

УДК 539.374

МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ДИАГРАММ НАПРЯЖЕНИЕ — ДЕФОРМАЦИЯ ВОЛОКОН ПУТЕМ РЕГИСТРАЦИИ ИХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

И. В. Симонов, А. В. Тянин

Институт проблем механики РАН, 119526 Москва
E-mail: simonov@ipmnet.ru

Предложен достаточно простой метод построения кривых растяжения тонких волокон, заключающийся в определении зависимости частот малых поперечных колебаний тонких волокон от деформации растяжения волокна. С использованием классической формулы теории колебаний струны для этих частот рассчитывается напряжение в волокне. Предлагается вместо силы и деформации измерять частоту и деформацию. Такой метод имеет ряд преимуществ, в частности, является более точным. Резонансные частоты определяются путем регистрации антенной сопутствующего электрического поля, возникающего при колебаниях заряда, распределенного по поверхности волокна. Эффективность метода продемонстрирована на примере построения кривых растяжения сополимерных волокон разного диаметра.

Ключевые слова: волокно, частота колебаний, диаграмма растяжения, электрический сигнал.

Введение. Для разработки и (или) калибровки реологических моделей волокон и нитей необходимо использовать диаграммы напряжение — деформация, экспериментально определяемые с помощью дорогостоящего оборудования, которое включает, в частности, высокоточные измерители малых сил. В настоящей работе предлагается простой и менее затратный метод получения таких диаграмм для волокон, допускающих большие деформации до разрушения. Этот метод основан на измерении частот малых поперечных колебаний натянутой струны из данного волокна при заданной деформации. Затем с использованием теории малых упругих колебаний струны рассчитывается искомая зависимость напряжение — деформация. Частоты измеряются путем регистрации антенной-датчиком изменений индукционной составляющей электрического поля при поперечных колебаниях предварительно заряженных волокон. Этот метод имеет ряд преимуществ: антенна располагается на некотором удалении от источника, поэтому не вносит погрешностей в измеряемые значения, метод применим в сложных окружающих условиях (агрессивные среды, высокие температуры), не требует использования сложного оборудования, фактически позволяет избежать от внешних помех, при этом подготовка образцов ведется по стандартной методике. Преимуществом предлагаемого метода по сравнению с непосредственными измерениями силы и перемещения является точное определение частот, в то время как измерение малых сил с малой погрешностью существенно затруднено. Метод

Работа выполнена в рамках Программы Отделения энергетики, механики, машиностроения и процессов управления РАН № 12 и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 07-01-12031).

определения частот, форм и затухания колебаний изложен в работах [1, 2], там же приведены, в частности, результаты измерения поперечных колебаний стеклянных волокон, закрепленных как упругая консоль, и описан обнаруженный эффект изменения времени рассасывания заряда с поверхности волокна в зависимости от степени повреждаемости этой поверхности.

1. Методика эксперимента. Основными элементами экспериментальной установки являются датчик электрического поля (антенна), нагружающее и регистрирующее устройства. Нагружающее устройство имеет два металлических захвата с диэлектрическими прокладками для закрепления волокна, один из которых неподвижен, а другой может перемещаться горизонтально с помощью штока. С целью экранирования от внешних полей датчик и захваты помещены в коробку из латуни с размерами $162 \times 89 \times 32$ мм и толщиной стенки 7 мм. В качестве датчика использовался штырь из медной проволоки (диаметр 2 мм, длина 10 мм), расположенный на расстоянии нескольких миллиметров от волокна, — датчик емкостного типа (собственная емкость $1 \div 2$ пФ), фиксирующий только изменения электрического поля. Датчик подключался к двухлучевому цифровому осциллографу “LeCroy WaveSurfer 422” через осциллографические пробники (активное сопротивление 10 МОм, входная емкость $15 \div 35$ пФ), что обеспечивало передачу неискаженных спектров сигналов в полосе частот $1 \div 400$ кГц. Сигналы регистрировались без предварительного усиления. Запуск осциллографа осуществлялся передним фронтом регистрируемых сигналов при достижении заданного значения амплитуды сигнала. Результаты тестирования и отработки методики подробно изложены в работе [1].

Ранее установлено, что без предварительного нанесения электрического заряда на поверхность волокна его колебания не регистрируются. При наличии положительного или отрицательного заряда по осциллограммам с высокой точностью определяется период колебания по первой форме. Наблюдаются также наложение колебаний по следующим формам (при несимметричном возбуждении), вращение плоскости колебаний и их затухание, определяемое коэффициентом демпфирования [1, 2]. При этом влияние величины и знака заряда не обнаружено.

