

УДК 539.375 : 535.55

Напряжённое состояние полосы с системой периодических трещин

Н.В. Корихин, С.Н. Эйгенсон

Санкт-Петербургский институт машиностроения при государственном политехническом университете, кафедра сопротивления материалов и теории упругости

Аннотация. Рассмотрены результаты экспериментального исследования концентрации напряжений около кончика сквозных поперечных трещин в полосе. Исследование осуществлялось методом фотоупругости с применением способа "замораживания" деформаций. Получены значения коэффициентов концентрации напряжений первого и второго типа. Результаты эксперимента подтвердили теоретическое решение.

Abstract. The results of experimental study of stress concentration around the tip of transverse cracks in cross-band have been considered. The study has been carried out by the method of photoelasticity using "freezing" of deformations. The values of the stress intensity factor of the first and second types have been received. The experimental results are in good agreement with the theoretical solution.

Ключевые слова: полоса, трещина, модель, фотоупругость, "замораживание" деформаций, коэффициент интенсивности напряжений, полуплоскость

Key words: band, crack, model, photoelasticity, "freezing" of deformations, stress intensity factor, half-plane

1. Введение

Задача о напряжённом состоянии полосы, ослабленной системой периодических трещин, является актуальной для различных отраслей машиностроения и горной геомеханики.

Ниже приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований напряжённого состояния полосы с системой периодических прямолинейных трещин. Задача решается в упругой постановке.

2. Теоретическое решение

Теоретическое решение о растяжении плоскости дано в работе (Поляхов, Поляхов, 1981). При этом формулы для напряжений (рис. 1) имеют вид:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= 2 \operatorname{Re} \Phi - \operatorname{Re}[\Psi + 2x \cdot \Phi'] ; \\ \sigma_y &= 2 \operatorname{Re} \Phi + \operatorname{Re}[\Psi + 2x \cdot \Phi'] ; \\ \tau_{xy} &= \operatorname{Im}[\Psi + 2x \cdot \Phi'] ,\end{aligned}\quad (1)$$

где

$$\Psi = \frac{1}{2t \cdot i} \int_L \frac{[2 \operatorname{Re} \Phi(\xi) - P_\infty / 2 - 2x \cdot \Phi'(\xi)]}{\operatorname{th} \frac{\pi}{t}(\xi - z)} d\xi + \frac{P_\infty}{2} (e^{-2id} - 1); \quad (2)$$

$$\Phi = \frac{P_\infty}{2} e^{id} \left[\cos \alpha - i \sin \alpha \frac{\operatorname{th} \frac{\pi z}{t}}{\operatorname{ch} \frac{\pi}{t} \sqrt{\operatorname{th}^2 \frac{\pi z}{t} - \operatorname{th}^2 \frac{\pi d}{t}}} \right] - \frac{P_\infty}{4}; \quad (3)$$

$z = x + iy$, $\Phi' = d\Phi / dz$, L – контур одной щели, ξ – координата на контуре. Коэффициенты интенсивности напряжений (КИН) могут быть найдены по формуле

$$K_I + iK_{II} = p_\infty e^{id} \left(-i \sin \alpha \sqrt{\frac{t}{\pi} \operatorname{th} \frac{\pi d}{t}} \right), \quad (4)$$

где K_I и K_{II} – КИН трещин нормального отрыва и поперечного сдвига соответственно.

Коэффициенты интенсивности напряжений являются основными параметрами механики разрушения (Пестриков, Морозов, 2002), изучающей сопротивление конструкционных материалов хрупкому разрушению и прогнозирующей работоспособность элементов деталей машин и

конструкций, ослабленных трещинами. Критерий разрушения линейной механики разрушения имеет вид:

$$K \leq K_c, \quad (5)$$

где K – КИН деталей с трещиной; K_c – критическое значение КИН (вязкость разрушения материала). Параметры K и K_c приобретают значения K_I , K_{II} и K_{Ic} , K_{IIc} .

3. Экспериментальное исследование

Экспериментальное исследование осуществлялось методом фотоупругости (Кошеленко, Поздняк, 2004), отличающимся наглядностью, высокой точностью, и, в отличие от других экспериментальных методов, дающим информацию о напряжённом состоянии во всём объёме исследуемой детали. Метод фотоупругости особенно эффективен для изучения концентрации напряжений. В основе его лежит явление двулучепреломления в прозрачных отверждённых эпоксидных компаундах под нагрузкой. Параметры двулучепреломления зависят от напряжённого состояния модели, их измеряют при просвечивании модели в поляризованном свете.

