

12

## Регистрация колебаний волокон методом измерения вариации электрического поля

© И.В. Симонов, А.А. Сиротин, И.М. Смирнов, А.В. Тянин

Институт проблем механики РАН, Москва

E-mail: simonov@ipmnet.ru

Поступило в Редакцию 23 ноября 2006 г.

Предложен способ определения характеристик тонких (заряженных) волокон путем измерения их поперечных колебаний методом регистрации электрического поля. Разработана соответствующая установка. Обнаружен эффект резкого замедления рассасывания нанесенного заряда в случае поврежденного волокна. На основе этого эффекта может быть развит новый метод неразрушающего контроля.

PACS: 46.40.Ff, 62.30.+d

Экспериментальное изучение колебаний тонких волокон и нитей во времени дает информацию о динамических и реологических параметрах микрообъектов. Предлагаемый метод измерения основан на регистрации изменений индукционной составляющей электрического поля при поперечных колебаниях предварительно заряженных волокон и обладает следующими преимуществами: является бесконтактным, позволяет просто избавиться от внешних помех, не требует сложного оборудования.

Основными элементами разработанной высокочувствительной экспериментальной установки, регистрирующей электрический сигнал от тел микроразмеров, являются: датчик электрического поля (антенна), нагружающее и регистрирующее устройства. Нагружающее устройство имеет два металлических захвата для закрепления волокна, один из которых неподвижен, а другой может перемещаться горизонтально при помощи штока. Датчик и захваты с целью экранирования от внешних электрических полей помещены в коробку из латунной рамки с размерами  $162 \times 89 \times 32$  mm и толщиной стенки 7 mm; коробка закрывается верхней и нижней алюминиевыми крышками толщиной 1 mm. Датчик

подключался к регистрирующему устройству либо через истоковый повторитель, обладающий очень большим входным сопротивлением, порядка сотен  $G\Omega$ , либо через осциллографические пробники, обладающие активным сопротивлением  $10 M\Omega$ , и входной емкостью  $15\text{--}35 pF$ . Это обеспечивало возможность изменения входного сопротивления и входной емкости для регистрации процессов длительностью от нескольких секунд (статические процессы рассасывания заряда на волокнах) до сотых долей микросекунды (динамические процессы). В качестве регистрирующего устройства использовался двухлучевой цифровой осциллограф LeCroy WaveSurfer 422 с полосой частот  $200 MHz$ . Чтобы уменьшить значительные высокочастотные помехи, полоса частот осциллографа ограничивалась величиной  $20 MHz$ . Истоковый повторитель, собранный на базе полевого транзистора КП305Д, находился в отдельном экране, который крепился к внешнему экрану установки. Полоса частот истокового повторителя с отрезком кабеля РК50 длиной  $0.8 m$  ограничена величиной около  $10 MHz$ . В качестве датчика электрического поля использовались: плоский датчик электрического поля размерами  $7 \times 6 mm$ , состоящий из тонких параллельных проводящих полосок, имеющий диэлектрическое покрытие и наклеенный на стеклянную пластину размерами  $18 \times 11 \times 2.5 mm$ , которая в свою очередь была наклеена на другую стеклянную пластину размерами  $49 \times 15 \times 2.5 mm$ , прикрепленную к нижней крышке внешнего экрана, а также штырь из медной проволоки диаметром  $2 mm$  и длиной  $10 mm$ . Они являются датчиками емкостного типа, реагируют только на изменения электрического поля, их собственная емкость составляла  $1\text{--}2 pF$  для штыря,  $30\text{--}60 pF$  для плоского датчика. Чем больше емкость датчика, тем большей чувствительностью он обладает, но даже со штыревого датчика сигналы регистрировались без использования предварительных усилителей. Образцы зажимались в захватах между диэлектрическими прокладками над датчиком на расстоянии несколько миллиметров от него. Запуск осциллографа осуществлялся передним фронтом регистрируемых сигналов. Подробное изложение результатов тестирования и отработки методики содержится в [1].

Опыты с возбуждением поперечных колебаний заряженных, натянутых между зажимами полимерных волокон (Japan fishing line, диаметров:  $d = 60, 80, 100 \mu m$  длиной  $l \approx 2 cm$ ) как струн, показали:

1. Колебания волокна не регистрируются без нанесения заряда.

2. Если на волокно предварительно нанести отрицательный (положительный) заряд эбонитовой палочкой (стеклянной палочкой), наэлектризованной трением о шерсть (шелк), то при начальном смещении центра волокна в направлении от датчика начальная фаза сигнала положительна (отрицательна).

3. Из осциллограмм с хорошей точностью определяется период колебания по первой форме  $T_1$ . При несимметричном возбуждении наблюдается наложение колебаний по следующим формам. Влияния величины и знака заряда на значение  $T_1$  не обнаружено. По теории упругих колебаний струны по четырем известным величинам из числа пяти:  $T_1$ , плотность, длина и диаметр волокна  $\rho$ ,  $l$  и  $d$ , сила натяжения  $P$ , можно определить четвертую.

