

Цифровая обработка результатов оптоэлектронных измерений (метод фотоупругости): приложения к задачам механики разрушения (многопараметрический анализ поля напряжений у вершины трещины)

В.С. Долгих^а, Л.В. Степанова^а, В.А. Туркова^а

^а Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 443086, Московское шоссе, 34, Самара, Россия

Аннотация

Целью настоящего исследования является многопараметрический асимптотический анализ поля напряжений в окрестности вершины трещины в линейно упругом материале и построение полного асимптотического разложения М. Вильямса в окрестности вершины трещины. В ходе работы была поставлена серия экспериментов на образцах с трещинами и надрезами. Подготовлен комплекс программ, позволяющий произвести необходимые расчеты. Вычислены коэффициенты полного асимптотического разложения М. Вильямса, проведено сравнение результатов экспериментов с имеющимися аналитическими решениями.

Ключевые слова: асимптотическое разложение М. Вильямса поля напряжений у вершины трещины; коэффициент интенсивности напряжений; Т-напряжения, высшие приближения; линейно упругие материалы

1. Введение

Одной из наиболее актуальных задач механики разрушения в настоящее время является поиск и анализ влияния слагаемых высоких порядков на асимптотическое представление поля напряжений в окрестности вершины трещины (надреза) [1-13]. В 1957 г. М. Вильямсом было впервые предложено многопараметрическое описание поля напряжений в окрестности вершины трещины [2]. С этого времени решение, предложенное М. Вильямсом для задач линейной механики разрушения, стало классическим, но, как показали исследования в этой области [3,4] чаще всего в инженерных приложениях использовался только первый член полного асимптотического разложения М. Вильямса поля напряжений в окрестности вершины трещины, который получил название коэффициента интенсивности напряжений. В последние годы на основе проведенных теоретических исследований [3,4] и экспериментов, а так же математического и компьютерного моделирования, сложилось четкое понимание необходимости удержания в полном асимптотическом разложении слагаемых более высокого порядка. В работе [5] были собраны некоторые исследования, посвященные оценке Т-напряжений, и их влияния на решение М. Вильямса в окрестности вершины трещины. В статье описаны некоторые аспекты влияния Т-напряжений на область пластического течения, теоретическое реконструирование картины изохроматических полос, а так же прогнозирование траектории распространения трещины. Что же касается нахождения самих Т-напряжений, то авторы статьи приводят конечно-элементный, экспериментальный и аналитический методы нахождения. В статье дан обзор некоторых проведенных исследований, и показан обоснованный вывод: для точного и надежного предсказания направления роста трещины в решении М. Вильямса недостаточно не только коэффициентов интенсивности напряжений, но даже и Т-напряжения. Отсюда следует, что для точного и достоверного прогноза в решении М. Вильямса необходимо удержание не только Т-напряжения, но и слагаемых высших порядков. В [12] авторы показали, что большому количеству инженерных приложений требуется как можно более точный анализ полей напряжений в окрестности вершины трещины, что в свою очередь показывает, что нельзя пренебрегать слагаемыми высших порядков в решении М. Вильямса. В наше время ситуация не изменилась, и по-прежнему остается важным вопрос, сколько слагаемых известного разложения М. Вильямса [2] необходимо использовать для получения наивысшей точности расчетов.

Следует отметить, что в настоящее время особое внимание уделяется цифровой обработке изображений, получаемых в рамках метода фотоупругости (например, [10,11]). Этим обстоятельством и обусловлена мотивация настоящей работы. В статье рассматривается обработка изохроматической картины полос с целью вычисления коэффициентов высших приближений в полном асимптотическом разложении М. Вильямса поля напряжений у вершины трещины.

2. Эксперимент (метод фотоупругости)

На проекционно-поляризационной установке ППУ-7, показанной на рис. 1, был проведен целый ряд экспериментов на образцах с дефектами и трещинами. Были получены картины интерференционных полос (картины изохроматических полос) для тел различной конфигурации. Результаты этих экспериментов можно видеть на рис. 2. На

рис.2 показаны картины изохроматических полос в пластине с двумя коллинеарными трещинами одинаковой длины для различных значений приложенной нагрузки.