В работе использовалась методика "замораживания" деформаций, использующая способность эпоксидных полимеров сохранять неизменной оптическую анизотропию, вызванную нагружением модели, и после разгрузки. При температуре 110...140 °С эпоксидная смола переходит из стеклообразного в высокоэластичное состояние. Это состояние характеризуется резким уменьшением модуля нормальной упругости – смола становится резиноподобной. Если нагрузить модель в этом состоянии и медленно охладить под нагрузкой до комнатной температуры, материал возвращается в стеклообразное состояние, а деформации и соответствующие им оптические эффекты фиксируются – "замораживаются".

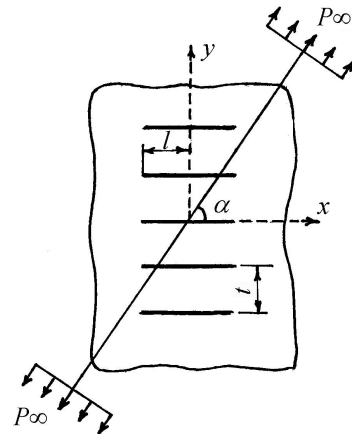


Рис. 1. Плоскость с периодической системой трещин

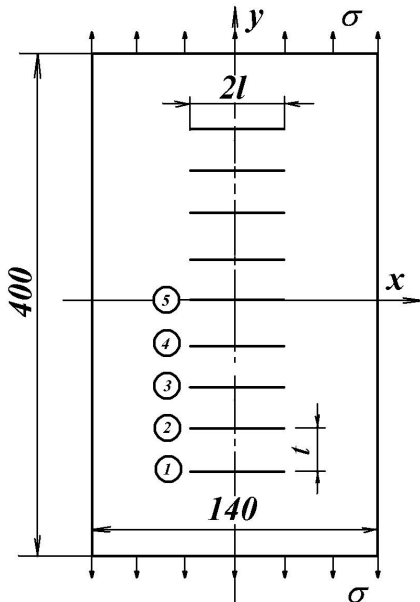


Рис. 2. Модель полосы с трещинами

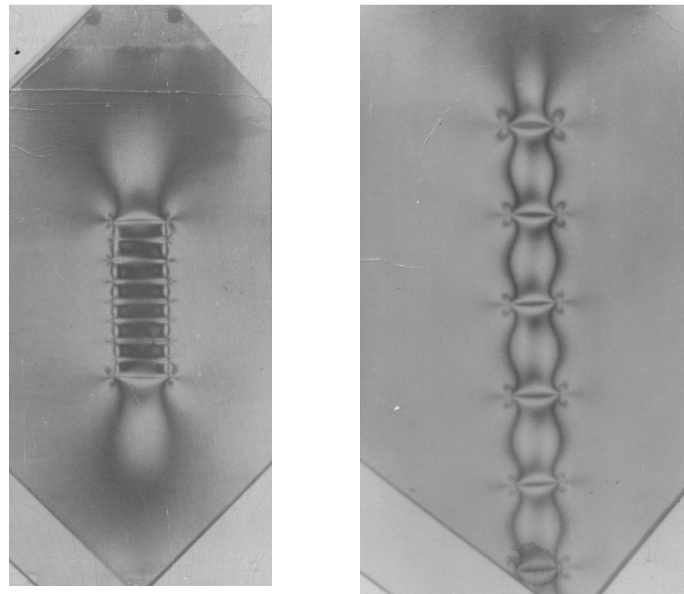


Рис. 3. Картина полос в моделях: а – "частые" трещины; б – "редкие" трещины

Одним из наиболее важных моментов в моделировании задач механики разрушения является нанесение трещин на фотоупругую модель. Основные требования, предъявляемые к трещинам:

