

УДК 678.012.4.

Неймарк В.М., Рец П.И., Ульянов Л.П. Новое поколение приборов для измерения механических динамических характеристик // Научное приборостроение. Л.: Наука, 1987.

Анализ тенденций развития зарубежных и отечественных приборов для механических испытаний материалов показывает, что прогресс возможен при дальнейшей "интеллектуализации" и широком использовании принципа модульности конструкций и систем. Библиогр. 5 назв. Ил.2.

В.М.Неймарк, П.И.Рец, Л.П.Ульянов

НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРОВ

Полимеры относятся к классу вязкоупругих сред, реакция которых на механическое воздействие существенно зависит от его частотного спектра, температуры и физических возмущающих полей (магнитного и электрического, ультразвука и др.). В широком диапазоне частот и температур один и тот же полимер может проявлять свойства ньютоновской жидкости и упругого тела. Тангенс угла потерь при этом может изменяться от 10^{-3} - 10^{-2} до 10^2 - 10^3 . Чтобы провести удовлетворительные по точности измерения компонент комплексного модуля сдвига, прибор должен иметь погрешность измерения угла сдвига фаз между механическим напряжением и деформацией, не превышающую единиц угловых минут как при очень малых, так и при очень больших углах потерь. Поэтому создание приборов для измерения динамических характеристик полимеров (ДХП) в широком частотном (10^{-5} -250 Гц) и температурном диапазонах (-150+450 °C) является важнейшей современной задачей приборостроения.

Для исследования ДХП в области частот до 250 Гц наибольший практический интерес представляет метод вынужденных нерезонансных колебаний, преимуществом которого является реализация широкого частотного диапазона. В настоящее время известно множество конструкций приборов для измерения ДХП, но в любой конструкции можно различить входную – генераторную часть, рабочий узел, содержащий образец полимера, и выходную – анализирующую и регистрирующую часть. Исследования ДХП проводятся при заданных механических напряжениях или деформациях.

Метод измерения определяет и конструкцию привода прибора, его входную часть, при прямых измерениях характеристик полимеров. Наиболее широкое распространение получил гидравлический привод – приборы "Zwick 1435" ("Zwick", ФРГ), "Серия 1340" ("Instron", Великобритания), "Гидропульс" ("Schenk", ФРГ), "Rheograph 2001" ("Gottfert", ФРГ) и другие, работающие при заданных деформациях. Основные достоинства гидравлического привода – широкий диапазон частот до 10^4 Гц, большие развиваемые усилия до 10^6 Н. Основным недостатком приборов с гидравлическим приводом является наличие остаточных усилий $\sim 1\%$, ограничивающих точность измерений и вследствие этого диапазон исследуемых материалов. Приборы с гидравлическим приводом применяются для исследования ДХП с технологическими целями, испытания готовых изделий на вибростойкость, усталость, износ и т.д., а также для измерения ДХП с научными целями.

Широко распространены также приборы с электромеханическим приводом – приборы "Servotest 450" и др. ("Servotest", Великобритания), "Модель RM250", реогониометр Вайссенберга, виброреометр и др. ("Schenk", ФРГ), виброреометр (СНБ ИНХС АН СССР) и др., основанным на механическом преобразовании вращательного движения в возвратно-поступательное и колебательное. Они имеют более широкий амплитудный диапазон ($A_{max}/A_{min} \sim 1000$), меньшие габаритные размеры и более низкую стоимость, но ограниченный (до ~ 100 Гц) диапазон частот деформирования. Применяются в основном для измерений ДХП с технологическими и научными целями и при испытаниях полимеров на растяжение с наложенными вибрациями или без них.

Известны приборы с электромагнитными и магнитоэлектрическими приводами – крутильный вискозиметр Форгача, "Модель 1603" ("Instron"), ДХП-1 и ДХП-2 (ЦКБ УП НТО АН СССР) и др. Для этих приборов характерны широкий частотный (до 10^4 Гц) диапазон, широкий амплитудный диапазон ($A_{max}/A_{min} \sim 10^5$), высокая точность фазовых измерений, но ограниченный сверху диапазон развиваемых усилий (~ 100 Н). Эти приборы в основном используются для измерения ДХП с научными целями. Широкий амплитудный диапазон и высокая точность измерения угла механических потерь позволяют измерять ДХП при малоамплитудном деформировании в трех основных физических состояниях – вязкотекучем, высокоэластичном и стеклообразном. Привод магнитоэлектрической системы в сравнении с электромагнитным имеет лучшую линейность преобразования.

