

**МЕТОД НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Малкин А. Я., Бегишев В. П., Мансуров В. А.**

Описан новый экспериментальный метод исследования вязкоупругих свойств полимерных материалов в режиме несинусоидальных колебаний, доведенный до создания полностью автоматизированной системы измерений и работающего прибора. Приведено сравнение полученных результатов с данными, полученными обычным методом гармонических колебаний, и показаны преимущества нового метода.

Осуществление периодического режима нагружения — один из основных методов измерения механических характеристик полимеров. В практике наиболее широко распространены синусоидальные (гармонические) колебания, что обусловлено глубоким развитием методов их анализа [1]. Однако использование несинусоидальных колебаний позволяет в принципе в одном эксперименте получить более богатую информацию о свойствах исследуемого материала, чем при синусоидальных колебаниях. Это связано с тем, что использование разложения импульса произвольной формы на сумму гармоник (Фурье-спектроскопия) дает одновременно характеристики, отвечающие набору частот как основной, так и высших гармоник. Такой

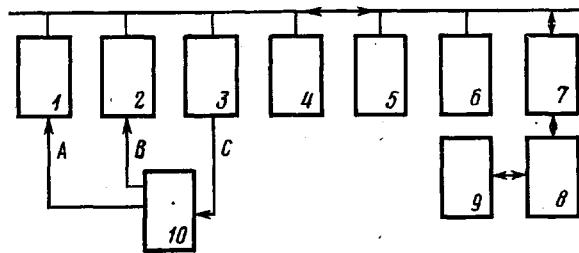


Рис. 1. Структурная схема системы автоматизации реологических измерений: 1, 2 — аналого-цифровой преобразователь, 3 — цифро-аналоговый преобразователь, 4 — таймер, 5 — кнопочный регистр, 6 — индикатор магистрали, 7 — контроллер крейта, 8 — ЭВМ Электроника-60М, 9 — ЭПМ «Consul-260», 10 — виброреометр

подход имеет преимущества при измерениях быстро изменяющихся значений вязкоупругих характеристик полимерных материалов в процессах полимеризации, отверждения, кристаллизации и т. п. Хотя принципы этого метода хорошо поняты и уже упоминались в литературе [1], его реализация сдерживается необходимостью высокой точности воплощения и хорошего уровня автоматизации вычислений при обработке результатов измерения.

Одна из задач такого подхода — информативность подаваемого сигнала, который для удовлетворения достаточной точности измерения должен иметь одинаковую амплитуду для каждой гармоники. Это условие означает, что не всякий несинусоидальный сигнал может быть с успехом использован в качестве входного сигнала. В данной статье наряду с результатами экспериментальных исследований обсуждается использование метода несинусоидальных колебаний для определения динамических характеристик полимеров и выбор вида оптимального входного сигнала.

Если рассматривать динамические реологические испытания как линейную систему с входом и выходом, можно записать

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t') g(t-t') dt', \quad (1)$$

где  $y$  — выходной сигнал,  $x$  — входной сигнал,  $g$  — ядро оператора;  $t$  — время.

Фурье-образ интеграла (1) в соответствии с теоремой о свертке  $Y=GX$ , где  $X$  — Фурье-образ входного сигнала,  $Y$  — Фурье-образ выходного сигнала,  $G$  — характеристика системы. Представим Фурье-образ в следующем виде:

$$X(v) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-2\pi i vt} dt, \quad (2)$$

где  $x(t)$  — временная зависимость входного сигнала. Совершая над уравнением (2) обратные преобразования, определим входное воздействие на систему

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(v) e^{2\pi i vt} dv$$

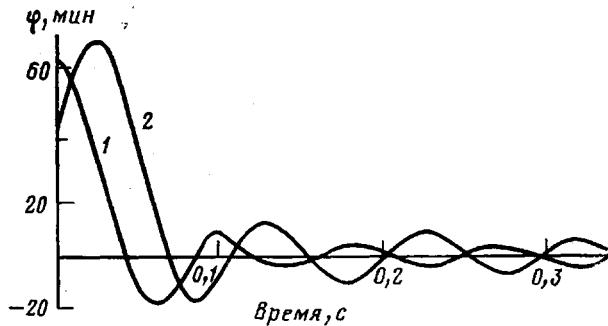


Рис. 2. Использованный и полученный в эксперименте сигналы: 1 – входной сигнал вида  $\frac{\sin 2\pi\nu t}{\pi t}$ , 2 – выходной сигнал

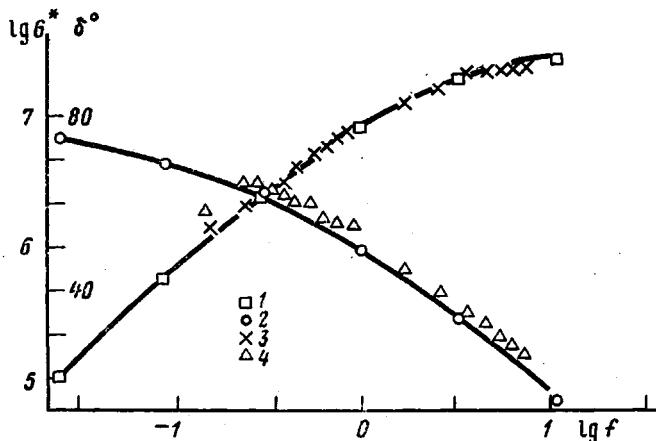


Рис. 3. Изменение комплексного модуля упругости  $G^*$  (1, 3) и угла потерь  $\delta$  (2, 4) в диапазоне частот 0,08–8 Гц, полученных методами вынужденных синусоидальных (1, 2) и несинусоидальных колебаний (3, 4)

