

**ПРИМЕНЕНИЕ СОСТАВНОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВИБРАТОРА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ПОЛИМЕРОВ**

И. Г. Михайлов и В. А. Соловьев

Метод составного вибратора в своей обычной форме практически не пригоден для исследования материалов с высокими потерями и малой скоростью звука (полимеры). Для решения этой задачи предлагается использовать образцы с малым поперечным сечением (меньшим, чем у пьезокристалла). Возможность работы с такими образцами доказана на опыте. Приведены некоторые результаты, полученные этим методом. Обнаружена, например, упругая анизотропия в растянутых образцах винипласта.

Метод исследования модуля Юнга и механических потерь в твердых телах при помощи составного пьезоэлектрического вибратора применялся многими авторами (см., например, [1]). Наибольшее распространение получил вариант этого метода, где вибратором служит пьезокварцевый стержень прямоугольного сечения, длина которого направлена по оси Y кристалла, толщина — по оси X (электрической) а ширина — по оси Z (оптической). При этом на большие грани (перпендикулярные оси X) наносятся металлические электроды. Стержень крепится проволочками, припаянными к электродам в его центре (узловой точке смещений при колебаниях). Эти же проволочки используются для подведения к электродам переменного напряжения. Электрическое поле, направленное по толщине стержня (ось X кристалла), вызывает деформацию растяжения-сжатия вдоль оси Y . К торцевому срезу стержня приклеивается образец из исследуемого материала в виде стержня равного поперечного сечения. Длина образца в этом обычном варианте метода заранее подбирается такой, чтобы резонансные частоты колебаний кварца и образца приблизительно совпадали (практически достаточно совпадения в пределах 5—10%). Неудобство предварительной подгонки компенсируется рядом существенных преимуществ. Во-первых, при таком выборе длины образца узловая плоскость колебаний составного вибратора почти совпадает с серединой кварцевого стержня, т. е. отпадает необходимость менять точки закрепления. Во-вторых, поскольку резонансная частота вибратора близка к резонансной частоте кварца, удается получить большую амплитуду колебаний. Наконец, в этом случае сильно упрощаются вычисления.

Сила тока смещения через кварц при частоте ω , близкой к резонансным частотам кварца Ω и образца Ω_1 , равна

$$I = \left[i\omega C_0 + \frac{4(eb)^2}{i(m + m_1)(\omega - \Omega_0) + \pi(XS + X_1S_1)} \right] V, \quad (1)$$

где V — напряжение, C_0 — статическая емкость между электродами. Второй член дает ток, связанный с пьезоэлектрической поляризацией кварца. Здесь e — пьезоэлектрическая константа, b — ширина электродов, S и S_1 — (равные) площади поперечного сечения кварца и образца, m и m_1 — их массы. Материал стержней характеризуется комплексными модулями Юнга $E = E' + iE''$ и $E_1 = E'_1 + iE''_1$ (мнимая часть характери-

зует потери), скоростями звука c и c_1 , а также акустическими импедансами $Z = \sqrt{\rho E} = \rho c + iX$ и $Z_1 = \rho_1 c_1 + iX_1$ (ρ и ρ_1 — плотности). Резонансные частоты стержней равны $\Omega = \pi \frac{v}{l}$ и $\Omega_1 = \pi \frac{v_1}{l_1}$, где l и l_1 — длины стержней (рассматриваем только первые гармоники). Резонансная частота составного вибратора равна

$$\Omega_0 = \frac{\Omega m + \Omega_1 m_1}{m + m_1}. \quad (2)$$

Эквивалентная электрическая схема, соответствующая уравнению (1), состоит из последовательного контура RLC и шунтирующей его емкости C_0 , где

$$L = \frac{m + m_1}{8 (eb)^2}, R = \frac{\pi (XS + X_1 S_1)}{4 (eb)^2}, C = \frac{1}{\Omega_0^2 L}. \quad (3)$$

