АКАДЕМИЯ НАУК ЛАТВИЙСКОЙ ССР
ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ ПОЛИМЕРОВ

На правах рукописи

ЯНСОН ЮРИЙ ОСВАЛЬДОВИЧ

Определение спектров времен релаксации и рассеянной энергии ряда жестких полимерных материалов при ударном нагружении

(01.02.04 — механика деформируемого твердого тела)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

РИГА 1973

АКАДЕМИЯ НАУК ЛАТВИЙСКОЙ ССР
ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ ПОЛИМЕРОВ

На правах рукописи

ЯНСОН ЮРИЙ ОСВАЛЬДОВИЧ

Определение спектров времен релаксации и рассеянной энергии ряда жестких полимерных материалов при ударном нагружении

(01.02.04 — механика деформируемого твердого тела)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

РИГА 1973

Резкое расширение производства синтетических смол и пластических масс поставило перед конструкторами ряд серьезных задач по созданию методов расчета изделий и конструкций из полимерных материалов. Существующие инженерные расчеты условно можно разделить на две большие группы: расчеты на прочность и расчеты на жесткость. В свою очередь в расчетах на жесткость первостепенным является вопрос выбора закона деформирования — то есть связи между напряжением и деформацией. Одной из отличительных особенностей полимерных материалов является богатое разнообразие механических релаксационных процессов, поэтому задача нахождения связи $\sigma \sim \varepsilon$ может быть решена только в рамках какой либо из теорий, учитывающей реономные свойства полимерных материалов.

К настоящему времени успешные исследования в этой области ведутся с использованием линейной теории вязко-упругости, значительный вклад в развитии которой внесли Алфрей Т., Гросс Б., Бленд Д. Р., Ферри Дж., Ишлинский А. Ю., Работнов Ю. Н., Ржаницын А. Р., Розовский М. И. и ряд других авторов. Механическое поведение среды в теории линейной вязко-упругости описывается заданием так называемых вязко-упругих функций: спектров времен релаксации и запаздывания; функций ползучести и релаксации; комплексного модуля упругости. Экспериментальное определение этих функций требует применения разнообразных методов. К настоящему времени основными экспериментальными методами определения вязко-упругих функций являются опыты на ползучесть, релаксацию и механические колебания. Однако все эти методы не лишены определенных недостатков. Опыты на ползучесть ограничены в области малых времен инерцией нагружающей и регистрирующей систем до величины порядка 0.01 сек. При этом выпадает из рассмотрения значительная часть спектров времен релаксации полимерных материалов, которая должна находится в области малых времен. В опытах на релаксацию напряжения интервал времени определения релаксационного модуля ограничен продолжительному спектру, получаем выражение для вычисления рассеянной энергии в виде:

$$\psi = \int_0^\infty \frac{H(\tau)}{\tau^2} f(t, \tau) d\tau, \qquad (4)$$

где обозначено

$$f(t, \tau) = \int_0^t [e^{-t/\tau} \int_0^t \dot{\varepsilon}(t) e^{t/\tau} dt]^2 dt.$$

Для инженерных расчетов выражение (4) мало пригодно, так как требует сложных вычислений даже в наиболее простых случаях, например, если спектр времен релаксации можно аппроксимировать прямоугольником и скорость деформации постоянна. Поэтому следует считать перспективным метод оценок в виде неравенств, который был предложен Мартином и Понтером для определения нижней границы энергии деформирования вязко-упругого тела, модель которого состоит из n последовательно соединенных элементов Кельвина. Однако исходные неравенства, предложенные авторами не применимы для модели линейного вязко-упругого тела с непрерывным спектром времен релаксации. Поэтому в данной работе исходные неравенства были сформулированы таким образом, чтобы получить оценки полной и рассеянной энергии для вязко-упругого тела с непрерывным спектром времен релаксации. Исходя из очевидных неравенств

$$\eta_l (\dot{c}_l - \dot{\varepsilon}_l^b)^2 \geqslant 0 \qquad (5)$$

$$E_l (K_l - \varepsilon_l^y)^2 \geqslant 0,$$

где $c(t)$ и $k(t)$ произвольные величины, которым необязательно придавать какой либо физический смысл, строится исходное неравенство. Все дальнейшие преобразования проводятся с целью в левой части исходного неравенства получить полную (или рассеянную) энергию деформирования. Показано, что определяя $c(t)$ и $k(t)$ из условия максимума всей правой части неравенства, получаем оценку, содержащую упругую и вязкую составляющие полной деформации. Поэтому, следуя идеям Мартина и Понтера, произвольные величины $c(t)$ и $k(t)$ определяются минимизируя отдельные группы слагаемых правой части неравенства с таким расчетом, чтобы конечный результат не зависел бы от истории нагружения (или деформирования). После всех преобразований получаем для полной энергии и скорости рассеивания соответственно:

