

УДК 620.178.153 : 678.01

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВОЙСТВ ВЯЗКОУПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

© М. Б. Бакиров, В. А. Рудницкий, А. И. Кононенко, И. В. Фролов¹

Статья поступила 5 апреля 2000 г.

Описан метод определения механических свойств полимерных материалов и резин, основанный на непрерывной регистрации изменения скорости жесткого ударника в ходе свободного удара о поверхность испытуемого образца. Обсуждается использование данного метода для экспрессного определения степени старения оболочек кабелей.

Вопрос экспресс-анализа свойств изделий из вязкоупругих материалов, в частности полимеров, в процессе их изготовления и эксплуатации является весьма актуальным. В первую очередь это связано с характерными изменениями, происходящими в таких материалах при длительной эксплуатации в результате температурного старения или воздействия различного вида облучений, например радиационного.

Наиболее распространенным прибором для оценки свойств полимеров и резин являются твердомеры Шора, действие которых основано на измерении глубины вдавливания подпружиненного упругого индентора. При этом твердость оценивается в единицах Шора или международных единицах твердости [1]. С физической точки зрения, показания приборов являются функцией величины жесткости или модуля упругости испытуемого материала. К недостаткам этих приборов следует отнести сложность обеспечения соответствующего положения базовых поверхностей, особенно при испытаниях изделий, имеющих неплоскую поверхность, например цилиндрическую или сферическую, что приводит к значительной случайной погрешности.

Более информативными и точными являются приборы, основанные на динамических методах определения механических свойств материала. Примером может служить описанный в работе [2] прибор, действие которого основано на изменении резонансной частоты колебаний стержня, соединенного с индентором, в зависимости от площади контакта с испытуемым материалом.

К числу динамических можно отнести и метод ударного индентирования, описанный в данной работе. Сущность его заключается в нанесении свободного удара жестким индентором по испытуемому материалу и регистрации скорости движения индентора в процессе его контактного взаимодействия. Известно

Методы механических испытаний

многие работы [3], полученные при испытании различных материалов, включая оболочки кабелей, методом динамического индентирования. Важным общим обстоятельством всех методов является то, что индентор, в процессе испытания, входит в контакт с испытуемым образцом, что требует специальных мер по избежанию от

связывания индентора с испытуемым образцом.

В работе [3], в которой исследовано

устройство [3], в котором используют пьезодатчик, установленный на инденторе; первоначальную информацию о движении индентора здесь получают из зависимости ускорения движения от времени. Более перспективным с точки зрения возможности автоматизации процесса удара и съема информации является магнитоиндукционный датчик, который располагается на корпусе прибора и электрически не связан с движущимся индентором. На рис. 1 приведена схема устройства, реализующего рассматриваемый метод. Основными частями его являются индентор 1 с прикрепленным к нему постоянным магнитом 2, расположенным на конце поворотного рычага 3, катушка индуктивности 4, предварительный усилитель 5, блок аналого-цифрового преобразования (АЦП) 6, блок синхронизации 7, ПЭВМ типа IBM PC AT 8, печатающее устройство 9. АЦП представляет собой многофункциональное устройство NVL08, предназначенное для работы в составе ПЭВМ. Это восьмиразрядное устройство обеспечивает преобразование внешнего аналогового сигнала в формат данных ПЭВМ. Исследуемый образец обозначен позицией 10.

При падении индентора под действием силы тяжести в катушке индуктивности индуцируется э.д.с., величина которой зависит от расстояния между постоянным магнитом и катушкой, а также от скорости ин-

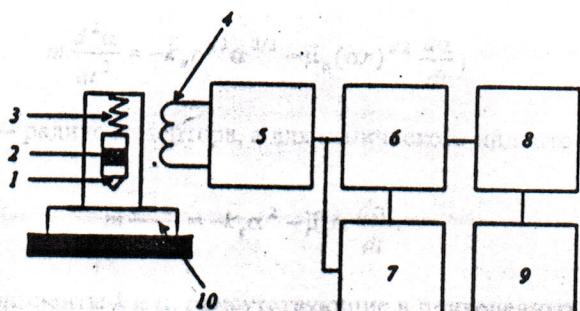


Рис. 1. Блок-схема установки динамического индентирования

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций, г. Москва, Россия.