Преобразуем классическую формулу для первой частоты собственных колебаний струны:

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{m/L}} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{FL}{\rho_0 S_0 L_0}} = \frac{1}{2\sqrt{L}} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_0 L_0}} = \frac{1}{2L_0} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_0(1 + \varepsilon)}}. \quad (1)$$

Здесь F — сила натяжения; m , L_0 , L , ρ_0 , S_0 — масса, начальная и текущая длина, начальные плотность и площадь струны; ε — деформация струны; σ — номинальное нормальное напряжение. Из (1) следует

$$\sigma = 4f^2 L_0^2 \rho_0 (1 + \varepsilon), \quad (2)$$

где $\varepsilon = (L - L_0)/L_0$; $\sigma = F/S_0$. Определив зависимость частоты собственных колебаний натянутого волокна от его деформации $f(\varepsilon)$ и подставив в формулу (2), получим зависимость $\sigma(\varepsilon)$.

2. Результаты экспериментов. Для экспериментов были выбраны образцы сополимерных волокон фирмы “Nikko Vexter” диаметром $d = 60, 100, 140$ мкм, при этом $L_0 = 100$ мм, $\rho_0 = 1,14$ г/см³. На образец наносился поверхностный отрицательный или положительный заряд. Величина заряда была важна лишь для надежной регистрации сигнала. В эксперименте образец растягивался, так чтобы деформация последовательно принимала значения $e = 100\varepsilon = 2\%$, 3% , ... При каждом значении деформации проводилось измерение первой частоты собственных колебаний струны, вызываемых щипком деревянной зубочистки в центре струны. После достижения максимальной деформации,

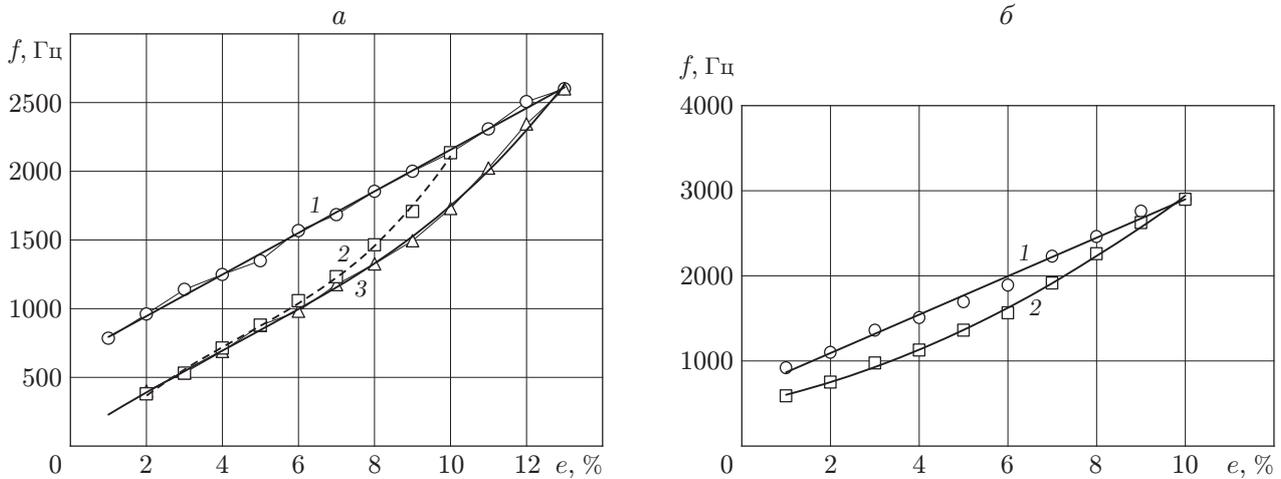


Рис. 1. Зависимость частоты от деформации при нагружении и разгрузке волокон различного диаметра:
 a — $d = 140$ мкм, b — $d = 100$ мкм; 1 — нагружение, 2, 3 — разгрузка из состояния растяжения (2 — $e = 10\%$, 3 — $e = 13\%$)

близкой к деформации разрушения e_c , начинался процесс разгрузки в обратном порядке. Затем образцы менялись. Частота незначительно (в пределах разброса экспериментальных данных порядка 2 %) зависела от амплитуды, длины участка измерения (количества периодов) при значительном затухании колебаний, а также от величины поверхностного заряда на волокне, но существенно зависела от диаметра волокна (масштабный эффект был существенным). Имела место повторяемость результатов эксперимента (в пределах указанного разброса), хотя “шаги по времени” — интервалы времени после фиксации заданной деформации или между актами колебаний — менялись в диапазоне от нескольких секунд до нескольких минут. Это обусловлено тем, что при деформациях, меньших (более чем на 2 %) деформации разрушения e_c , релаксация напряжений волокна данного типа является неполной и происходит быстро (в течение нескольких секунд), поэтому полученные результаты фактически соответствуют длительной нагрузке.

