

**ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЯЗКО-УПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ
ПРИ НЕГАРМОНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

Л. С. Присс

Полимеры являются одним из наиболее типичных представителей класса вязко-упругих материалов. Изучению их динамических свойств посвящены многочисленные исследования, как экспериментальные, так и теоретические. Это неудивительно — многие полимерные материалы идут на изготовление изделий, подвергающихся в процессе эксплуатации многократному периодическому нагружению. При этом в ряде случаев (например при выборе шинных резин) динамические свойства являются одним из основных факторов, определяющих техническую ценность материала.

Однако во всех случаях, за небольшим исключением (для резин, в частности, см. работы [1—5]), изучение динамических свойств производилось на режиме гармонического нагружения, хотя такой режим на практике осуществляется сравнительно редко. Но и в тех работах, в которых динамические свойства определялись при импульсном нагружении, не было сделано каких-либо попыток выяснить влияние временного характера нагружения на эти свойства. Не было обращено внимания и на теоретический анализ этого вопроса.

Нам хочется обратить внимание на большой практический интерес, который представляет изучение влияния временного характера нагружения на динамические свойства полимерных материалов. В первую очередь это относится к материалам, идущим на изготовление пневматических и массивных шин (т. е. к резине и корду), подвергающимся в процессе эксплуатации периодическим импульсным нагрузкам.

В настоящей работе сделана попытка выяснить влияние основных параметров негармонического нагружения на динамические свойства вязко-упругих материалов. Проведенный анализ основывается на моделях, обычно применяемых для описания механического поведения высокополимеров.

Прежде чем переходить к изложению основного материала, условимся о терминологии, которой будем пользоваться в дальнейшем. На рис. 1 изображено несколько типичных примеров негармонического периодического изменения какой-либо величины f (деформации или напряжения) со временем. Во всех приведенных случаях среднее значение f за период T равно нулю. Это не нарушает общности рассуждений, так как всегда можно считать, что на периодическое изменение f налагается некоторая постоянная слагающая.

Интервалы времени τ_1 и τ_2 назовем длительностью импульсов, а промежутки времени τ_3 и τ_4 , в течение которых $f = 0$, — паузами. Максимальное значение f за период — f_0 будем называть амплитудой импульса, а df/dt — крутизной фронта импульса. Будем различать также передний и задний фронты импульса, соответствующие увеличению и уменьшению f по абсолютной величине. Если величина f сохраняет некоторое время постоянное значение, то будем говорить, что импульс имеет плато.

При общей классификации режимов импульсного нагружения прежде всего следует обратить внимание на симметрию изменения f со временем.

Если отрицательные импульсы имеют ту же форму, что и положительные, т. е. если при изменении знака f характер импульсного изменения f сохраняется, то такой режим будем называть симметричным по знаку. Если импульсы имеют форму, симметричную относительно их максимальных значений, то такой режим назовем симметричным по времени, но не симметричным по знаку; режим a (рис. 1), наоборот, — симметричным по знаку, но не симметричным по времени, и, наконец, режим g — не симметричным и по знаку и по времени.

Дальнейшая классификация может быть проведена по отношению длительности пауз, по отношению длительности импульса к длительности пауз, по характеру изменения крутизны фронта, по величине плато и т. д. Вследствие многообразия импульсных режимов детальное описание какого-либо индивидуального режима требует задания большого числа параметров.

Заметим, что величину периодической импульсной деформации (или напряжения) неудобно характеризовать амплитудой, так как для режимов, не симметричных по времени, это понятие теряет смысл ввиду

Рис. 1. Различные типы негармонических режимов:

a — режим, симметричный по знаку и по времени; b — симметричный по времени и не симметричный по знаку; c — симметричный по знаку и не симметричный по времени; d — не симметричный по времени и по знаку

того, что максимальные и минимальные значения деформации (отсчитываемые от среднего значения деформации за цикл¹) имеют различные абсолютные значения. Более удобной характеристикой величины динамической деформации (или напряжения) является ее среднее значение за положительную или отрицательную половину цикла. Окончательно этот вопрос будет решен в конце статьи после рассмотрения зависимости динамических показателей от амплитуды деформации и от ее среднего значения.