$$w \geqslant \varepsilon^2 \int_0^\infty \frac{H(\tau)}{t+2\tau} d\tau + \frac{1}{2} \varepsilon^2 E_\infty \qquad (6)$$

$$\varphi \geqslant \frac{\sigma^2}{\int_0^\infty H(\tau) d\tau}. \qquad (7)$$

Зная вязко-упругие свойства материала, которые должны быть заданы в виде спектра времен релаксации, и деформацию (или напряжение) в данный момент времени, из выражений (6) и (7) можно определить нижнюю границу полной и рассеянной энергии.

В главе 1 также приводится алгоритм вычисления потенциальной энергии и скорости рассеяния для анизотропного линейного упруго-вязкого тела с дискретным спектром времен релаксации. Показано, что на коэффициенты уравнения состояния, которое принято в виде

$$\sigma_i = a_{ij}\varepsilon_j + \int_{-\infty}^t \sum_s b_{ij}^s e^{-\frac{t-\tau}{n_s}} \dot{\varepsilon}_j(\tau) d\tau + c_{ij}\dot{\varepsilon}_j \qquad (8)$$

накладываются определенные ограничения. Можно показать, что при определенных значениях b_{ij}^s и n_s в решении (8) появляются sin и cos функции при $\sigma_i = \text{const}$. Оказывается, что выполнение положительности двух квадратичных форм — потенциальной энергии и скорости рассеивания дает достаточное условие для непоявления комплексных и положительных корней в резольвентах решений (8). Для этого должно соблюдаться условие

$$(b_{ij}^s)^2 \leqslant b_{ii}^s\, b_{jj}^s \qquad (9)$$

(по индексам i и j суммирования нет).

На примерах показано, что для изотропного тела в одномерном случае для простейших моделей — тело Максвелла и тело Максвелла-Томсона получаем выражения потенциальной энергии и скорости рассеивания, совпадающие с полученными в других работах. Дан алгоритм вычисления потенциальной энергии и скорости рассеивания в случае, когда выполняется условие (9) для плоской задачи ортотропного вязко-упругого тела

В главе 2 приводится методика испытаний жестких полимерных материалов в широком диапазоне скоростей деформаций. Каждый вид испытаний можно разбить на два интервала скоростей — область малых скоростей деформаций — порядка $10^{-3} \div 10^{-4}$ 1/сек (статика) и область средних скоростей деформаций — порядка $10^{-1} \div 0.5.10^{2}$ 1/сек (динамика). Испытания в области малых скоростей проводились на стандартной разрывной машине УМ-5. Динамические испытания на растяжение проводились на ротационном копре РСО, а испытания на сжатие — на специально сконструированном стенде с падающим грузом.

Размеры и форма образцов выбирались такими, чтобы можно было бы проводить испытания во всем диапазоне скоростей деформации на образцах одной формы. Для испытаний на сжатие это были образцы в виде прямоугольных призм с основанием 10×10 мм и высотой 64 мм. В случае растяжения размеры и форму образцов следует определить учитывая конструктивные особенности машин для динамического нагружения — в данном случае ротационного копра РСО. Предварительными опытами было установлено, что наиболее подходящим для растяжения являются образцы в виде двойной лопатки. Максимальная длина образца 75 мм, а поперечные сечения и база измерений для разных материалов принимались с учетом максимальной мощности копра РСО:

а) для текстолитовых композитных материалов, обладающих сравнительно невысокой прочностью, а также для всех трикотажных композитных материалов: ширина выбиралась равной 16 мм, толщина 10 мм, длина базы измерений 25 мм;

б) для стеклопластиков, обладающих высокой прочностью, ширина 6 мм, толщина 3 мм, база измерений 15 мм.

Деформации образцов измерялись тензодатчиками. В случае статического нагружения для регистрации использовался цифровой тензометрический мост ЦТМ-3 с печатающим устройством ЦПМ-1. При динамических испытаниях был использован тензометрический прибор Т-11м. и два однолучевых запоминающих осциллографа СI-29.

Регистрация нагрузок в статических испытаниях велась по показаниям ричажного динамометра стандартной машины УМ-5. Для регистрации силы в динамических испытаниях был использован разработанный в ИМП АН ЛатвССР пьезоэлектрический динамометр. Таким образом, в динамических испытаниях можно было зарегистрировать две из следующих трех

зависимостей: «сила-время», «деформация-время», «сила-деформация».