Анализирующая и регистрирующая части большинства приборов для измерения ДХП представлены в виде системы первичной обработки сигнала реакции подвижной системы прибора с испытуемым образцом на возмущающее воздействие. Для извлечения той или иной информации из результатов испытания зарегистрированные кривые в дальнейшем подвергаются ручной и машинной обработке экспериментатором.

В последние годы наблюдается тенденция к расширению функциональных возможностей прибора, к большей универсальности применения и широкому использованию

модульного принципа конструкций. В то же время развитие реологии настоятельно требует увеличения точности и расширения диапазонов измерений, автоматизации обработки результатов измерений.

Существенное повышение точности измерений реакции подвижной части прибора с образцом на гармоническое возмущение обеспечивает метод двойной параметрической компенсации входного управляющего сигнала [1, 2], примененный в установках ДХП-1 [3] и ДХП-2 [4], разработанных и изготовленных в ЦКБ УП НТО АН СССР. Этот метод позволяет избавиться от влияния механических резонансов подвижной системы, вносящих фазовые искажения, и погрешностей входных устройств. Установки снабжены аналоговыми вычислительными устройствами, вычисляющими по компонентам комплексного крутящего момента $M = M' + iM''$, по заданной амплитуде θ и коэффициенту формы образца A динамические модули упругости $G' = M'/\theta A$ и потерь $G'' = M''/\theta A$ в широкой полосе инфранизких и низких частот, достаточной для вычисления важных констант полимера: начального значения вязкости $\eta_0 = \lim_{\omega \rightarrow 0} G''/\omega$; начального коэффициента нормальных напряжений $\xi_0 = \lim_{\omega \rightarrow 0} 2G'/\omega^2$; начального модуля высокоэластичности $G_e^0 = 2\eta_0^2/\xi_0$.

При динамических испытаниях полимера на частотах выше десятков и сотен герц на результат измерений может оказать влияние инерционность исследуемой среды, существенно усложняющая расчетные операции. Чтобы избежать этого, необходимо выполнение условия

$$h \ll \omega^{-1} \sqrt{G^*/\rho}, \quad (1)$$

где h — толщина деформируемого слоя в направлении распространения волны, ρ — плотность среды.

Однако это условие далеко не всегда возможно выполнить, а громоздкие вычисления по учету инерционности среды, волновых процессов не "под силу" аналоговой вычислительной машине, что приводит к недоиспользованию возможностей измерительной техники. Следует отметить, что приборы ДХП-1 и ДХП-2 по своим техническим возможностям стоят на уровне лучших мировых достижений в рассматриваемом классе приборов, а по производительности измерений даже превышают их. Оценка метрологических возможностей того или иного метода измерений, той или иной конструкции прибора и сравнение их между собой подробно приведены в работе [5]

Новое поколение приборов для измерения ДХП, родоначальником которого является разрабатываемый ЦКБ УП НТО АН СССР прибор ДХП-3, характеризуется активным использованием возможностей цифровой вычислительной техники.

В настоящее время во многих зарубежных системах для испытания материалов используются микроЭВМ на основе микропроцессоров, а в некоторых и мини-ЭВМ (фирмы "Instron", "Schenk" и др.). Однако использование вычислительной техники, как правило, пока не идет дальше сбора измерительной информации, простейшей обработки и функций ввода-вывода.

Более эффективное использование мини-ЭВМ предполагает активное использование пакетов таких прикладных программ, как "Планирование эксперимента", "Многокритериальная оптимизация" и создание системы прикладного матобеспечения для управления экспериментом и интерпретации результатов измерений на основе "Банка моделей", "Банк моделей" представляет алгоритмизированные знания как о свойствах полимеров (различные математические модели полимеров), так и о процессе измерения. Например, использование в качестве математической модели процесса измерений следующей системы интегро-дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
 (\rho + m\delta(x)) \frac{\partial^2 U(x,t)}{\partial t^2} &= -\frac{\partial \sigma(x,t)}{\partial x} - L\rho M(t)\delta(x); \\
 \gamma(x,t) &= \frac{\partial U(x,t)}{\partial x}; \\
 \sigma(x,t) &= E(\gamma(x,t)) + \int_0^\infty g(\tau)\gamma(x,t-\tau)d\tau,
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