Условимся теперь о величинах, которыми будем характеризовать динамические свойства вязко-упругих материалов при негармоническом нагружении. Вспомним, как вводятся эти показатели для гармонического режима. Если вязко-упругое тело испытывает синусоидальную деформацию

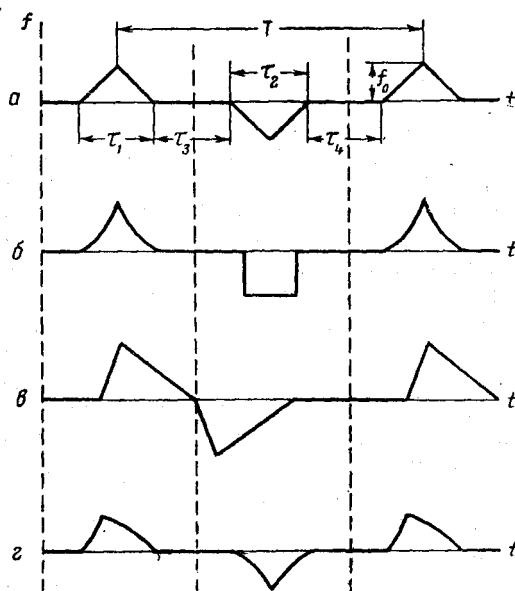
$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin \omega t, \quad (1)$$

то напряжение в нем изменяется по закону

$$\sigma(t) = E' \varepsilon_0 \sin \omega t + E'' \varepsilon_0 \cos \omega t = \varepsilon_0 \sqrt{E'^2 + E''^2} \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

Первое слагаемое в (2) определяет упругую, а второе — вязкостную реакцию материала. Для характеристики упругих свойств материала в динамических условиях пользуются либо полным динамическим модулем — $\sqrt{E'^2 + E''^2}$, либо действительной частью комплексного динами-

¹ Такой выбор нулевого значения деформации (напряжения) определяется тем, что в материалах, подчиняющихся принципу суперпозиции, не происходит накопления квазистаточных деформаций при среднем значении деформации, равном нулю.



ческого модуля — E' ¹. Выбор того или иного показателя определяется условиями, в которых нужно охарактеризовать жесткость образца или изделия. Так, если образец испытывает гомогенную деформацию (например периодическое растяжение полоски), то его жесткость будет определяться отношением амплитуды напряжения к амплитуде деформации, т. е. полным динамическим модулем. Если же материал непрерывно проходит через зону деформации, а распределение деформаций по образцу не меняется с течением времени (например, вращение изогнутого круглого стержня), то жесткость образца определяется отношением амплитуды слагающей напряжения, находящейся в фазе с деформацией, к амплитуде деформации, т. е. действительной составляющей комплексного модуля $-E' \cdot E'$ пропорционально упругой энергии, запасенной в единице объема материала при изменении деформации от нулевого до максимального значения.

В качестве показателей механических потерь в материале пользуются тангенсом угла сдвига фаз между напряжением и деформацией

$$\operatorname{tg} \varphi = E''/E', \quad (3)$$

мнимой составляющей комплексного модуля E'' и модулем внутреннего трения K , определяемым как отношение энергии, рассеянной за цикл в единице объема материала, к квадрату амплитуды деформации

$$K = \frac{\Delta W}{\varepsilon_0^2} = \pi E'' = \pi E' \operatorname{tg} \varphi. \quad (4)$$

Последние два равенства в (4) справедливы для синусоидального режима независимо от того, каким уравнением состояния описываются свойства рассматриваемой вязко-упругой среды.

Для негармонического режима понятие полного динамического модуля теряет смысл, так как в этом случае напряжение и деформация изменяются со временем по различным законам. Правда, для характеристики жесткости гомогенно деформируемого образца можно воспользоваться отношением максимальных значений импульсов напряжения и деформации, но такое определение отличается от того, которое дается формулой (2), и величина этого отношения не связана простыми соотношениями с E' , которое, как и при синусоидальном режиме, определяется отношением слагающей напряжения, находящейся в фазе с деформацией, к величине деформации и пропорционально упругой энергии, запасенной в образце. В большинстве практических случаев жесткость образцов и изделий определяется величиной E' и в дальнейшем мы будем пользоваться только этим показателем.