абсолютная острота (минимальный радиус закругления), отсутствие остаточных или дополнительных напряжений, заданные размеры, форма и место расположения. Этим требованиям отвечает способ, предложенный в работе (Титов, Эйгенсон, 1979), который использовался в настоящем исследовании. На модели (полосе) с предварительно отшлифованными и отполированными поверхностями жёстко закреплялся металлический шаблон с прорезами, соответствующими трещинам (разрезам). Далее модель нагревалась в термостате до температуры "замораживания" деформаций (120 °С) и выдерживалась в течение четырех часов. Материал модели становился резиноподобным, и в этом состоянии с помощью специального резца с лезвием из быстрорежущей стали по шаблону осуществлялись разрезы. Далее приспособление (шаблон) снималось, и модель со сквозными трещинами помещалась в ёмкость с глицерином, предварительно нагретым до 120 °С. После выдержки в глицерине модель медленно охлаждалась до комнатной температуры по обычному температурному режиму "замораживания" деформаций. Контроль моделей в полярископе показал отсутствие остаточных напряжений у вершин трещин.

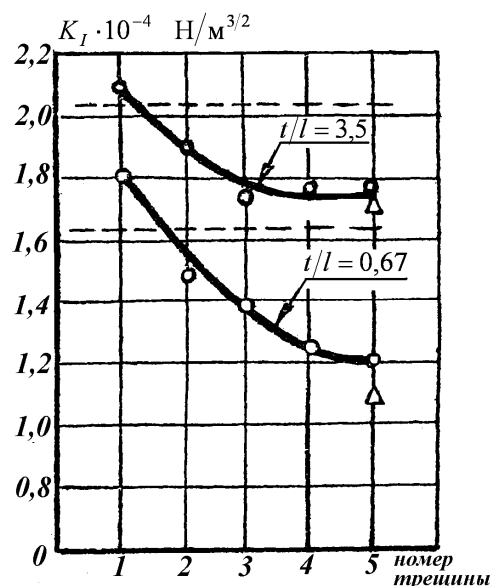


Рис. 4. Зависимость K_I от положения щели в пластине (○ – эксперимент; Δ – расчёт; --- – единичная щель)

Модели представляли собой полосы шириной 400 мм и толщиной 4...5 мм, ослабленные системой девяти сквозных поперечных трещин (рис. 2).

Вопросам определения КИН K_I методом фотоупругости, а также разделения K_I и K_{II} посвящено большое количество исследований. В работах (Зубарев и др., 2009; Корихин, 2005) дан подробный сравнительный анализ подавляющего большинства существующих методик. В нашей работе определяли КИН K_I по методике Ruis C., как наиболее простой и отвечающей условиям решаемой задачи.

4. Результаты исследования

Были получены значения K_I около каждой трещины (рис. 4).

Также было получено распределение напряжений вдоль оси, совпадающей с берегом средней трещины. В модели с "частой" системой трещин ($t/l = 0,67$) у крайних трещин имел место не только отрыв, но и сдвиг. Разделение КИН осуществлялось по методике Грилицкого Д.В.

5. Заключение

Результаты исследования показали удовлетворительное согласование экспериментальных данных с решением (Поляхов, Поляхов, 1981), а также применимость формул для неограниченной плоскости к пластинам конечной ширины, если длина трещин не превышает 1/3 ширины пластины.

Литература

- Зубарев Ю.М., Корихин Н.В., Титов В.Б. и др. Моделирование и решение некоторых прикладных задач механики разрушения с использованием метода фотоупругости. СПб., изд-во Политехн. ун-та, 288 с., 2009.
- Корихин Н.В. Определение коэффициентов интенсивности напряжений при решении прикладных задач механики разрушения методом фотоупругости. Энергомашиностроение, № 4/2005 – № 1/2006.
- Кошеленко А.С., Поздняк Г.Г. Теоретические основы и практика фотомеханики в машиностроении. М., Издательский дом "Граница", 296 с., 2004.
- Пестриков В.М., Морозов Е.М. Механика разрушения твёрдых тел. Курс лекций. СПб., Профессия, 320 с., 2002.
- Поляхов Н.Н. (мл.), Поляхов Н.Н. Растяжение плоскости с решёткой разрезов без выноса. Вестник ЛГУ, № 7, вып. 2, с. 85-90, 1981.
- Титов В.Б., Эйгенсон С.Н. Способ нанесения дефектов в виде трещин на оптически чувствительные материалы. Мат. VIII Всесоюзной конф. по методу фотоупругости, Таллин, т. I, с. 198, 1979.