которая описывает волновые процессы развития деформаций $\gamma(x, t)$ и напряжений $\sigma(x, t)$ в конечном стержне длины L и плотности ρ . Один конец стержня закреплен в точке $x = L$, т.е. $U(L, t) = 0$ – граничное условие, а к другому концу приложен момент сил $M(t)$. Здесь E – модуль упругости; $g(\tau)$ – ядро интегрального преобразования, Фурье-образом которого является комплексный модуль сдвига $G(\omega)$; m – собственная масса генератора момента сил $M(t)$. Использование такой математической модели (2) при интерпретации результатов эксперимента позволит снять существенные ограничения (1), к которым прибегали до сих пор. Это позволяет существенно увеличить точность измерений либо ослабить технические требования к генератору моментов сил и датчикам.

Использование нелинейных математических моделей полимеров позволит измерять нелинейные свойства полимеров. Следует отметить, что задача измерения нелинейных свойств полимеров до сих пор не ставилась.

Кроме указанных преимуществ, которые обеспечиваются "Банком моделей" при интерпретации результатов измерений, существенны также преимущества и при планировании и управлении ходом эксперимента.

Рассмотрим структуру прибора ДХП-3, представленную на рис.1. Система управ-

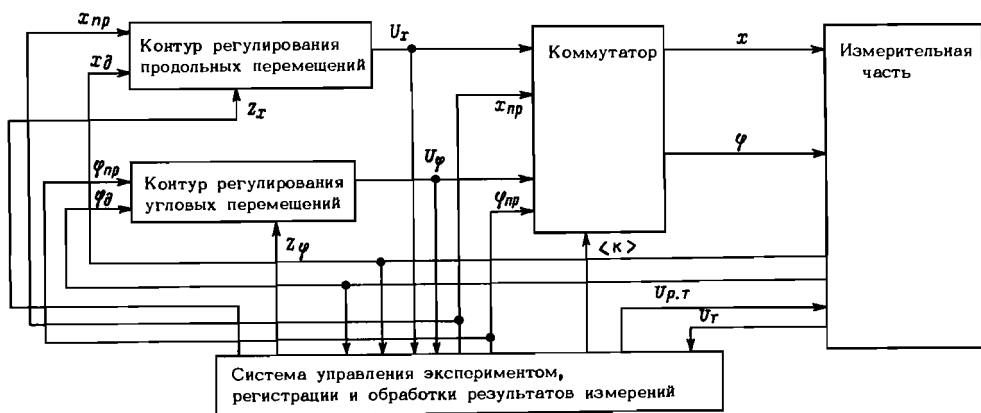


Рис.1. Структурная схема прибора ДХП-3.

ления экспериментом, регистрации и обработки результатов измерений выполняет следующие действия:

- генерирует испытательные функции $x_{пр}$ и $\varphi_{пр}$ для формирования продольных и угловых перемещений испытуемого образца;
- вырабатывает сигналы коммутации схемы эксперимента $\langle k \rangle$, в соответствии с которыми задаются деформации, а измеряются развиваемые напряжения или наоборот;
- с помощью сигналов $U_{р.т}$ и $U_{т}$ выполняется регулирование температуры

по заданной программе в термोकриокамере;

- регистрируются сигналы с датчиков продольных x_d и угловых φ_d перемещений, сигналы, пропорциональные развиваемым продольным U_x и угловым перемещениям U_φ ;

- выполняет обработку результатов и функции ввода-вывода информации.

На рис.2 представлена структура измерительной части прибора, в соответствии с которой управление экспериментом сводится к коммутации схемы эксперимента (вы-

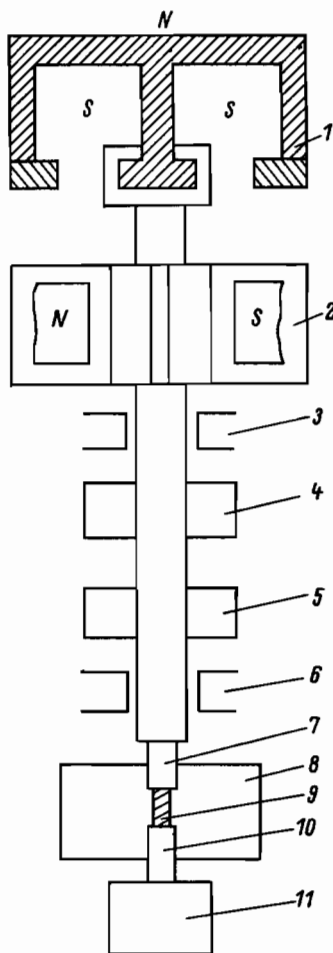


Рис.2. Структурная схема измерительной части прибора ДХП-3.