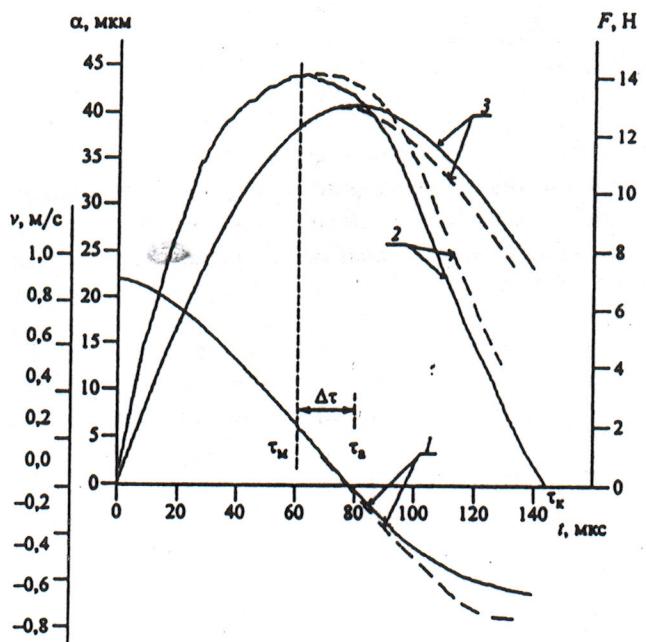


Рис. 2. Изменения скорости v (1), контактного усилия F (2) и глубины внедрения a (3) индентора в зависимости от времени: сплошные линии — эксперимент; пунктирные — расчет по модели

дентора. Но поскольку съем информации начинается по сигналу с блока синхронизации с момента касания индентором испытуемого образца, то в силу малости величины вдавливания можно считать, что сигнал в катушке индуктивности обусловлен только скоростью движения индентора и связан с ней прямо пропорциональной зависимостью:

$$U = K_v / v. \quad (1)$$

Скорость индентора в момент касания образца составляет $v_0 = \sqrt{2gh}$, где h — высота падения индентора; g — ускорение свободного падения. Измеряя величину U_0 , соответствующую этому моменту времени, можно легко определить коэффициент $K_v = \frac{U_0}{\sqrt{2gh}}$, а

следовательно, и скорость индентора v в любой момент времени удара:

$$v(t) = \frac{U(t)\sqrt{2gh}}{U_0}. \quad (2)$$

С момента поступления синхроимпульса АЦП начинает преобразовывать входной сигнал $v(t)$ с частотой синхронизации 500 МГц в массив выборок, который поступает в ПЭВМ для дальнейшей обработки. Дифференцируя массив скоростей $v(t)$, получаем массив ускорений $\dot{v}(t)$, после умножения которого на массу индентора получаем массив текущих контактных сил $F(t)$. После операции интегрирования массива $v(t)$ имеем массив перемещений, или глубин вдавливания $a(t)$, индентора в процессе удара.

На рис. 2 сплошными линиями показаны типичные кривые $v(t)$, $F(t)$ и $a(t)$, полученные при испытаниях вязкоупругого материала, в данном случае образца из поливинилхлорида (ПВХ) с пластификатором. Точка t_a на оси абсцисс обозначает конец активного этапа удара, т. е. время вдавливания индентора, а точка t_k — конец пассивного этапа удара, когда произошло нарушение контакта индентора с испытуемым образцом. Используя массивы $F(t)$ и $a(t)$ и избавившись от параметра t , легко получить силовую характеристику материала $F(a)$ (рис. 3), по которой можно определить такую важную характеристику материала, как жесткость. Однако для более полного и корректного анализа свойств вязкоупругого материала предпочтительней пользоваться механической моделью материала образца и на ее основании определять свойства материала. Так, для большого класса вязкоупругих материалов, в том числе и для ПВХ, можно использовать модель Кельвина — Фойгта [4]. Согласно этой модели, сопротивление материала внешнему воздействию аналогично поведению механической системы, состоящей из параллельно соединенных упругого элемента (пружины) и демпфера. Следует отметить, что, применив ту или иную механическую модель, можно лишь с известным приближением характеризовать реальное поведение материала при воздействии на него динамической нагрузки, однако в рамках принятой модели можно достаточно просто проводить количественную оценку свойств материала и последующую сортировку его по свойствам.

