

## Определение модуля сдвига резиноподобных материалов динамическим методом

Изосимова Мария Юрьевна<sup>1</sup>, Прохорова Екатерина Вячеславовна<sup>2</sup>

<sup>1</sup> аспирант, <sup>2</sup> студент

Московский Государственный Университет им. М.В.Ломоносова

физический факультет, Москва, Россия

<sup>1</sup> maria.izosimova@mail.ru

Известно, что при поражении биологическая ткань меняет свои физические свойства, в том числе и упругие. Упругость пораженных мягких биологических тканей значительно отличается от упругости здоровой ткани. Особенно сильно возрастает (в несколько раз) величина сдвигового модуля [1]. Поэтому разработка методов, для определения модуля сдвига в биологических тканях является актуальной задачей медицинской диагностики. В работе предложена методика определения модуля сдвига на основе регистрации сдвиговых колебаниях образца методами доплеровской виброметрии. В качестве образцов использовались так называемые фантомы биологических тканей, изготовленные из резиноподобного полимерного материала, обладающего свойствами мягких тканей. Образцы имели форму прямоугольного параллелепипеда.

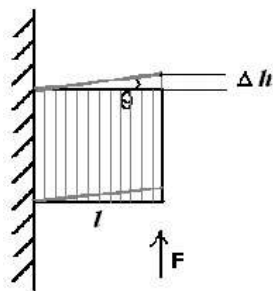


рис. 1

Если одна из граней образца жестко закрепляется, а к другой прикладывается сила  $F$  так, чтобы эта сила действовала перпендикулярно нижней и верхней граням параллелепипеда. В соответствии с теорией упругих свойств твердых тел, в образце возникнет сдвиг, то есть деформация, при которой все плоские слои твердого тела, параллельные крайней закрепленной грани (плоскости сдвига), не искривляясь и не изменяясь в размерах, смещаются параллельно друг другу (рис.1) [2].

Мерой деформации  $\frac{\Delta h}{l}$  является угол сдвига  $\theta$  (относительный сдвиг), выраженный в радианах. Для малых деформаций

$$\theta \approx \operatorname{tg} \theta = \frac{\Delta h}{l}, \quad (1)$$

где  $\Delta h$  – абсолютный сдвиг.

По закону Гука, относительный сдвиг пропорционален касательному («скалывающему») напряжению, приложенному к боковой грани:

$$\sigma = \frac{F}{S} = \mu, \quad (2)$$

где  $S$  – площадь боковой грани,  $\mu$  - модуль сдвига, численно равный касательному напряжению, вызывающему относительный сдвиг, равный единице. Таким образом, зная силу, вызывающую сдвиг, и деформацию, можно рассчитать модуль сдвига.

Для экспериментов автоматизированная экспериментальная установка (рис. 2), основным измерительным прибором которой служит сканирующий лазерный доплеровский виброметр фирмы Polytec PSV-300, который позволял с большой точностью определять амплитуду смещений точек  $M$  и  $M'$  [3].

Для возбуждения сдвиговых деформаций в исследуемом образце использовался вибростол (VebRobotron-Messelektronik), сигнал на который подавался через усилитель мощности со встроенного в виброметр функционального генератора. Напряжение на вибраторе изменялось от 0,5 до 9В, частота подаваемого сигнала - от 2 Гц до 100Гц. Образец (1) в форме прямоугольного параллелепипеда одной боковой гранью жестко соединяется с вертикальной стенкой (2).

К противоположной грани прикреплена площадка (3), имеющая размеры, совпадающую с размерами грани. Для создания приложенной к образцу тангенциальной силы известной величины используется пружина (4) с известной жесткостью, соединяющая вибратор и площадку(3).

В этом случае сила, действующая на площадку, была равна:  $F = k\Delta x$ ,

(3)

где  $k$  – жесткость пружины,  $\Delta x$  – разность смещений точек  $M$  и  $M'$ .

