

05;12

## **Исследование механических напряжений в деформированных твердых телах на моделях из электропроводящих полимерных композиций**

© Дж.Н. Анели, Д.И. Гвенцадзе, М.М. Болоташвили

Институт механики машин АН Грузии, Тбилиси

Поступило в Редакцию 21 декабря 1998 г.

Предложен метод измерения механических напряжений в объеме деталей, упрощающий известные и не требующий существенного разрушения испытуемого образца.

Оценка напряженного состояния элементов строительных конструкций и деталей машин сводится в основном к определению деформаций при нагружении [1]. Теоретические расчеты обычно проводят с применением методов сопротивления материалов и теории упругости. Однако на практике, особенно в случае деталей машин сложной конструкции, при достаточно сложной схеме внешней нагрузки возникают трудности математического характера и решение оказывается или слишком громоздким, или совсем невозможным из-за отсутствия ряда экспериментальных данных. В этих случаях наряду с теоретическими методами успешно используются экспериментальные методы, которые позволяют достигнуть цели быстрее и точнее, чем аналитические, а также проверить точность и правильность приближенных расчетных методов. Среди экспериментальных расчетных методов наиболее часто применяют метод фотоупругости элементов, или поляризационно-оптический метод [2]. Этот метод основывается на особенностях некоторых прозрачных материалов изменять свои оптические свойства в результате их деформации при нагружении. Несмотря на совершенство и универсальность этого метода, он характеризуется рядом неточностей. Они главным образом связаны с особенностями механических свойств полимерных материалов. Так, в соответствии с методом фотоупругости при изучении напряженного состояния в объеме прозрачного полимерного твердого

тела, используемого в качестве модельного объекта, необходимо после снятия нагрузки данный материал разрезать на тонкие пластины, чтобы получить от каждого из них интерференционные картины в виде полос изоклин и изохром после просвечивания монохроматическим светом и провести их довольно не простой анализ при необходимости решения уравнений со многими параметрами. При этом допускают, что деформация и соответственно напряжение в образце остаются неизменными после снятия нагрузки. Это допущение обосновано тем, что напряжение "замораживается" в материале, нагруженном при повышенных температурах (ниже температуры плавления) с последующим охлаждением под нагрузкой до комнатной температуры. Однако следует учесть, что погрешности в оценке величины и распределения механического напряжения, очевидно, возникнут из-за распиловки на тонкие пластины испытываемого образца. Механические напряжения, возникшие при распиловке материала, будут накладываться на исследуемые напряжения. При этом погрешность будет тем больше, чем тоньше будут нарезаны пластины. Метод фотоупругости, исходя из выше сказанного, относится к методам разрушающего контроля, что в определенной мере снижает достоинство этого метода.

С целью упрощения методики измерения механических напряжений в объеме деталей различных конструкций и повышения корректности измерений нами предложен метод измерения механических напряжений в объеме модельных твердых тел практически без существенного разрушения испытываемого образца. Метод основывается на зависимости электрического сопротивления электропроводящей полимерной композиции от приложенной механической нагрузки.

Рассмотрим более подробно предложенный метод. Известно [3], что удельное электросопротивление полимерной композиции, состоящей из полимерного связующего и электропроводящего наполнителя, лимитируется средним расстоянием между частицами наполнителя, а именно с ростом этого расстояния электросопротивление композиций возрастает, а с уменьшением его уменьшается. Согласно данным экспериментов в области упругих деформаций логарифм электросопротивления материала линейно увеличивается при деформации растяжения и уменьшается при деформации сжатия [4]. Такая зависимость обусловлена механизмом проводимости электропроводящей композиции [5]. На практике зачастую реализуются ситуации, когда в конструкциях отдельные участки подвергаются неравномерной нагрузке (например, на зубьях зубчатых пе-