Понятие угла сдвига фаз для негармонического режима становится неопределенным вследствие различия зависимостей $\varepsilon(t)$ и $\sigma(t)$. Мнимая часть комплексного модуля E'' также не может быть использована для характеристики потерь, так как простая связь между ΔW и E'', E' и E' , определяемая для синусоидального режима соотношением (4), нарушается при негармоническом режиме. Что же касается модуля внутреннего трения, то, поскольку он определяется безотносительно к характеру нагружения, он может быть использован в качестве показателя механических потерь и при негармоническом режиме.

Для выяснения влияния различных типов негармонических режимов нагружения на динамические свойства вязко-упругих материалов рассмотрим две модели: трехэлементную модель (рис. 2, a) и модель, состоящую из бесконечного числа параллельно соединенных максвелловых эле-

¹ Терминология связана с применением при расчетах функций комплексного переменного, вместо тригонометрических функций.

ментов (рис. 2, б). Первая является одной из простейших моделей, используемых для описания механических свойств различных вязко-упругих материалов. Полагая в выведенных для нее формулах $E_\infty = 0$ или $E_1 = \infty$, получим соответствующие результаты для двух других простейших моделей, описывающих свойства вязко-упругих тел — для моделей Максвелла и Кельвина. Многоэлементная модель позволяет правильно отразить свойства реальных вязко-упругих тел. В частности, если предположить, что распределение времен релаксации описывается прямоугольной гиперболой, то E' и K , вычисленные для этого случая, оказываются не зависящими от частоты при гармоническом режиме. Такая закономерность в достаточно широком частотном интервале наблюдается для большинства реальных резин.

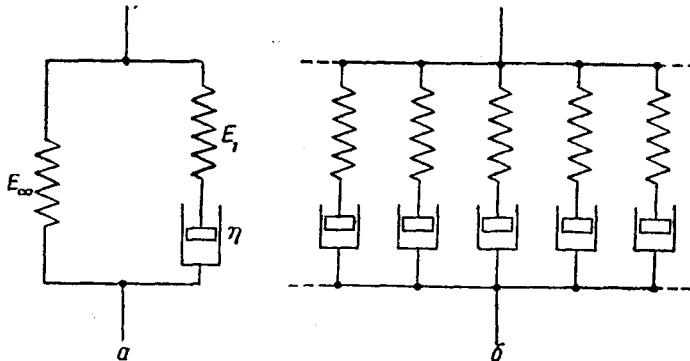


Рис. 2. а — трехэлементная модель; б — бесконечная система параллельно соединенных максвелловых элементов

Как известно, поведение трехэлементной модели описывается уравнением

$$\dot{\sigma} = (E_1 + E_\infty) \dot{\varepsilon} - \frac{\sigma - E_\infty \varepsilon}{\tau}, \quad (5)$$

где

$$\tau = \eta / E_1.$$

Динамические характеристики для гармонического режима имеют вид:

$$E' = E_\infty + \frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} E_1 \quad (6)$$

и

$$K = \frac{\pi \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} E_1. \quad (7)$$

Предположим теперь, что деформация модели изменяется периодически по некоторому негармоническому закону $\varepsilon(t)$. Допустим, что $\varepsilon(t)$ может быть разложено в ряд Фурье:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \sin n\omega t + b_n \cos n\omega t), \quad (8)$$

где ε_0 — амплитуда негармонической деформации. Тогда сила, действующая на модель, будет изменяться по закону

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \sum_{n=1}^{\infty} (c_n \sin n\omega t + d_n \cos n\omega t). \quad (9)$$

Пользуясь уравнением (5), легко найти, что коэффициенты разложений (8) и (9) связаны соотношениями

$$\left. \begin{aligned} c_n &= \left(E_\infty + \frac{E_1 n^2 \omega^2 \tau^2}{1 + n^2 \omega^2 \tau^2} \right) a_n - \frac{E_1 n \omega \tau}{1 + n^2 \omega^2 \tau^2} b_n, \\ d_n &= \left(E_\infty + \frac{E_1 n^2 \omega^2 \tau^2}{1 + n^2 \omega^2 \tau^2} \right) b_n + \frac{E_1 n \omega \tau}{1 + n^2 \omega^2 \tau^2} a_n. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Согласно данному выше определению находим:

$$K = \frac{\Delta W}{\varepsilon_0^2} = \frac{1}{\varepsilon_0^2} \int_0^T \sigma \varepsilon dt = \pi \sum_{n=1}^{\infty} n (a_n d_n - b_n c_n) = \pi E_1 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n^2 + b_n^2}{1 + n^2 \omega^2 \tau^2} n^2 \omega \tau. \quad (11)$$