Для условия равенства амплитуд основной и высших гармоник предположим

$$X = \begin{cases} 1 & \nu_1 < |\nu| < \nu_2 \\ 0 & |\nu| > \nu_2, |\nu| < \nu_1, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\nu$  – частота воздействия;  $\nu_1, \nu_2$  – граничные частоты. Условие (3) позволяет определить оптимальный вид входного сигнала, обладающего постоянством амплитуды в заданном диапазоне частот, т. е.

$$x(t) \cong \frac{\sin 2\pi\nu t}{\pi t} \quad (4)$$

Метод динамических несинусоидальных колебаний требует автоматизации как синтеза входного сигнала, так и обработки результатов эксперимента. С этой целью разработана система автоматизации эксперимента по исследованию динамических свойств полимеров [2], в которой испытательная установка (конкретно использован виброреометр) через стандартную систему сопряжения КАМАК управляется ЭВМ «Электроника-60М». Структурная схема системы приведена на рис. 1. ЭВМ синтезирует сигнал вида (4) и через преобразователь подает его на вход привода виброреометра. Снимаемый датчиками выходной сигнал через аналого-цифровой преобразователь подается в ЭВМ, где осуществляется алгоритм Фурье-преобразования, который выделяет амплитуду и фазу нужных гармоник. Эти данные служат основой для вычисления динамических характеристик полимерной системы – компонент комплексного модуля упругости при сдвиге  $G^*$  и тангенса угла механических потерь  $\operatorname{tg} \delta$ .

Работа комплекса обеспечивается наличием разработанного пакета программ, включающего в себя программное обеспечение функционирования системы КАМАК, программу синтеза входного сигнала, программу Фурье-преобразования, программу вычисления динамических характеристик.

Экспериментальное опробование системы автоматизации и метода несинусоидальных колебаний было проведено с использованием в качестве эталона образца полибутадиена с узким ММР и с  $M = 1,35 \cdot 10^6$  при  $22^\circ$ . Динамические свойства полимеров такого типа подробно описаны и обсуждены в работе [3]. На рис. 2 приведены входной и выходной сигналы, использованные и полученные в эксперименте. На рис. 3 даны результаты исследования в виде зависимостей  $G^*$  и угла потерь  $\delta$ , полученные в двух диапазонах круговых частот  $0,08-0,8$  и  $0,8-8$  Гц. На этом же рисунке приведены данные, полученные с использованием стандартных синусоидальных колебаний по данным шести опытов. Как следует из рис. 3, информация, полученная по новому методу, полностью согласуется с информацией, полученной из синусоидальных колебаний. Это свидетельствует о достаточной надежности используемой аппаратуры. При этом новый метод обладает несравненно более высокой производительностью, поскольку позволяет за один эксперимент получать значения динамических характеристик полимерных материалов для ряда гармоник, отвечающих десятичному порядку по частоте.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Малкин А. Я., Аскадский А. А., Коврига В. В. Методы измерения механических свойств полимеров. М.: Химия, 1978, с. 330.
2. Бегишев В. П., Бурштейн Б. И., Малкин А. Я., Мансуров В. А., Пепеляева Г. А., Славнов Е. В. А. с. 672545 (СССР).—Опубл. в Б. И., 1979, № 25, с. 186.
3. Виноградов Г. В., Малкин А. Я., Яновский Ю. Г., Борисенкова Е. К., Ярлыков Б. В., Бережная Г. В., Шаталов В. П., Шалганова В. Г., Юдин В. П. Высокомолек. соед. А, 1972, т. 14, № 11, с. 2425.

Институт механики сплошных сред  
Уральского научного центра АН СССР

Поступила в редакцию  
9.III.1983

Научно-производственное  
объединение «Пластмассы»

## DETERMINING THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF POLYMERIC MATERIALS BY NON-SINUSOIDAL VIBRATIONS TECHNIQUE

*Malkin A. Ya., Begishev V. P., Mansurov V. A.*

### Summary

A new experimental procedure for the study of viscoelastic properties of polymeric materials in a non-sinusoidal vibration mode is described. Fully automatic measuring system and a ready-to-work apparatus were developed to incarnate the technique. The results presented are compared with those obtained by the common method of harmonic vibrations and the advantages of the newly developed procedure are demonstrated.

УДК 541.64:539.27

## РЕНТГЕНОДИФРАКЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ СТЕПЕНИ КРИСТАЛЛИЧНОСТИ ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ ВОЛОКОН

*Гойхман А. Ш., Кириченко В. И., Будницкий Г. А.,  
Короленко М. П., Мацубара Н. П.*

Описана методика измерения степени кристалличности волокон ПП по рентгенодифракционным кривым с проведением расчетов на ЭВМ. В основу предложенной методики положен метод Германса — Вейдингера с использованием стандартизованной кривой рассеяния аморфным ПП. Определены условия выбора областей и точек аппроксимации стандартизованной кривой рассеяния к экспериментальной кривой рассеяния частично-кристаллическим образцом. Разработан унифицированный алгоритм такой аппроксимации и расчета степени кристалличности.

Одной из важных структурных характеристик, определяющих многие макроскопические свойства полимерных материалов, является содержание кристаллической части в частично-кристаллических полимерах (степень кристалличности  $X$ ). Величина  $X$  может быть измерена различными методами: рентгенодифракционным, ИК-спектроскопическим, по энталпии плавления, по измерениям плотности и некоторыми другими методами. Во многих технологических задачах возникает необхо-