Во второй главе приведены результаты испытаний трех групп армированных полимерных материалов — стеклотекстолита, асботекстолита и стеклотрикотажа в виде зависимостей секущего модуля (на базе 0,2% деформации) и разрушающего напряжения от логарифма скорости деформации. Результаты экспериментов показали существенную зависимость прочностных и деформативных свойств исследованных материалов от скорости деформации. Полученные зависимости $E \sim \lg\varepsilon$ и $\sigma_p \sim \lg\varepsilon$ для стеклотекстолита согласуются с линейным законом в полулогарифмических координатах.

В главе 3 приводится расчет релаксационных спектров и рассеянной энергии по результатам испытаний в широком диапазоне скоростей деформаций. Очевидно, что аппроксимацию экспериментальной кривой R^1 (3) можно провести разными функциями. Для стеклотрикотажа (по утку) рассмотрены некоторые варианты аппроксимации кривой R^1, полученной из экспериментов на сжатие. Соответствующие разным аппроксимациям кривой R^1 спектры времен релаксации отличаются незначительно, что в дальнейшем используется при выборе наиболее подходящего вида релаксационного спектра для данной задачи, исходя из соображения уменьшения вычислительных работ. Для проверки достоверности, построенных из квазистатических экспериментов релаксационных спектров, были использованы опыты на механические колебания. Полученная из эксперимента зависимость $E \sim \lg\omega$ сравнивалась с зависимостью, рассчитанной по известному спектру времен релаксации. Сравнение показало удовлетворительное совпадение зависимости $E \sim \lg\omega$, полученной двумя разными методами. В главе 3 дается расчет зависимости $\sigma \sim \varepsilon$ для стеклотрикотажа по утку, где использован спектр времен релаксации, построенный по результатам экспериментов главы 2. Рассчитанная кривая $\sigma \sim \varepsilon$ сравнивается с экспериментальной, полученной на сжатие с разгрузкой. Расчет показал применимость построенного спектра для описания кривой $\sigma \sim \varepsilon$ стеклотрикотажа. На том же примере показано, что применение спектра времен релаксации в виде прямогуольника дает зависимость $\sigma \sim \varepsilon$ мало отличающуюся от полученной с использованием спектра более сложного вида. В заключении главы 3, используя результаты экспериментов на сжатие с разгрузкой, показано хорошее соответствие оценки рассеянной энергии результатам, полученным на сжимающий удар. Полученное соответствие позволяет рекомендовать оценку для приближенного определения нижней границы рассеянной энергии при динамическом нагружении.

Основные результаты диссертации заключаются в следующем:

1. Для модели вязко-упругого тела, состоящей из паралельно соединенных элементов Максвелла, разработан метод вычисления спектров времен релаксации из результатов на одномерное нагружение в широком диапазоне скоростей деформации.

2. Получено точное значение величины рассеянной энергии при произвольном законе деформирования и выведены неравенства, дающие нижнюю оценку значениям полной, рассеянной и потенциальной энергиям деформирования тела с непрерывным спектром времен релаксации.

3. Дан алгоритм вычисления потенциальной энергии и скорости рассеяния для анизотропного линейного вязко-упругого тела с дискретным спектром времен релаксации при произвольном законе нагружения. Даются ограничения на коэффициенты уравнений связи $\sigma \sim \varepsilon$, накладываемые положительной определенностью потенциальной энергии и скорости диссипации.

4. Разработана методика экспериментального определения зависимости $E \sim \dot{\varepsilon}$ и $\sigma_p \sim \dot{\varepsilon}$ для жестких полимерных материалов в широком диапазоне скоростей деформаций при растяжении и сжатии. Экспериментально полученные зависимотси $E \sim \dot{\varepsilon}$ и $\sigma_p \sim \dot{\varepsilon}$ для стеклотекстолита согласуются с линейным законом в полулогарифмических координатах.

5. Доказано соответствие построенных по результатам квазистатических испытаний релаксационных спектров результатам на механические колебания для ПНП.

6. Получена нижняя оценка величины рассеянной энергии, применимость которой для исследованных материалов проверена непосредственно.

Основные результаты диссертации отражены в статьях:

1. Тамуж В. П., Янсон Ю. О. «Термодинамический анализ уравнений линейного упруго-вязкого анизотропного тела», Механика полимеров, 1967, № 2.

2. Кокошвили С. М., Тамуж В. П., Янсон Ю. О. «Вычисление релаксационных спектров по результатам динамических испытаний», Механика полимеров, 1971, № 2.