Для измерения параметров эквивалентной схемы вибратора его подключают последовательно с небольшим сопротивлением (в нашей установке 100 ом) к генератору с достаточно плавной настройкой. Затем измеряют ламповым вольтметром напряжение на вибраторе и силу тока через него при частотах, соответствующих максимальной и минимальной проводимостям. Эти частоты, которые можно (не вполне строго) назвать частотами резонанса ω_p и антирезонанса ω_a , измеряются гетеродинным волномером. Вычисления производятся по формулам

$$\Omega_0 = \omega_p + (\omega_a - \omega_p) \frac{I_a}{I_a + I_p}, R = \frac{V}{I_p - I_a}, \Omega_0 C_0 = \frac{\sqrt{I_a I_p}}{V}, \quad (4)$$

$$C = C_0 \cdot \frac{2(\omega_a - \omega_p)}{\Omega_0} \cdot \frac{I_p - I_a}{I_p + I_a}, L = \frac{1}{\Omega_0^2 C}.$$

Из измерений с ненагруженным кварцем определяются его резонансная частота Ω и потери в нем X . По формуле (3) определяются затем Ω и X_1 и вычисляется c_1 . Коэффициент (eb) находится из формулы для L_1 .

Кроме указанных, имеются также и другие методы измерения параметров эквивалентной схемы, но они сложнее и применяются реже.

Большинство работ, выполненных описанным методом, относится к металлам и кристаллам, т. е. к материалам с довольно высокой скоростью звука и с малыми потерями. Нами была сделана попытка применить этот метод для исследования механических свойств высокополимеров в диапазоне частот $10^4 - 10^5$ гц, так как других методов, пригодных в этом диапазоне, пока не существует*. Однако его применение к полимерам наталкивается на ряд принципиальных трудностей. Прежде всего формулы (4) применимы только при не слишком больших потерях, когда $(\omega_a - \omega_p) C_0 \ll \frac{1}{R}$, т. е. когда в пределах резонансной кривой можно считать величину ωC_0 постоянной. Если, как это наблюдается в большинстве полимеров, это условие не выполняется, то формулы (4) дают завышенное значение для R . Характер и величину ошибки в определении Ω_0 оценить трудно, так как уравнение для экстремальных частот оказывается пятой степени, но формулу (4) во всяком случае применять нельзя.

Таким образом, результаты работы Райнхарта [2] в которой $I_p - I_a$ составляло несколько процентов от $\sqrt{I_p I_a}$, явно ошибочны. То же самое относится к результатам Субраманияма [3], по крайней мере, для поли-

* Нам известны всего четыре работы, в которых при помощи составного вибратора исследовались полимерные вещества. Две из них [2,3], по видимому, содержат ошибки, а в двух других [4,5] применялись несколько отличные варианты метода, по нашему мнению, менее удобные и менее точные.

метилметакрилата при высоких температурах (согласно нашим измерениям потери в полиметилметакрилате уже при $50-60^\circ\text{C}$ настолько велики, что формулы (4) неверны). Далее источником ошибок является малая скорость звука в полимерах и, следовательно, малая длина волны в образце. Когда поперечные размеры образца сравнимы с длиной волны, резонансная частота понижается из-за инерции колебаний по толщине.

В работе [3] поправка на поперечное сечение должна была составить около 10 м/сек. (Автор работы ошибочно считал, что поправку можно уменьшить, если работать на третьей гармонике, т. е. с более длинным образцом). Во многих случаях длина волны бывает настолько мала, что резонансная частота поперечных колебаний оказывается близкой к рабочей частоте, и тогда измерения вообще невозможны.

С целью исключить эти ошибки мы попытались использовать образцы с поперечным сечением S_1 , меньшим, чем сечение кварца S . Подобные измерения уже проводились [5], но этот видоизмененный метод требует тщательной проверки. Точное теоретическое решение задачи о колебаниях стержней конечной толщины невозможно и ее заменяют приближенной одномерной задачей. При неравных сечениях возникает трудность в формулировке граничных условий на границе кварц-образец. Условие равенства смещений в каждой точке приходится заменять далеко не очевидным условием равенства средних по сечению смещений.

При формулировке условия для напряжений возможны два предположения.