Явление фотоупругости является основой экспериментального метода, который позволяет исследовать поля напряжений и деформаций в опточувствительном материале[5]. Фотоупругость тесно связана с оптическими свойствами материала и влиянием на них напряжений и деформаций. В оптически активных прозрачных материалах при прохождении света возникают картины интерференционных полос, которые позволяют определить напряжения и деформации.

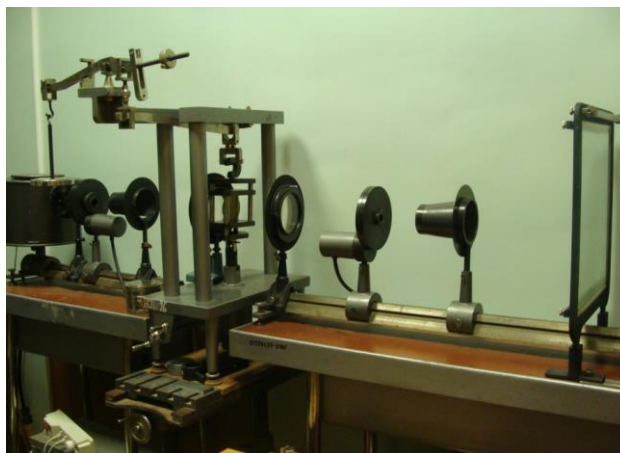


Рис. 1. Проекционно-поляризационная установка ППУ-7.

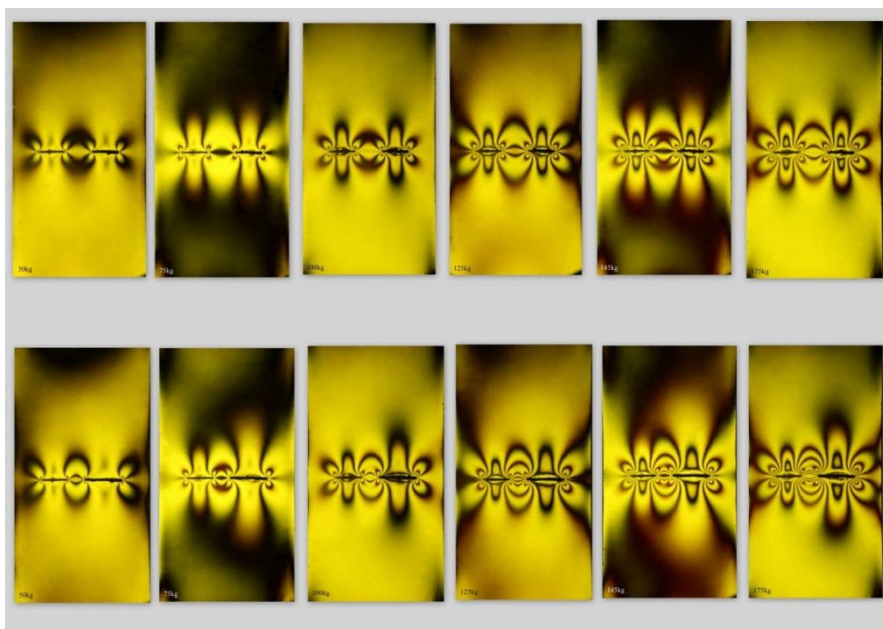


Рис. 2. Картины изохроматических полос в пластине с двумя коллинеарными трещинами при действии различных нагрузок.

Трудность расчетного определения полей деформаций и напряжений у вершины трещины привела к необходимости разработки и применения экспериментальных методов исследования деформаций и напряжений. В настоящее время достаточно хорошо разработаны и эффективно используются методы фотоупругих покрытий, сеток, муара, тензометрии, рентгеновского анализа, травления, дифракционных решеток, электронной микроскопии, фазовой интерференции, нанесения медных покрытий, голографии, позволяющие исследовать поля деформаций при статическом и циклическом нагружении [6]. Искусственное двойное лучепреломление используется для изучения деформаций в прозрачных телах. Такой метод исследования деформации, называемый методом фотоупругости, нашел широкое применение в различных областях науки и техники. Одним из важных применений фотоупругости является использование данного метода при исследовании распределения напряжений в оптических стеклах, возникающих при их изготовлении, а также при исследовании остаточных напряжений [7]. Также метод фотоупругости, иначе называемый поляризационно-оптическим методом, находит широкое применение в инженерной практике и в области научных исследований. Следует отметить, что применение метода фотоупругости не ограничивается плоскими моделями. Известны методы исследований на объемных моделях, в том числе вращающихся [8]. Известны также методы, используемые для исследования термонапряженных состояний. Сочетание методов фотоупругости и муара дает возможность решать весьма сложные задачи по исследованию напряжений в зонах концентрации напряжений в телах сложной формы, нагружаемых по сложным схемам [9].

