затем в области у вершины надреза выбирали 30 точек, для которых снимали координаты x, y и определяли величины Δm. Далее брали 10 точек, лежащих как можно ближе к окружности радиусом r с центром в вершине надреза, и производили расчет K_{III} по формулам (5), (6) или (3). Изменяя радиус окружности, строили зависимость K_{III} от r. Размеры области, по точкам которой регистрируется наиболее достоверная информация о величине искомого КИН, были равны размерам участка кривой $K_{III}(r)$, где $K_{III} \cong \text{const}$. Окончательно значение КИН K_{III} подсчитывали с учетом всех точек измерений, принадлежащих этой области.

Результаты представлены в таблице. Здесь в скобках приведены величины, отвечающие расчетам K_{III} по формуле (3). Теоретические значения КИН $K^{т}_{III}$ получены по формулам, взятым из [7] (для первой модели) и [4] (для второй). Как видно из таблицы, учет радиуса закругления у вершины надреза позволяет примерно в 2 раза увеличить размер области измерений. В итоге повышается точность регистрации координат и увеличивается число точек измерений, что в конечном счете приводит к повышению точности определения КИН K_{III}.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Lai Zhegmei, Sun Ping.** Photoelastic determination of mixed-mode stress-intensity factors K_I, K_{II} and K_{III} // Exper. Mech.— 1983.— V. 23, N 6.
2. **Сорокатый Ю. И., Божидарник В. В., Налобин А. П.** Фотоупругое определение коэффициента интенсивности напряжений K_{III} // Вестн. Львов. политехн. ин-та.— 1987.— № 210.
3. **Разумовский И. А.** Определение коэффициентов интенсивности напряжений K_I, K_{II} и K_{III} поляризационно-оптическими методами в однородных и кусочно-однородных деталях и образцах с трещинами // Завод. лаб.— 1988.— Т. 54, № 10.
4. **Черепанов Г. П.** Механика хрупкого разрушения.— М.: Наука, 1974.
5. **Костенко Н. А., Бойченко Ю. А., Минченков О. С. и др.** Создание систем внутренних трещин в объемных моделях // Завод. лаб.— 1988.— Т. 54, № 2.
6. **Нейбер Г.** Концентрация напряжений.— М.: Гостехиздат.— 1947.
7. **Андрейкив А. Е.** Пространственные задачи теории упругости трещин.— Киев: Наук. думка, 1982.

г. Новосибирск *Поступила 12/XII 1988 г.*