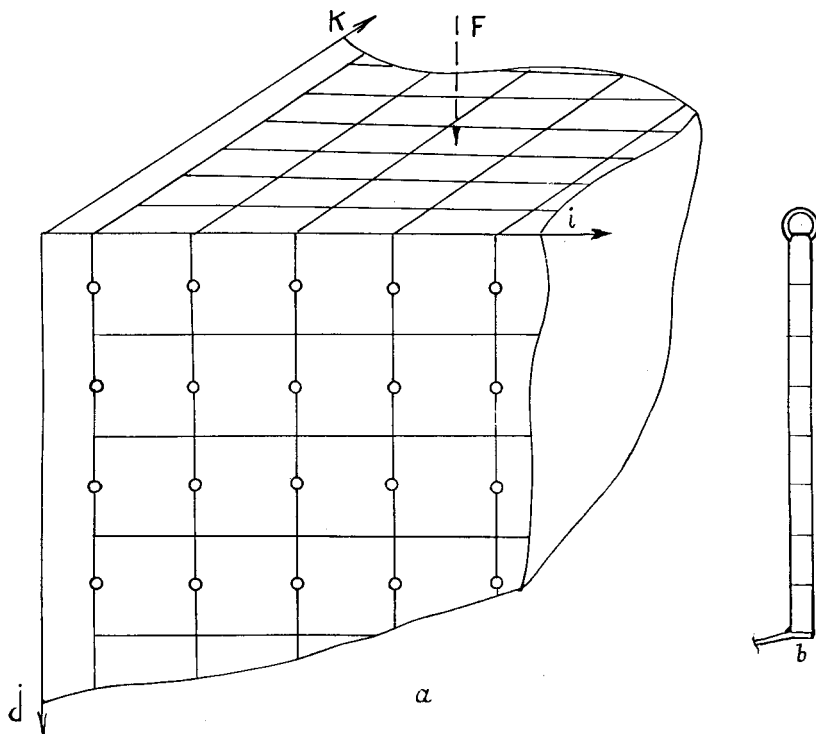
редач). Анизотропия нагружения вызывает анизотропию деформации и соответственно напряжения в объеме образца. А если образец выполнен из электропроводящей композиции, то в данном случае микроструктура отдельных участков будет зависеть от локальной деформации и соответственно электросопротивление у отдельных участков со своей стороны будет отражать степень напряженного состояния этих участков. Таким образом, путем измерения локальных сопротивлений можно получить схему распределения напряжений в объеме образца.

Описанный способ оценки распределения напряжений в объеме образца твердого тела лежит в основе экспериментальной методики.

Прежде всего получают необходимый материал — электропроводящую полимерную композицию на основе полимерного связующего с высокими физико-механическими показателями и электропроводящего наполнителя (сажа, графит, металлические порошки) по технологии, обеспечивающей необходимые механические и электропроводящие свойства образцов. При этом больше внимания обращается на получение материала с наиболее равномерным распределением частиц наполнителя в матрице полимера. Форму и габариты модельного образца выбирают в зависимости от поставленной задачи. В нашем эксперименте был применен образец в виде параллелепипеда с размерами  $80 \times 50 \times 30$  (mm). На двух смежных плоскостях параллелепипеда наносят квадратную сетку так, как показано на рис. 1, *a*. При этом с увеличением плотности узлов нанесенной сетки увеличивается возможность увеличения точности измерения распределения напряжений в образце при нагрузке, если сетку проводят между соседними узлами сетки.

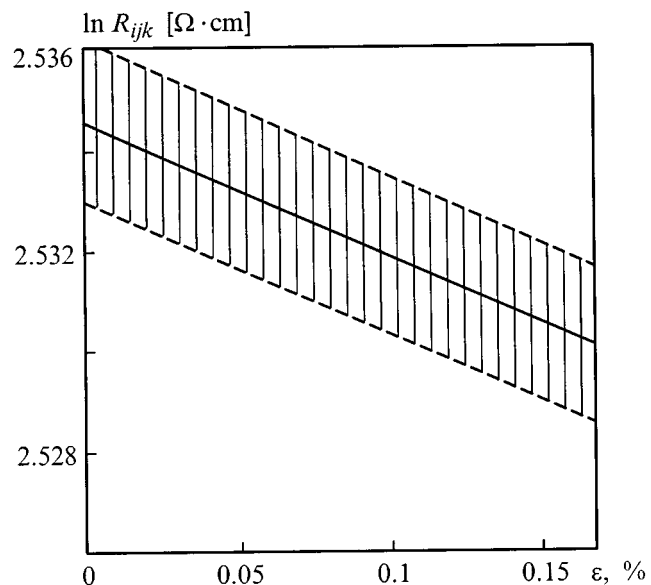
Следующим шагом в приготовлении образца является получение тонких (1–1.5 mm) отверстий в образце перпендикулярно к одному из торцов параллелепипеда с нанесенной сеткой между узлами этой сетки (рис. 1, *a*). Через отверстия вводят металлические (стальные) электроды-зонды для измерения электросопротивления между соседними отверстиями на определенной глубине образца. Зонды, за исключением концов, покрыты изоляционным лаком (рис. 1, *b*). К одному концу зонда припаяна контактная петля, изготовленная из тонкой ( $\varnothing 0.2$ – $0.3$  mm) бронзовой проволоки, а к другому — токоотводящий монтажный провод.

Опыт по измерению локальных напряжений проводят следующим образом: электроды-зонды вводят в соседние отверстия до одинаковой глубины. Имеющиеся на концах электродов гибкие петли, диаметр



**Рис. 1.** Модельный образец из электропроводящего полимерного композита с нанесенной сеткой и отверстиями (а) и электроды-зонды (b).