3. Результаты исследований

В ходе обработки экспериментальных данных было написано несколько комплексов программ с использованием пакета "Waterloo Maple Release 17", которые позволили определить любое наперед заданное количество коэффициентов полного асимптотического разложения М.Вильямса. Первым комплексом стали программы, позволяющие рассчитать коэффициент интенсивности напряжений. Для первой изохроматической полосы выбранного образца под действием сосредоточенной силой 95 кг. были выбраны 50 экспериментальных точек, координаты которых были сначала переведены из глобальных декартовых с началом координат в крайней левой верхней точке выбранного образца в локальные декартовы с началом координат, совпадающим с координатами правой вершины правой трещины, а затем были переведены в полярные координаты, с центром в правой вершине правой трещины. В ходе работы была написана программа, которая подставляла координаты выбранных нами экспериментальных точек в оптико-механический закон (закон Вертгейма). Хотелось бы отметить, что в программе удалось реализовать произвольную выборку любого количества экспериментальных точек, таким образом, была предпринята попытка сделать программу более универсальной, не зависящей от точек, выбираемых вручную. В программе задается количество удерживаемых слагаемых в асимптотическом разложении М.Вильямса, количество которых обуславливает количество неизвестных масштабных (амплитудных) множителей полного асимптотического разложения М.Вильямса. Зная количество неизвестных, мы автоматически знаем необходимое количество уравнений. Программа формирует эти уравнения, и затем объединяет их в систему. Заметим, что уравнения в системе будут нелинейными, что значительно затруднит точное определение необходимых нам коэффициентов полного асимптотического разложения М.Вильямса. Для решения этой проблемы в программе происходит процесс линеаризации системы, и последующее ее решение с помощью итерационного алгоритма. Причем количество итераций зависит от разницы предыдущего и последующего значения коэффициента. Итерации продолжают до тех пор, пока эта разница не достигнет достаточно малого значения. Показано, что этот алгоритм быстро сходится (достаточно 9-10 итераций). В качестве начального приближения использовалось теоретическое решение задачи о смешанном нагружении бесконечной плоскости с двумя коллинеарными трещинами[4]. В результате работы программы было получено необходимое нам количество коэффициентов полного асимптотического разложения поля напряжений в окрестности вершины трещины М.Вильямса, что показано таблице 1.

Таблица 1. Значения масштабных множителей полного асимптотического разложения М.Вильямса поля напряжений у вершины трещины

Начальные приближения	18.192	-8.636	8.475	-2.085
Решение системы	27.067	-27.580	36.448	-6.367
1-ый итерационный шаг	22.217	-17.126	21.440	-2.852
5-ый итерационный шаг	19.3610515	-14.1150358	14.3460616	-1.0191336
7-ой итерационный шаг	19.3610441	-14.1150387	14.3460620	-1.0191328
10-ый итерационный шаг	19.3610414	-14.1150396	14.3460616	-1.0191324
15-ый итерационный шаг	19.3610487	-14.1150367	14.3460610	-1.0191332

В ходе работы так же были построены теоретически реконструированные линии равных значений разности главных напряжений, и показано, что с увеличением количества масштабных (амплитудных) множителей от одного до пяти, теоретически реконструированные линии точнее повторяют картину, полученную в ходе обработки эксперимента.

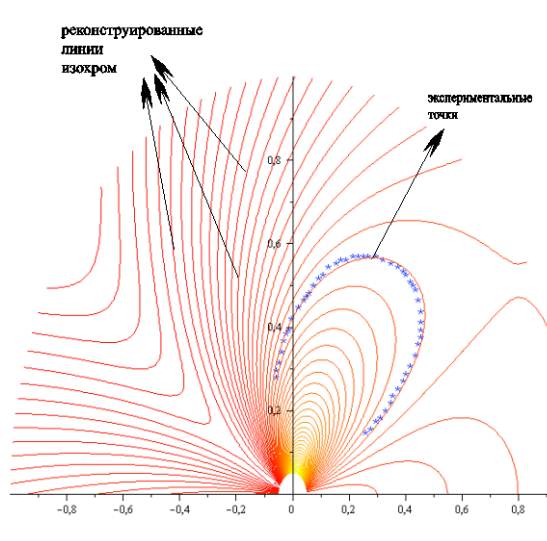


Рис.5. Теоретически реконструированные линии изохром при пятичленном разложении поля напряжений в окрестности правой вершины правой трещины.

