

УДК 537.1+535.4

**МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ  
УПРУГОЙ АНИЗОТРОПИИ МАТЕРИАЛОВ**

© 2011 г.

*И.Н. Одинцев*

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва

ino54@mail.ru

*Поступила в редакцию 15.06.2011*

Рассмотрена нетрадиционная экспериментально-расчетная методика определения полного набора деформационных констант упругости анизотропных (композитных) материалов. Исходной информацией являются распределения прогибов в круглой пластине-образце при различных видах изгибного нагружения с вариацией точек приложения контурных нагрузок. Регистрация полей прогибов осуществляется с использованием электронной цифровой спекл-интерферометрии. Требуемые величины вычисляются в ходе решения обратной задачи методом последовательных приближений и моделированием с применением метода конечных элементов (МКЭ). Приведены результаты практического использования предложенного подхода.

*Ключевые слова:* анизотропные материалы, листовые композиты, деформационные константы упругости, электронная цифровая спекл-интерферометрия, обратная задача, метод последовательных приближений, МКЭ.

Определение параметров упругости анизотропных материалов в традиционной постановке базируется на испытании группы однотипных образцов, различным образом ориентированных относительно главных осей анизотропии. Очевидно, что возможная неоднородность свойств материала приводит к непредсказуемым погрешностям и к неадекватности получаемых результатов. Альтернативный подход может заключаться в использовании единственного образца специального вида, несущего информацию о фактических жесткостных характеристиках в конкретной точке (малой области) заготовки. При этом необходимый совокупный деформационный отклик для последующего расчета упругих констант формируется в процессе испытаний образца в различных схемах нагружения. Интерпретация экспериментальных данных при независимом исследовании групп таких образцов, изготовленных из различных частей заготовки, позволяет устанавливать характеристики случайной вариации свойств реального материала.

Для исследования деформационных свойств в заданной плоскости упругой симметрии (например, в плоскости листовых композитов) используется образец в виде круглой пластины-диска. Нагрузки в виде двух пар разнонаправленных сосредоточенных усилий или пары изгибающих моментов прикладываются к контурным точкам, а регистрируемыми в эксперименте данными являются величины и направления главных кривизн

$\kappa_i$  в центральной области квазиоднородного изгиба. Кроме того, путем поворота образца в своей плоскости при его испытании по каждой из приведенных схем варьируется угол  $\theta$  между неподвижными осями в системе нагрузок и осями анизотропии (ортотропии) материала. Если направления последних неизвестны априори, то они достоверно устанавливаются по достижению экстремальных значений кривизн при соответствующих ориентациях образца. В дальнейшем в качестве совокупного деформационного отклика рассматриваются значения  $\kappa_i$ , зарегистрированные при нагружении образца вдоль установленных главных осей анизотропии и под углом  $45^\circ$  к ним.

Эффективный инструмент для регистрации деформационных откликов представляет собой высокоточный бесконтактный метод цифровой (корреляционной) спекл-интерферометрии [1]. С его помощью осуществляется визуализация полей нормальных перемещений (прогибов) в виде систем полос на изображении исследуемого тела, наблюдаемом на мониторе компьютера, сопряженного с цифровой видеокамерой. Цена полосы на интерферограммах составляет половину длины волны лазерного излучения, используемого для освещения объекта (то есть имеет порядок десятых долей микрометра). Значения кривизн деформированной поверхности пластины могут быть рассчитаны двойным численным дифференцированием дискретной функции прогибов, оцифрованной в точках на темных полосах интерфе-