Тогда согласно уравнениям (2-3) модуль сдвига равен при условии квазистатичности:

$$\mu = \frac{k\Delta x}{\omega} \quad (4)$$

С помощью сканирующего лазерного виброметра измеряются смещения поверхности образца в точке  $M$  и вибратора ( $M'$ ). Виброметр производит усреднение по 70 измерениям в каждой точке для каждого значения частоты. Затем амплитуда сигнала изменялась (увеличивалась), и все измерения проводились заново.

По результатам проведенных измерений для каждого значения частоты были построены нагрузочные кривые, по углу наклона которых

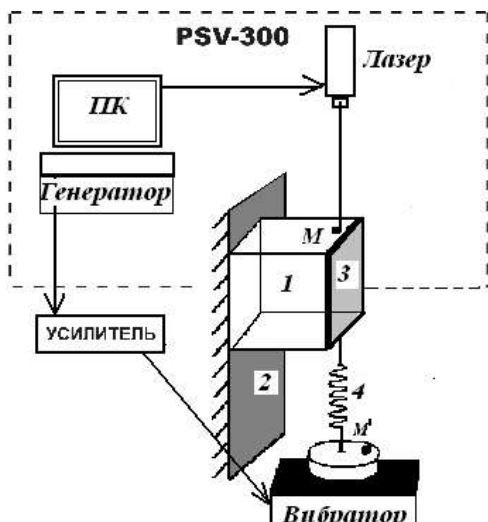


рис. 2

определялся модуль сдвига.

Первый исследуемый образец ( $37,5 \times 24,7 \times 45,8 \text{ мм}^3$ ) был просканирован на частотах 2Гц, 5Гц, 10Гц, 50Гц, 80Гц, 100Гц. Полученные в результате этих измерений

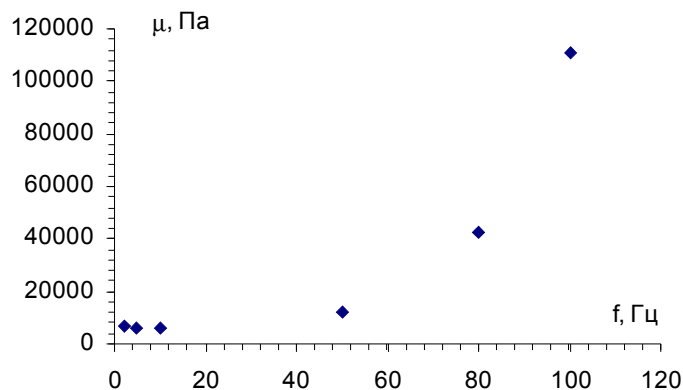


рис. 3

значения модуля сдвига, согласуются с литературными данными при частотах возбуждения ниже 10 Гц. На частотах выше 10Гц модуль сдвига имел аномально высокие значения (рис. 3). Это связано с тем, что на более высоких частотах условие квазистатичности нарушалось и использование уравнения (4) при расчетах не корректно.

Для уточнения значения модуля сдвига исследовался образец меньших размеров ( $15,2 \times 46,5 \times 30,8 \text{ мм}^3$ ), вследствие

чего на частотах ниже 10 Гц волна не формировалась. Образец сканировался на частотах 2-10Гц с шагом в 1 Гц. Определенный нами модуль сдвига имел значение  $8,9 \pm 0,2 \text{ кПа}$ , что соответствует литературным данным.

Работа была выполнена в Центре коллективного пользования физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова по нелинейной акустической диагностике и неразрушающему контролю при поддержке гранта Президента Российской Федерации № НШ-4449.2006.2 и грантов РФФИ № 05-02-16327-а и № 06-02-16658-а.

#### Литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., Курс теоретической физики: Теория упругости. Физматлит, 2003. С. 264
2. Андреев В.Г., Ведерников А.В., Генерация и детектирование сдвиговых волн в резиноподобной среде с помощью сфокусированного ультразвука, Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия, 2001. №1. с34-36.
3. Коробов А.И., Изосимова М.Ю., Прохорова Е.В. Исследование колебаний биологических тканей и их фантомов с модельными дефектами. Известия РАН. Серия физическая, 2006. Т. 70. № 12. С. 1830-1832.