4. Заключение

С помощью многопараметрического анализа поля напряжений, основанного на поляриционно-оптических методах механики деформируемого твердого тела (методе фотоупругости), в данной статье была проведена цифровая обработка результатов оптоэлектронных измерений, выполненных на серии образцов с трещинами и надрезами. Были рассмотрены разные классы образцов из оптически чувствительных материалов, в частности - образец с двумя коллинеарными трещинами в условиях нормального отрыва. Подготовлен комплекс программ, позволяющий рассчитать масштабные множители высших порядков полного асимптотического разложения М.Вильямса. С помощью основного закона фотоупругости вычислены коэффициенты полного асимптотического разложения М.Вильямса. Проведено сравнение результатов экспериментов с имеющимися аналитическими решениями, и показано, что результаты оптоэлектронных измерений и их обработки хорошо согласуются с аналитическими решениями.

Литература

- [1] Voyiadjis, G.Z. Handbook of Damage Mechanics: Nano to Macro Scale for Materials and Structures/ G.Z. Voyiadjis. – Berlin: Springer, 2015. – 1577 p.
- [2] Williams, M.L. On the stress distribution at the base of a stationary crack/ M.L. Williams// Journal of Applied Mechanics. – 1957. – V. 24. – P.109-114.
- [3] Игонин, С.А. Асимптотика полей напряжений и сплошности у вершины усталостной трещины в поврежденной среде в условиях плоского напряженного состояния/ С.А. Игонин, Л.В. Степанова// Вестник Самарского государственного университета. – 2013. – №9-2(110). – С. 97-108
- [4] Степанова, Л.В. Полное асимптотическое разложение М.Уильямса у вершин двух коллинеарных трещин конечной длины в бесконечной пластине/ Л.В. Степанова, П.С. Росляков// Пермь: Вестник ПНИПУ. Механика. – 2015. – № 4. – С. 188-225
- [5] Gupta, M. A review of T-stress and its effects in fracture/ M. Gupta, R.C. Alderliesten, R. Benedictus// Engineering Fracture Mechanics. – 2015. – V.134. – P.218-241
- [6] Экспериментальная механика. Книга 1. Под редакцией Кобаяси А. – М.: Мир, 1990. – 615 с.
- [7] Трощенко, В.Т. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении/ В.Т. Трощенко, В.В. Покровский, А.В. Прокопенко. – Киев: Наукова думка, 1987. – 256 с.
- [8] Годжаев, Н.М. Оптика. Учебное пособие для вузов/ Н.М. Годжаев. – М.: Высшая школа, 1977. – 432 с.
- [9] Третьяченко, Г.Н. Моделирование при изучении прочности конструкций/ Г.Н. Третьяченко. – Киев: Наукова думка, 1979. – 232 с.
- [10] Alsiya, S. Image Processing Algorith for Fringe Analysis in Phototelasticity/ S. Alsiya, C. Jeya Leksmi, B.P. Jishna Priya, R.C. Mehta// Scholars Journal of Engineering and Technology. – 2016. – V. 4(7). – P. 325-328.
- [11] Surendra, K.V.N. Digital Image Analysis around isotropic points for photoelastic pattern recognition/ K.V.N., Surendra, K.R.Y. Simha// Optic Engineering. – 2015. – V. 54(8).
- [12] Berto, F. On higher order terms in the crack tip stress field/F. Berto, P. Lazzarin// International Journal of Fracture. – 2010. – V.161. – P. 221-226.
- [13] Stepanova, L.V. Multi-parameter description of the crack-tip stress field: analytic determination of coefficients of crack-tip stress expansions in the vicinity of the crack tips of two finite cracks in an infinite plane medium/ L.V. Stepanova, P.S. Roslyakov// International Journal of Solids and Structures. – 2016. – № 100-101. – P. 11-28.