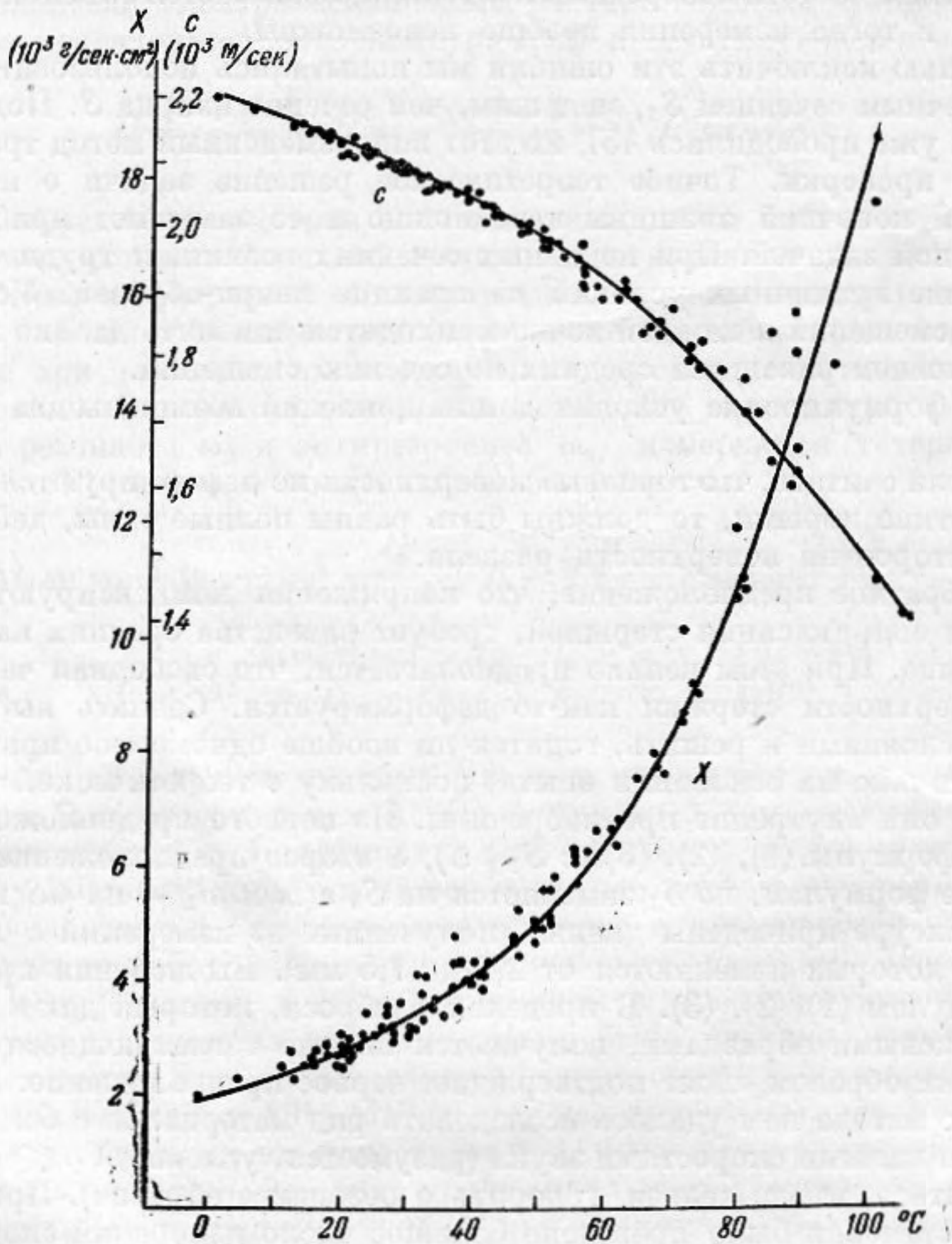
1. Если считать, что торцевые поверхности не деформируются, двигаясь как жесткие поршни, то должны быть равны полные силы, действующие с двух сторон на поверхность раздела.

2. Обратное предположение, что напряжения компенсируются только в точках соприкосновения стержней, требует равенства средних напряжений на границе. При этом неявно предполагается, что свободная часть торцевой поверхности стержня как-то деформируется. Сделать выбор между этими условиями и решить, годится ли вообще одномерное приближение, можно только на основании опыта, поскольку с теоретической точки зрения оба они внутренне противоречивы. Из первого предположения получаются формулы (1), (2), (3) (с $S_1 \neq S$), а второе предположение приводит к тем же формулам, но S_1 заменяется на S , а m и m_1 — на $\rho l S$ и $\rho l_1 S$.