Для принятой здесь модели дифференциальное уравнение движения индентора имеет вид

$$m \frac{d^2 a}{dt^2} = -ka - \mu \frac{da}{dt}, \quad (3)$$

где a и m — глубина внедрения и масса индентора; k — жесткость упругого элемента; μ — коэффициент вязкости.

Формула (3) описывает поведение системы для случая плоского нагружения, когда площадь поверхности контакта остается неизменной. Для взаимодействия с переменной областью контакта могут быть записаны более сложные соотношения.

Для случая шарового индентора уравнение движения примет вид

$$m \frac{d^2 a}{dt^2} = -\tilde{k}_s r^{1/2} a^{2/3} - \tilde{\mu}_s (ar)^{1/2} \frac{da}{dt},$$

где r — радиус индентора, а для конического индентора —

$$m \frac{d^2 a}{dt^2} = -k_c a^2 - \tilde{\mu}_c a \frac{da}{dt}.$$

Коэффициенты k и μ , присутствующие в приведенных выше уравнениях, характеризуют соответственно

упругость и вязкость испытуемого материала. Они находятся из сопоставления полученной в ходе измерения кривой нагружения с решениями приведенных выше уравнений, найденных аналитически или с помощью численных процедур. Связь между значениями параметров k и μ для различных видов инденторов проще всего установить экспериментально. Влиянием силы тяжести можно пренебречь, так как реальное ускорение индентора в процессе взаимодействия намного превышает ускорение свободного падения.

Для плоского случая, описываемого формулой (3), решение уравнения движения может быть получено аналитически и проанализировано, поэтому рассмотрим его более подробно.

Общее решение уравнения (3) можно записать в виде

$$\alpha(t) = C_1 e^{-pt} \cos(\omega t) + C_2 e^{-pt} \sin(\omega t), \quad (4)$$

$$\text{где } p = \frac{\mu}{2m}, \omega = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{\mu}{2m}\right)^2}.$$

Из начальных условий $\alpha_{t=0} = 0, \frac{d\alpha}{dt}_{t=0} = v_0$ следует,

что $C_1 = 0, C_2 = \frac{v_0}{\omega}$. С учетом этого решение (4) будет иметь вид

$$\alpha(t) = \frac{v_0}{\omega} e^{-pt} \sin(\omega t). \quad (5)$$

Дифференцируя уравнение (5), находим выражение для скорости индентора

$$\frac{da}{dt} = v(t) = -\frac{v_0 p}{\omega} e^{-pt} \sin(\omega t) + v_0 e^{-pt} \cos(\omega t), \quad (6)$$

после дифференцирования которого получим формулу для ускорения

$$\begin{aligned} \frac{d^2\alpha}{dt^2} &= w(t) = \\ &= \left(\frac{v_0 p^2}{\omega} - \omega v_0 \right) e^{-pt} \sin(\omega t) - 2v_0 p e^{-pt} \cos(\omega t). \end{aligned} \quad (7)$$

Уравнения (5 – 7) описывают движение индентора на временном интервале $0 + \tau_k$, равном половине периода колебаний с частотой ω , т. е. действие сил упругости и вязкости в течение активного и пассивного этапов соударения одинаково.