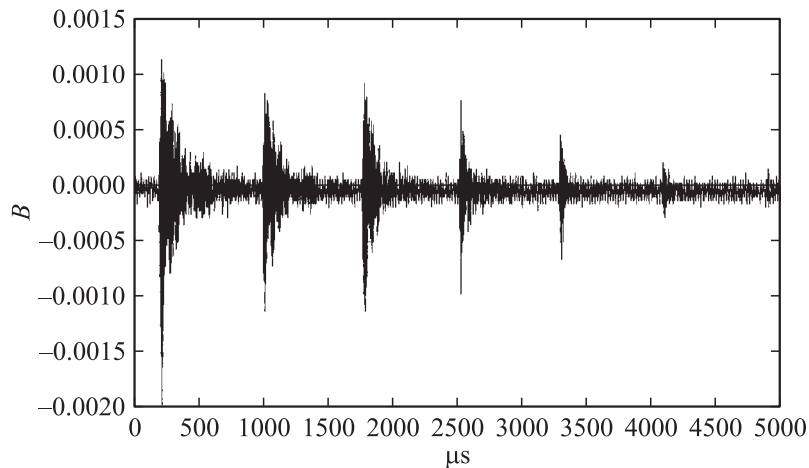
Проведены также опыты по поперечным колебаниям волокна из силикатного стекла марки ВМП с характеристиками: плотность  $2.58 \text{ g/cm}^3$ , модуль Юнга (по разным данным)  $70\text{--}95 \text{ GPa}$ , как упругой консольной балки (один конец закреплен, другой — свободен, длина  $l \approx 18, 30 \text{ mm}$ ). Колебания возбуждаются посредством удара отвертки по захвату приблизительно одинаковой силы с частотой  $\approx 1$  раз в секунду. Выяснено:

1. То же, что и п. 1, 2 в случае с полимерным волокном.

2. Опыты показали, что период колебаний  $T_1$  в пределах точности измерений (два знака) не зависит от величины и знака заряда и от приобретенной при колебаниях поврежденности. Это позволяет определять эффективный модуль Юнга при изгибе по теории колебаний упругой консоли по формуле

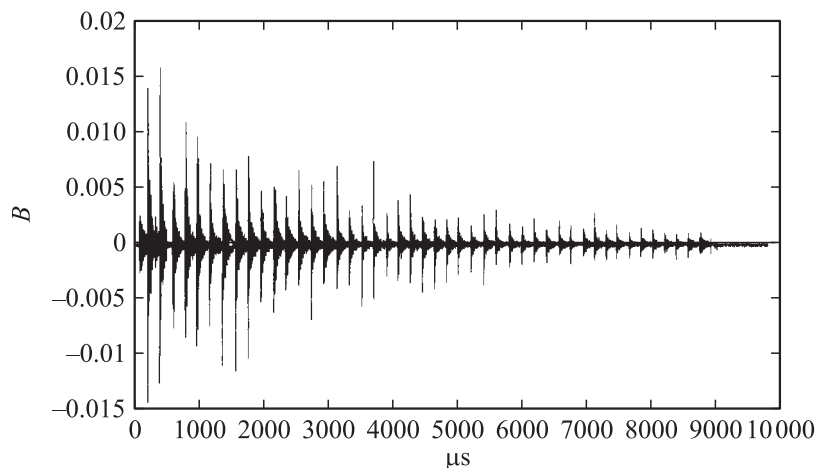
$$E_u = \rho l^4 (0.14 d T_1)^{-2}.$$

Для стеклянного волокна  $d = 150 \mu\text{m}$ ,  $l \approx 18, 30 \text{ mm}$ ,  $T_1 = 3.7, 4.83 \mu\text{s}$  вычислим:  $E_u = 44, 39 \text{ GPa}$ . Эти значения существенно меньше приведенных выше данных по модулю Юнга  $E_p$ , полученных в опытах на растяжение волокна. То, что модуль Юнга зависит от условий проведения опыта (растяжение, изгиб, ...), известно [2,3]. Различие может быть объяснено неоднородностью упругих свойств волокна по сечению: при растяжении „работают“ равномерно все участки сечения волокна, а при изгибе — только его периферийные области и, если последние ослаблены, то будет выполнено неравенство  $E_p > E_u$ . Таким образом, измерение и сравнение величин  $E_p$  и  $E_u$  определяет степень неоднородности упругих свойств волокна.



**Рис. 1.** Относительно быстрое стекание заряда с неповрежденного, предварительно отрицательно заряженного стеклянного волокна при периодическом возбуждении поперечных колебаний.