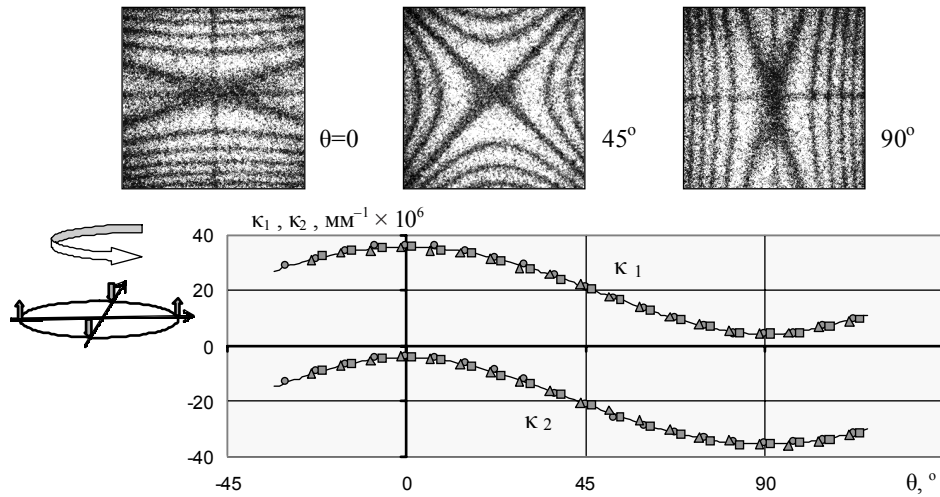


Рис. 1. Результаты испытаний образца по схеме четырехточечного изгиба силами

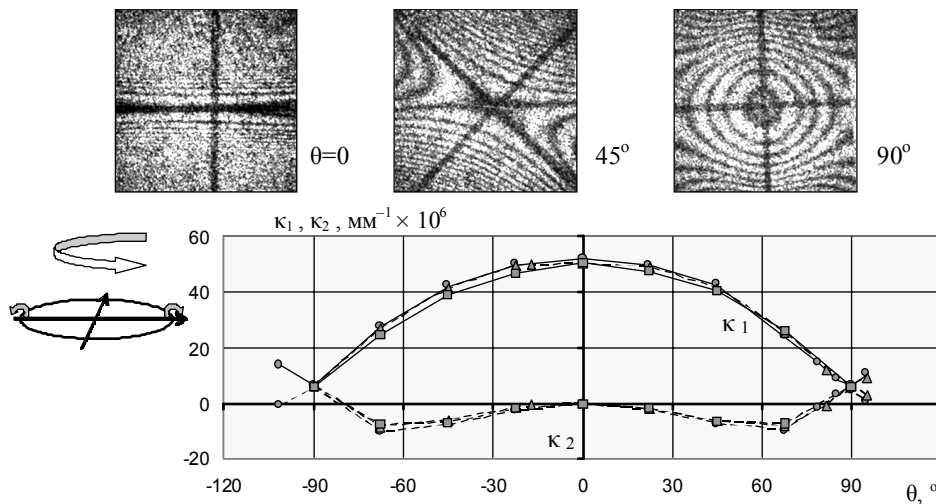


Рис. 2. Результаты испытаний образца по схеме двухточечного изгиба моментами

×

программы. Вместе с тем, более продуктивный подход основан на компенсационном принципе измерений непосредственно дифференциальных характеристик изгиба [1].

Последующий расширенный анализ экспериментальных данных, как решение обратной задачи механики, основан на принимаемой априори модели анизотропного тела и имеет целью расчет числовых значений параметров этой модели - деформационных констант материала. Интерпретационный алгоритм строится по принципу итерационного уточнения.

Пусть из каких-либо предпосылок выбрано начальное приближение для свойств материала. Тогда на каждом  $n$ -м шаге процедуры, исходя из значений деформационных констант, полученных на предыдущем шаге, с помощью метода конечных элементов можно вычислить внутренние силовые факторы - изгибающие моменты в центре диска для каждой из схем его нагружения и ори-

ентации. После их подстановки в общие соотношения для изгиба анизотропной пластины, включающие экспериментальные значения кривизн, выполняется решение переопределенной системы уравнений относительно констант упругости как приближение  $n$ -го шага. Выполнение процедуры завершается, если очередное уточнение свойств не является значимым.

Предложенный новый метод испытаний апробировался в ряде тестовых задач. В качестве иллюстрации на рис. 1 и 2 показаны типичные спекл-интерферограммы, а также экспериментальные зависимости главных кривизн в центральной точке образца из углепластика с нетрадиционной укладкой монослоев ( $\varnothing 45$  мм, толщина 1.8 мм) от угла его ориентации в различных схемах нагружения [2]. Обработка экспериментальных данных в рамках модели ортотропного тела дала следующие значения технических констант упругости:

$$E_1 = 1.01 \cdot 10^4 \text{ МПа}; E_2 = 1.62 \cdot 10^5 \text{ МПа}; \\ \nu_{12} = 0.028; G_{12} = 7.48 \cdot 10^3 \text{ МПа}.$$

Рассмотренный принцип испытаний, очевидно, может быть распространен и на другие схемы нагружений.

#### Список литературы

1. Одинцев И.Н., Апальков А.А. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2001. №12. С. 44–48.
2. Одинцев И.Н. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2011. №2. (В печати).

## THE TECHNIQUE FOR STUDYING MATERIAL ELASTIC ANISOTROPY

*I.N. Odintsev*

The paper considers a novel numerically-experimental method for determining a complete set of elastic deformation characteristics of anisotropic (composite) materials. The initial data consisted of distributions of deflections in a circular plate specimen under various types of bending and a variation of contour loading points. Registration of deflection fields is done using digital speckle pattern interferometry. The values of interest are calculated during the solution process of the reverse problem by the step-by-step method of successive approximations using FEM-simulation. Results of practical applications of the approach are given.

*Keywords:* anisotropic materials, laminate composite, elastic deformation properties, digital speckle pattern interferometry, reverse problem, step-by-step method of successive approximations, FEM.