Характер изменения глубины внедрения α и скорости v движения индентора в процессе взаимодействия, а также действующей на него силы, связанной с ускорением соотношением $w = F/m$, представлены, как уже отмечено, на рис. 2. Сплошными линиями здесь обозначены данные, взятые из эксперимента, в ходе которого непосредственно измеряется скорость движения индентора как функция от времени, а глуби-

на внедрения и ускорение индентора рассчитываются на основании кривой изменения скорости после проведения операции фильтрации шумов.

Из кривых $v(t)$ и $F(t)$, приведенных на рис. 2, видно, что максимум контактной силы не совпадает с моментом достижения максимального вдавливания и нулевой скорости, характеризующих окончание активного этапа удара, что говорит о вязком характере процесса вдавливания индентора. Кроме того, из кривой $\alpha(t)$ следует, что в момент окончания удара τ_k имеется остаточная деформация. Однако, как следует из принятой нами модели, основным свойством которой является упругое последействие, эта деформация должна восстанавливаться уже после окончания удара. Отсутствие остаточной деформации подтверждается и данными исследований на микроскопе.

Значения k и μ можно выразить аналитически через величины, измеряемые в ходе эксперимента. Опыт показал, что наиболее устойчивые результаты могут дать такие величины, как w_m — максимальное значение ускорения индентора и Δt — интервал между точкой достижения пика ускорения и точкой поворота. Эти величины не зависят от особенностей, связанных с моментами начала и конца взаимодействия (неровности материала, трудности точного определения момента контакта и др.). Первая из них характеризует прежде всего упругость материала, вторая — его вязкость. С помощью уравнений (6) – (7) можно выразить значения $t_1 = \tau_m$ в момент достижения максимального ускорения и $t_2 = \tau_a$ в момент достижения точки поворота:

$$\tau_m = \frac{1}{\omega} \arctan \left(\frac{\omega \omega^2 - 3p^2}{p 3\omega^2 - p^2} \right), \quad (8)$$

$$\tau_a = \frac{1}{\omega} \arctan \left(\frac{\omega}{p} \right).$$

Теперь построим систему из двух нелинейных уравнений относительно неизвестных ω и p , первое из которых получим, подставив значение τ_m в уравнение (7) и положив $w = w_m$, а второе — подставив соотношения (8) в выражение $\Delta t = \tau_a - \tau_m$. Полученная таким образом система может быть решена численно (например, методом итераций) при заданных w_m и Δt относительно ω и p , через которые, согласно формуле (5), можно выразить характеристики материала k и μ .

С учетом найденных значений ω и p с помощью уравнений (5) – (7) строим зависимости $v(t)$, $F(t)$ и $\alpha(t)$, которые показаны пунктирными линиями на рис. 2. Видно, что на активном этапе удара имеет место хорошее совпадение экспериментальных и полученных с помощью модели кривых, а на пассивном этапе наблюдаются значительные расхождения. Как показали исследования, эти расхождения объясняются конструктивными особенностями ударной системы, а

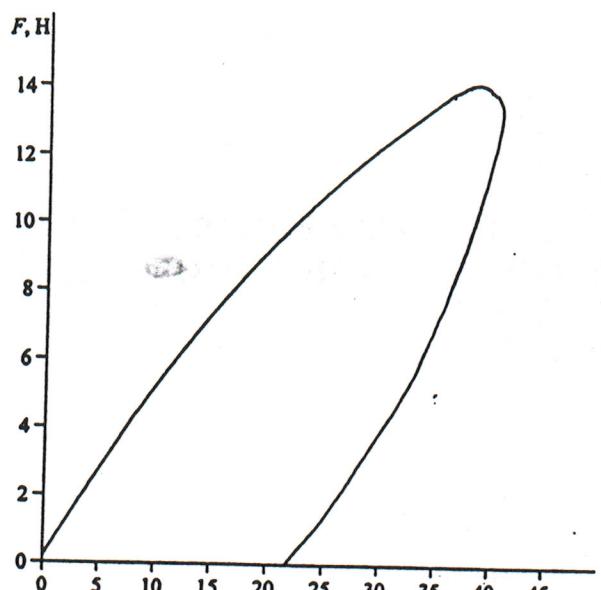


Рис. 3. Зависимость контактного усилия F от глубины внедрения a .