Разделим напряжение $\sigma(t)$ на две составляющие, первая из которых — $\sigma'(t)$ находится в фазе с деформацией $\varepsilon(t)$, а вторая — $\sigma''(t)$ совпадает по фазе со скоростью деформации $\dot{\varepsilon}(t)$. Можно показать, что такое разделение может быть сделано для любой модели, состоящей из упругих и вязких элементов. Тогда

$$\int_0^T \sigma'' \dot{\varepsilon} dt = 0 \quad (12)$$

и

$$E' = \frac{\int_0^T \sigma \varepsilon dt}{\int_0^T \varepsilon^2 dt} = \frac{\int_0^T (\sigma' \varepsilon + \sigma'' \dot{\varepsilon}) dt}{\int_0^T \varepsilon^2 dt} = E_\infty + E_1 \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2 \omega^2 \tau^2}{1 + n^2 \omega^2 \tau^2} (a_n^2 + b_n^2)}{\sum_{n=1}^{\infty} (a_n^2 + b_n^2)}. \quad (13)$$

Перейдем теперь к рассмотрению многоэлементной модели, — изображенной на рис. 2, б. Предположим, что распределение времен релаксации для этой модели описывается прямоугольной гиперболой

$$E(\tau) d\tau = A \frac{d\tau}{\tau}. \quad (14)$$

Тогда динамический модуль

$$E' = A \int_0^{\infty} \frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} \frac{d\tau}{\tau} = C \quad (15)$$

и модуль внутреннего трения

$$K = \pi A \int_0^{\infty} \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \frac{d\tau}{\tau} = \frac{A \pi^2}{2} \quad (16)$$

не зависят от частоты. Как уже говорилось, такая модель достаточно хорошо описывает свойства большинства реальных резин в не очень широком частотном интервале. Заметим, что интеграл в формуле (15) — расходящийся. Но мы будем предполагать, что он имеет конечное значение C/A . В действительности же распределение времен релаксации для резин имеет характер, несколько отличный от распределения (14), вследствие чего интеграл в формуле (15) оказывается сходящимся, а E' и K слабо зависящими от частоты. Однако, ради упрощения расчетов, мы ограничиваемся принятым приближением.

Если многоэлементная модель подвергается периодической негармонической деформации (8), то сила, действующая на модель, будет изменя-

тъся по закону

$$\sigma(t) = \sqrt{C^2 + \frac{A^2\pi^2}{4}} \varepsilon_0 \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \sin(n\omega t + \varphi) + b_n \cos(n\omega t + \varphi)], \quad (17)$$

где

$$\tan \varphi = \frac{A\pi}{2C} \quad (18)$$

— величина постоянная для всех гармоник.

Вычислим динамические характеристики для этой модели:

$$K = \frac{1}{\varepsilon_0^2} \int_0^T \sigma \dot{\varepsilon} dt = \frac{A\pi}{4} \sum_{n=1}^{\infty} n(a_n^2 + b_n^2); \quad (19)$$

$$E' = \frac{\int_0^T \sigma \dot{\varepsilon} dt}{\int_0^T \varepsilon^2 dt} = \sqrt{C^2 + \frac{A^2\pi^2}{4}} \cdot \cos \varphi = C. \quad (20)$$