На фигуре приведены данные, полученные из измерений с образцами, сечения которых изменяются от 2,2 до 7,5 мм². Вычисления проводились по формулам (1), (2), (3). В пределах разброса, который дают измерения с одинаковыми образцами, получаются вполне согласующиеся результаты. Таким образом, опыт подтверждает первое предположение. При помощи этого метода нам удалось исследовать ряд материалов с большими потерями и малыми скоростями звука (разумеется, условие $X_1 \ll \rho_1 c_1$ должно выполняться, иначе нельзя говорить о резонансе образца). При исследовании установки было проведено большое число измерений скорости звука c и потерь (характеризуемых реактивной частью удельного акустического импеданса X) в техническом полиметилметакрилате в зависимости от температуры. Кривые приведены на фигуре. Отметим, что на кривой c отсутствует резкий излом, о котором сообщает Субраманьям. При исследовании описанным методом образцов винипласта была обнаружена упругая анизотропия, связанная с наличием «замороженной» высокоэластической деформации. Исследовались образцы, вырезанные из листов винипласта в различных направлениях до и после отжига. Неотожженные листы имели остаточное растяжение 15—20% по длине (в направлении каландрирования) и соответствующее сжатие по толщине; деформация по ширине отсутствовала. После отжига (2 часа при 120°C) остаточные деформации исчезали и скорость звука c во всех направлениях в плоскости листа была одинаковой (1710 ± 10 м/сек). В неотожженных листах по ширине $c \approx 1700$ м/сек, а по длине — 1760 м/сек. В направлении толщины

листа c было несколько меньше (около 1670 м/сек до и 1680—1690 м/сек после отжига).

Мы произвели также измерения скорости звука в образце винипласта, растянутом в горячем состоянии на 75%, и в образцах полиметилметакрилата и полистирола, растянутых на 80—100%. В винипласте наблюдалось возрастание c в направлении растяжения до 1920 м/сек, а в полистироле и полиметилметакрилате скорость звука в пределах погрешности (10—20 м/сек) не изменялась. Во всех случаях деформация была полностью об-



ратима при повторном нагревании. Можно предположить, что причиной появления анизотропии при растяжении является частичная ориентация молекулярных цепей. При этом возрастает количество внутримолекулярных связей, ориентированных по направлению растяжения. Если силы взаимодействия между атомами вдоль цепи значительно больше, чем силы между соседними цепями, то такая ориентация должна вызывать упругую анизотропию. Повидимому, в полистироле и полиметилметакрилате жесткость связей между цепями того же порядка, что и жесткость внутримолекулярных связей, и поэтому ориентация не приводит к появлению упругой анизотропии. Одновременно со скоростью звука измерялись также и механические потери X . В пределах погрешности ($\pm 10\%$) X не зависит от растяжения. При 20 °C и 75 кгц в винипласте $X = 6,3 \cdot 10^3 \text{ г/см}^2 \text{ сек}$, в полистироле $X = 0,45 \cdot 10^3 \text{ г/см}^2 \text{ сек}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. К э д и. Пьезоэлектричество и его практические применения. ИЛ, 1929.
2. J. S. R i n e h a r t. Temperature Dependence of Young's Modulus and Internal Friction of Lucite and Karolith. J. Appl. Phys., 1941, 12, 811.
3. S. V. S u b r a h m a n y a m. Temperature Dependence of Ultrasonic Velocity in Plastics. J. Chem. Phys., 1954, 22, 1562.
4. М. К о р н ф е л ь д. Измерения модуля сдвига твердых и жидких тел. ЖЭТФ, 1943, 13, 116.
5. Н. С. А г е е в а, И. Е. Ж у к о в, М. А. И с а к о в и ч, А. Л. С о с е д о в а, Ю. М. С у х а р е в с к и й. Электромеханический Ку-метр — установка для измерения модуля упругости и потерь в материалах на ультразвуке. ЖТФ, 1952, 22, 1029.

Ленинградский ордена Ленина
государственный университет
имени А. А. Жданова

Поступила в редакцию
11 марта 1955 г.