1 - генератор осевых нагрузок; 2 - генератор механических крутящих моментов; 3, 6 - воздушные подшипники; 4 - датчик осевого смещения; 5 - датчик угла; 7 - держатель верхний; 8 - термоблок; 9 - испытательный образец; 10 - держатель нижний; 11 - юстировочное устройство.

бор метода измерений), к выбору вида и параметров испытательной функции, к выбору формы образца.

Если процесс измерений разбить на этапы, то на каждом последующем этапе можно вырабатывать план эксперимента с учетом информации, полученной на предыдущих этапах. "Банк моделей" представляет измерительную информацию в виде, удобном для оценки механических свойств испытуемого полимерного образца и выработки квазиоптимального плана эксперимента. Такой подход позволит не только увеличить точность измерений, но и значительно повысить производительность прибора.

Следует отметить еще одну особенность рассматриваемой структуры прибора, а именно, модульность конструкции. Каналы формирования продольных и угловых перемещений являются независимыми, что позволяет без существенных изменений в общей схеме прибора выпускать приборы различной конфигурации и технических характеристик для испытания различных классов материалов. Модульность является одним из основных принципов также при разработке системы управления экспериментом, регистрации и обработки результатов эксперимента.

Таким образом, анализ тенденций развития приборов для механических испытаний материалов подсказывает, что пути дальнейшего прогресса лежат, во-первых, в "интеллектуализации", во-вторых, в широком использовании принципа модульности конструкций и систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ульянов Л.П.// Сб.Реология полимерных и дисперсных систем и реофизика. Ч.1: Материалы VIII Всесоюз.симпоз.по реологии. Минск, 1975. С.40-50.
2. Ульянов Л.П. А.с.589568 СССР.// Б.И. 1978. № 3. С.143.
3. Ульянов Л.П., Неймарк В.М., Яновский Ю.Г., Сергеев С.И.// Завод.лаб. 1973. № 11. С.1402-1404.
4. Ульянов Л.П., Неймарк В.М.// Междунар.науч.-техн. конф. стран-членов СЭВ по науч.приборам "Научприбор СЭВ-78": Тез.докл.1978. С.182-183.
5. Ульянов Л.П., Яновский Ю.Г., Неймарк В.М. О погрешностях при измерениях вязкоупругих динамических характеристик полимерных систем: Механика полимеров. Рига, 1978.

Е.В.Межбурд, Б.Н.Бойко, В.А.Лосев, В.В.Плотников, А.А.Сенин, М.И.Храмов РОТАЦИОННЫЙ ВИСКОЗИМЕТР НА МАГНИТНОМ ПОДВЕСЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСТВОРОВ БИОПОЛИМЕРОВ

Созданный в СКБ биологического приборостроения АН СССР вискозиметр АВ-1 предназначен для измерения характеристической вязкости слабokonцентрированных растворов биополимеров. Этим определяются предельно высокие требования к схожимости и воспроизводимости результатов измерения - $\sim 10^{-3}$ для схожимости и $5 \cdot 10^{-3}$ для воспроизводимости. Диапазон измерения абсолютной вязкости $3 \cdot 10^{-4}$ - $1 \cdot 10^{-2}$ Па.с, рабочий диапазон температур 0-60 °C и диапазон измерения скоростей деформации $1-10^{-1}$ с⁻¹ обеспечивают проведение исследований широкого класса растворов биополимеров.

Принцип действия вискозиметра основан на измерении скорости вращения электропроводящего цилиндрического ротора, свободно подвешенного с помощью магнитного поля внутри цилиндрической камеры, заполненной исследуемой жидкостью. Ротор приводится во вращение вращающимся магнитным полем. При обеспечении высокой стабильности индукции вращающего поля вращающий момент будет пропорционален разности скоростей вращения поля и ротора. Тормозящий момент за счет вязкого трения в жидкости для такой конструкции пропорционален вязкости и скорости вращения ротора. Поэтому при измерении устанавливается равновесная скорость вращения ротора, при которой момент вращения уравнивается моментом трения. Эта скорость пропорциональна вязкости раствора. Отсутствие опор вращения ротора исключает искажение результатов, вызванное потерями на трение в этих опорах, и позво-