На рис. 1 приведены экспериментальные точки и аппроксимирующие их кривые зависимости частоты от деформации волокон при жестком нагружении и разгрузке (аппроксимирующие кривые построены с помощью программы “Excel”). Точки, соответствующие процессу нагружения, ложатся на прямую $f = A + Be$. Кривая, соответствующая разгрузке из состояния $e = 10\%$, аппроксимируется полиномом третьей степени: $f = C + De + Ee^2 + Ge^3$. Значения коэффициентов C , D , E , G зависят от диаметра волокна (см. таблицу): при уменьшении диаметра угол наклона прямых увеличивается, что обуславливает масштабный эффект по отношению к кривым $\sigma(\varepsilon)$, рассчитанным по уравнению (2). Для волокна диаметром $d = 140$ мкм на рис. 1, a приведена также аппроксимирующая кривая, соответствующая разгрузке из состояния $e = 13\%$:

Зависимость коэффициентов аппроксимирующих полиномов от диаметра волокна

d , мкм	A	B	C	D	E	G
140	643,5	151,3	-164,0	330,3	-38,75	2,851
100	513,1	183,0	58,0	327,4	-38,37	2,858
60	639,3	226,0	479,1	109,0	13,73	0

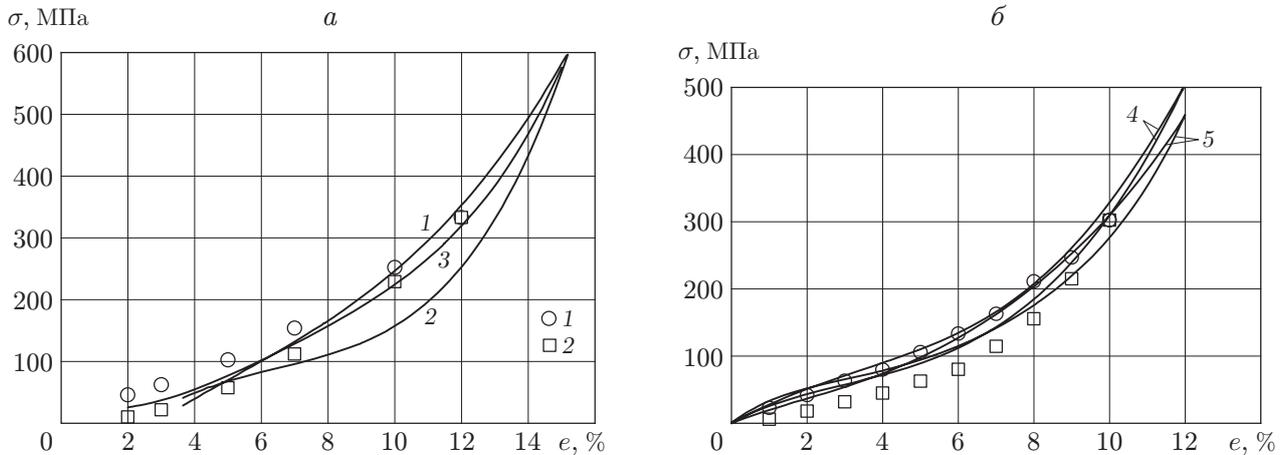


Рис. 2. Диаграммы длительного нагружения и разгрузки для волокон различного диаметра:

a — $d = 140$ мкм; b — $d = 100$ мкм; линии — результаты непосредственных измерений (1 — нагружение, 2 — разгрузка, 3 — повторное нагружение, 4, 5 — результаты двух опытов на нагружение и разгрузку); точки — результаты расчета по формуле (1) (1 — нагружение, 2 — разгрузка)

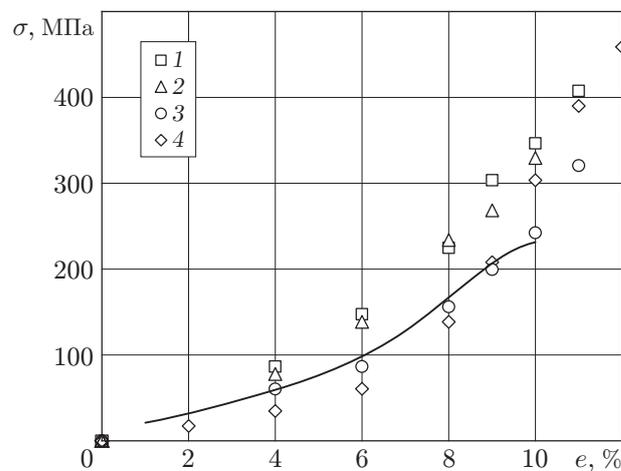


Рис. 3. Экспериментальные данные длительных испытаний на растяжение тонкого волокна диаметром 60 мкм (точки) и диаграмма нагружения, полученная по данным измерения частот (линия):