которых немного превышает отверстия, обеспечивают надежный контакт с телом образца на выбранной глубине. Другие концы электродов подсоединяют к чувствительному тензомеру (нами был использован измеритель статических деформаций типа ИСД-3). В данном случае роль тензодатчика (тензорезистора) выполняет сопротивление участка — элементарного куба с ребром, равным стороне элементарного квадрата сетки. Перемещая зонды на равные отрезки в глубь образца, измеряют величину локального сопротивления  $R_{ijk}$  и при этом, во избежание краевого эффекта, измерения локального сопротивления следует проводить между отверстиями, расположенными не ближе 4.5 mm



**Рис. 2.** Зависимость электросопротивления элементарных кубов от деформации для композиции, полученной на основе поликарбоната с графитовым (30 mass.%) наполнителем. Заштрихованное поле указывает на дисперсию этих зависимостей, вызванную расхождением исходных значений электросопротивления отдельных элементарных кубов.

от краев образца. Замеры производят как до, так и при приложении нагрузки. Необходимость измерения локального сопротивления для каждого элементарного куба до приложения нагрузки вызвана тем, что получение электропроводящей композиции с исключительно высокой электрической однородностью (например, по электросопротивлению) практически невозможно (т.е. исходные значения сопротивления этих кубов отличаются друг от друга не некоторую величину), а изменения сопротивления при малых деформациях могут оказаться в пределах разброса исходных значений сопротивления элементарных кубов. Однако дело упрощается тем, что зависимости логарифма электросопротивления  $R_{ijk}$  от деформации  $\varepsilon_{ijk}$ , снятые для любого элементарного куба, являются прямолинейными с одинаковым углом наклона к осям

прямоугольных координат (рис. 2) и удовлетворительно описываются уравнением

$$I_n R_{ijk} = I_n R_{ijk} \varepsilon_{ijk}, \quad (1)$$

где  $R_{ijk}$  — исходное значение сопротивления элементарного куба.

Воспользуемся известной зависимостью механического напряжения твердого тела от упругой деформации (формула Гука), которая в нашем случае примет вид

$$\sigma_{ijk} = E \varepsilon_{ijk}, \quad (2)$$

где  $E$  — релаксационный модуль Юнга испытываемого материала.

Комбинированием формул (1) и (2) получим выражение (3), по которому можно проводить расчет локальных напряжений

$$\sigma_{ijk} = E \ln(R_{ijk}^0 / R_{ijk}). \quad (3)$$

Применение предложенного метода расчета локальных напряжений путем измерения локальных сопротивлений модели проиллюстрировано ниже на примере упругой деформации образца в виде параллелепипеда, полученного из композиционного материала на основе поликарбоната и графита.

Данный материал был получен следующим путем. Смесь порошков поликарбоната марки дифлон с графитом марки ГМ-Г (30 mass.%) нагревали в пресс-форме под давлением 10 МПа при температуре 250°C в течение 10 min с последующим охлаждением без давления до 200°C, а затем до комнатной температуры под давлением 100 МПа [5,6].

Значения локальных напряжений (в МПа) для слоя  $K = 4$  при координатах точки ( $d = 3$  mm) нагрузки ( $F = 1$  kgf) 4; 0; 4

$j$	$i$							
	0.11	0.26	0.34	0.92	0.90	0.34	0.25	0.08
0.13	0.27	0.42	0.56	0.53	0.39	0.25	0.10	
0.12	0.18	0.38	0.35	0.32	0.36	0.17	0.08	
0.10	0.15	0.16	0.24	0.21	0.16	0.15	0.07	
0.06	0.12	0.14	0.15	0.13	0.14	0.11	0.04	
0.02	0.06	0.09	0.08	0.06	0.07	0.04	0.01	
0.01	0.02	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.01	
0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00	

Численные значения локальных напряжений, рассчитанные по формуле (3) в случае параллелепипеда с размерами  $80 \times 50 \times 30$  (mm), при нагрузке 0.1 МПа приведены в таблице.

В соответствии с данными таблицы, как и следовало ожидать, наибольшие механические напряжения в модели возникают в областях вблизи точки приложения нагрузки и постепенно уменьшаются по мере удаления от этой точки в радиальных направлениях. Характер распределения локальных напряжений в нагруженной модели хорошо согласуется с данными, полученными другими методами [1,2].

Следует отметить, что данный метод позволит изучить кинетику изменения локальных напряжений после разгрузки, а также в условиях ее нагрузки в динамическом режиме.

## **Список литературы**

- [1] *Почтовик Г.Я., Злочевский А.Б.* Методы и средства испытания строительных конструкций. М.: Высшая школа, 1973.
- [2] *Дюрелли А., Райли У.* Введение в фотомеханику (поляризационно-оптический метод). М.: Мир, 1970.
- [3] *Гуль В.Е., Шенфиль Л.З.* Электропроводящие полимерные композиции. М.: Химия, 1984.
- [4] *Анели Дж.Н., Топчишвили Г.М.* // Каучук и резина. 1987. № 9. С. 10–11.
- [5] *Aneli J.N., Khananashvili L.M., Zaikov G.E.* Structuring and Conductivity of Polymer Composites. Nova Sci. Publ. New York, 1998.
- [6] *Анели Дж.Р., Гвенцадзе Д.И., Мамасахлисов И.Г., Каверкин И.П.* // Пластические массы. 1983. № 3. С. 31–32.