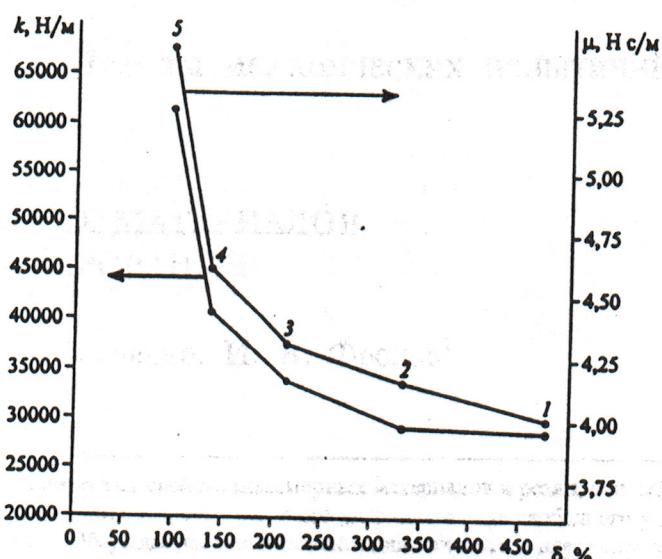


Рис. 4. Зависимость жесткости k и вязкости μ от величины относительного удлинения при разрыве δ для ПВХ оболочек

также несовершенством расчетной схемы. Хорошее совпадение данных на активном этапе удара позволяет сделать вывод о том, что выбранная модель соответствует испытуемому материалу и определенные параметры k и μ являются объективными параметрами.

С помощью установки динамического индентирования (см. рис. 1) были исследованы свойства ПВХ оболочек изоляции силового кабеля, использующегося на атомных электростанциях. При длительном воздействии радиационного облучения свойства материала претерпевают сложные изменения, приводящие в конечном итоге к разрушению. Поэтому вопрос контроля состояния материала имеет важное практическое значение.

Испытания проводились на пяти образцах ПВХ оболочек кабелей, которые подвергались радиационному воздействию жестким гамма-излучением с мощностью дозы 10 рад/с: образец 1 имел исходную структуру материала, для образцов 2–5 суммарная доза облучения составила соответственно 7, 30, 50, 100 Мрад. Кроме того, из перечисленных оболочек кабеля были вырезаны специальные образцы, которые испытывались на растяжение на разрывных машинах типа «Инстрон». При проведении экспериментов алгоритм расчета жесткости и вязкости заключался в обработке первичной информации $v(t)$ и определении параметров индентирования, необходимых для вычисления k и μ с помощью выражений, полученных на

основе принятой модели Кельвина – Фойгта. На рис. 4 приведены зависимости коэффициентов k и μ перечисленных выше образцов от величины относительных удлинений при разрыве δ . Каждые точки, приведенные на графике, являлись средним значением δ измерений на образце. Как видно, между величинами k , μ и δ существует надежная корреляционная зависимость, имеющая экспоненциальный характер. Полученная зависимость отражает процессы изменения структуры полимеров, происходящие под действием радиационного облучения, приводящие к снижению пластических свойств и повышению хрупкости материала.

С помощью рассматриваемой установки можно проводить периодическую экспресс-оценку свойств изделий из полимерных материалов, находящихся в условиях агрессивных сред, длительного температурного, радиационного и ультрафиолетового облучения, с целью своевременной их замены и предотвращения аварийных ситуаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Резниковский М. М., Лукомская А. И. Механические испытания каучуков и резин. — М.: Химия, 1968. — 499 с.
2. Малкин А. Я., Аскадский А. А., Коврига В. В. Методы измерения механических свойств полимерных материалов. — М.: Химия, 1978. — 340 с.
3. Епифанов В. П., Кудря В. П. / Заводская лаборатория. 1985. Т. 51. № 2. С. 64–66.
4. Гольберг И. И. Механическое поведение полимерных материалов. — М.: Химия, 1970. — 190 с.