1 — $L_0 = 582$ мм; 2 — $L_0 = 608$ мм; 3 — $L_0 = 630$ мм; 4 — $L_0 = 692$ мм

$f = 43,38 + 195,3e - 11,6e^2 + 0,9141e^3$. При уменьшении деформации эта кривая асимптотически приближается к кривой, соответствующей разгрузке из состояния $e = 10$ %. Аналогичные измерения частот проводились при уменьшении длины струны в два раза ($L_0 = 50$ мм). Условие пропорциональности отношения частот этим длинам, следующее из формулы (1), выполнялось с приемлемой точностью.

На рис. 2, 3 приведены зависимости $\sigma(e)$, рассчитанные по формуле (1). Там же для сравнения представлены результаты непосредственных длительных измерений силы натяжения и приращения длины волокна, пересчитанные затем в зависимость $\sigma(e)$. В экспериментах использовался силоизмеритель — электронный динамометр ST-02 с погрешностью измерения $\pm 2,5$ г. Все кривые разгрузки лежат ниже кривых нагружения, а различие

между ними тем больше, чем больше достигнутая максимальная деформация. Гистерезис обусловлен наличием вязкости и деградацией волокна вследствие перестройки его внутренней структуры при больших деформациях. На рис. 2,а промежуточная кривая 3 соответствует повторному нагружению. Разброс результатов измерений σ и ϵ для образцов волокон диаметром $d = 60, 140$ мкм значителен, но, вообще говоря, при измерении механических характеристик полимерных волокон большой статистический разброс отмечался всегда [4]. Для волокна диаметром $d = 100$ мкм этот разброс оказался незначительным. На рис. 2,б показаны диаграммы нагружения-разгрузки, полученные в двух опытах в результате непосредственных измерений напряжений и деформаций. Видно, что экспериментальные данные хорошо согласуются. По механическим свойствам волокно диаметром $d = 100$ мкм оказалось более качественным, чем испытанные волокна других диаметров, при этом результаты измерений, выполненных разными методами, удовлетворительно согласуются. Наибольший разброс результатов непосредственных измерений наблюдался при испытаниях тонкого волокна диаметром 60 мкм. Тем не менее кривая растяжения, построенная по результатам измерений частоты (см. рис. 3), лежит в доверительном интервале разброса данных непосредственных измерений, полученных в четырех опытах на растяжение этого волокна при $L_0 = 692, 630, 608, 582$ мм и “шаге по времени”, равном 30 с.

Заключение. Приведенные в настоящей работе данные подтверждают эффективность использования метода регистрации колебаний для получения диаграмм растяжения тонких волокон, способных выдержать большие деформации перед разрушением. С помощью этого метода (в отличие от метода непосредственного измерения силы и перемещения) измеряются частоты поперечных колебаний волокна и его удлинения при натяжении. Затем эти величины пересчитываются в зависимость напряжение — деформация. Проводя эксперименты при различной выдержке между шагами по деформации, можно получать информацию о релаксационных процессах в волокне в зависимости от степени его деформации и строить кривые растяжения и разгрузки при воздействии внешних факторов (температуры, агрессивной среды, физических полей), оказывающих влияние на механические свойства волокон [4], когда использование метода непосредственных измерений затруднено. Предлагаемый метод является перспективным для получения необходимых механических характеристик микро- и наноразмерных тел, поскольку результаты измерения резонансной частоты, как правило, более точны, чем результаты измерения малых сил (приемлемая точность непосредственных измерений достигается с использованием дорогостоящей техники).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Симонов И. В., Сиротин А. А.** Изучение колебаний и разрушения тонких волокон методом измерения электрического поля. М., 2006. (Препр. / РАН. Ин-т пробл. механики; № 818).
2. **Симонов И. В., Сиротин А. А., Смирнов И. М., Тянин А. В.** Регистрация колебаний волокон методом измерения вариации электрического поля // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33, вып. 14. С. 19–24.
3. **Fiber fracture** / Ed. by M. Elices, J. Llorca. Oxford: Elsevier, 2002.
4. **Цой Б.** Прочность и разрушение полимерных пленок и волокон / Б. Цой, Э. М. Карташов, В. В. Шевелев. М.: Химия, 1999.

Поступила в редакцию 26/VI 2008 г.