2. Неожиданными являются результаты экспериментов по многократному возбуждению колебаний через интервалы времени порядка секунды, что гораздо больше времени полного затухания одного цикла колебаний  $\sim 250 \mu\text{s}$  при оценке числа колебаний за это время  $\sim 50$ . При этом наблюдается эволюция стекания электронов практически до нуля (рис. 1). Полагая, что величина заряда пропорциональна размаху амплитуды сигнала, вычислим, что уменьшение заряда в десять раз происходит за время  $\approx 4 \text{ s}$ , а более важная характеристика — число актов возбуждения равно шести. В опытах с положительным зарядом зафиксировать эволюцию не удастся, так как заряд стекает с волокна почти мгновенно и повторное колебание уже не порождает сигнала. Однако после нескольких таких опытов испытываемое волокно приобретает поврежденность — поверхностные микротрещины, и начинает долго удерживать отрицательный заряд. Из осциллограммы на рис. 2 следует, что время затухания  $\approx 40 \text{ s}$  и число актов  $\approx 50$  изменились на порядок величины. Положительный заряд также задерживается дольше, но стекает гораздо быстрее

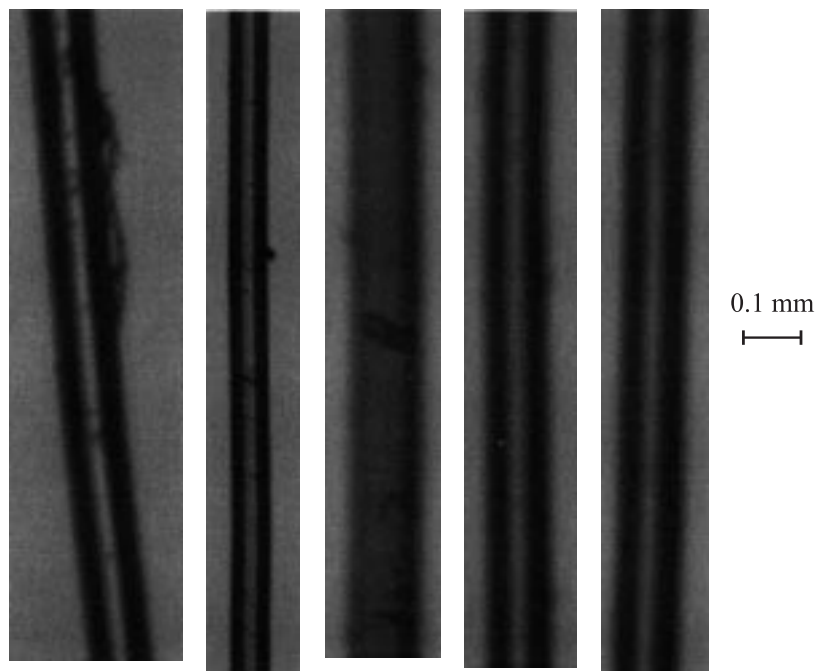


**Рис. 2.** Относительно медленное стекание заряда поврежденного, предварительно заряженного отрицательно стеклянного волокна при периодическом возбуждении поперечных колебаний.

отрицательного. Влажность воздуха в этих опытах — существенный параметр.

Интересным является следующий опыт. На поврежденное волокно наносим отрицательный заряд и наблюдаем характерные для этого заряда сигналы, затем наносим положительный заряд и наблюдаем соответствующие сигналы. Продолжая возбуждать колебания через короткие интервалы времени, убеждаемся, что заряд на волокне меняет знак, так как меняется начальная фаза у сигнала. Объяснение всем этим эффектам таково: микротрещинами гораздо лучше удерживаются электроны, чем большие по массе и по размерам ионы. На рис. 3 в качестве подтверждения приведены фото (увеличение в 80 раз) образцов стекловолокна без дефектов до испытаний (два образца справа) и с дефектами после испытаний (три образца слева).

Смачивание „электронной жидкостью“ поверхности твердого тела подобно явлению смачивания жидкостью такой поверхности, которое используется в методе капиллярной дефектоскопии. Оно может



**Рис. 3.** Наличие и отсутствие микроповреждений на поверхности образцов из стекловолокна.

быть положено в основу разработки нового метода неразрушающего контроля поверхностей тел микронных (а возможно, и нано) размеров.

Авторы благодарят заведующего лабораторией армированных пластиков Института химической физики РАН, д.т.н. А.М. Купермана за любезное предоставление образцов волокон и данных по параметрам этих образцов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы ОЭМПУ #12 и гранта РФФИ # 05-01-08092.

## Список литературы

- [1] *Девяткин Е.А., Симонов И.В., Сиротин А.А.* // Препринт № 794. ИПМех РАН. 2005. 40 с.
- [2] *Солнцев С.С., Морозов Е.М.* Разрушение стекла. М.: Машиностроение, 1978. 152 с.
- [3] *Fiber Fracture* / Ed. M. Elices and J. Llorca. Elsevier, 2002. 393 p.