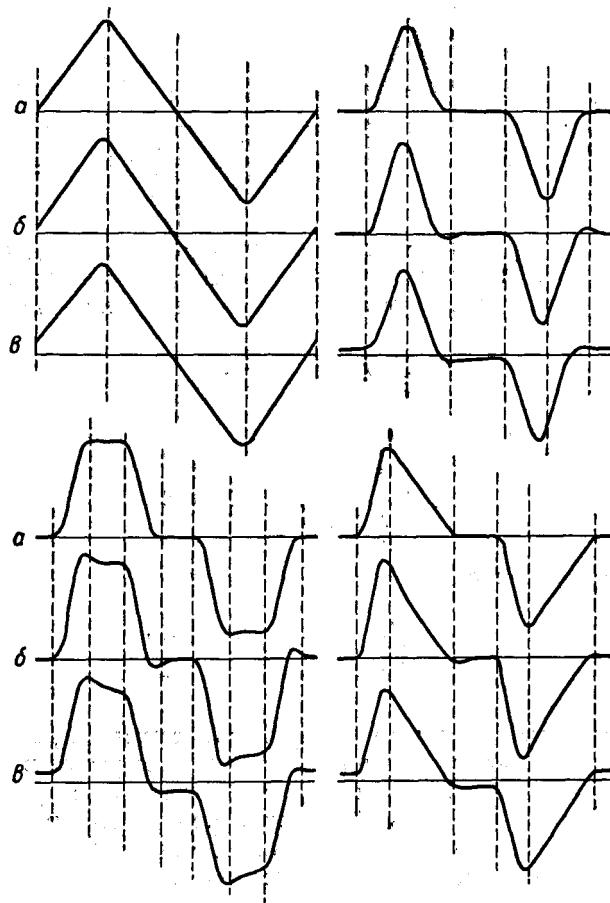


Рис. 3. Зависимости деформации и напряжения от времени при различных негармонических режимах:

a — деформация; *b* — напряжение, вычисленное по формуле (9)

при $E_\infty = E_1 = 1,0$ и $\omega t = 0,1$; *c* — напряжение, вычисленное по

формуле (17) при $\sqrt{C^2 + \frac{A^2\pi^2}{4}} = 1,0$ и $\varphi = 10^\circ$

Таким образом оказывается, что динамический модуль, согласно данному выше определению, не зависит от режима нагружения.

Анализ соотношений (11), (13) и (19) не позволяет сделать каких-либо определенных выводов о том, как динамические показатели зависят от характера негармонического нагружения. Точно так же, сопоставляя соотношения (5), (6) и (17), трудно представить, каким образом изменяется временная зависимость напряжения для различных типов негармонического нагружения. Поэтому рассмотрим несколько конкретных случаев.

На рис. 3 показаны зависимости $\sigma(t)$, вычисленные по формулам (9) и (17) (обозначены соответственно b и v), для различных случаев негармонического изменения деформации (a). При вычислении этих зависимостей E_∞ и E_1 (для трехэлементной модели) принимались равными 1,0 и $\omega\tau = 0,1$ (см. формулы (10)), а для многоэлементной модели $\sqrt{C^2 + \frac{1}{4}A^2\pi^2} = 1$ $\varphi = 10^\circ$. Принятые значения $\omega\tau$ и φ близки к соответствующим значениям для реальных резин при наиболее распространенных условиях испытаний или эксплуатации. В разложениях (8), (9) и (17), в зависимости от сходимости рядов, мы ограничивались гармониками от седьмого до одиннадцатого порядка.

При рассмотрении приведенных данных следует обратить внимание на два факта: а) симметричному по времени изменению деформации соответствует не симметричное по времени изменение напряжения, причем асимметрия выражена сильнее при наличии пауз и плато импульса; б) угол сдвига фаз между максимальными значениями деформации и напряжения меньше, чем для отдельных гармоник (для всех приведенных случаев он имеет значение $\sim 5^\circ$, вместо 10° , принятого для отдельных гармоник).

Последнее не является неожиданным. Простые рассуждения приводят к заключению, что для режимов нагружения, при которых $\dot{\varepsilon}(t) \geq 0$ для переднего фронта положительного импульса и $\dot{\varepsilon}(t)$ имеет точку разрыва, максимальные значения деформации и напряжения совпадают по фазе. Поэтому естественно, что по мере увеличения остроты импульса угол сдвига фаз стремится к нулю. Наоборот, для «сглаженных» импульсов следует ожидать увеличение угла сдвига фаз по сравнению с гармоническим режимом. Расчет, результаты которого приведены на рис. 4, подтверждает это предположение. Для пилообразного режима A максимальные значения $\varepsilon(t)$ и $\sigma(t)$ совпадают по фазе, а для режима B (описываемого в пределах полупериода параболой шестого порядка) $-64\varepsilon^6/\pi^6 + 192\varepsilon^5/\pi^5 - 240\varepsilon^4/\pi^4 + 160\varepsilon^3/\pi^3 - 60\varepsilon^2/\pi^2 + 12\varepsilon/\pi$ — сдвинуты на 35° . При этих расчетах использовался более эффективный метод суммирования ряда (17), эквивалентный учету свыше 30 гармоник в этом разложении, и принимались те же значения параметров $\sqrt{C^2 + \frac{1}{4}A^2\pi^2}$ и φ , что и в предыдущем расчете.

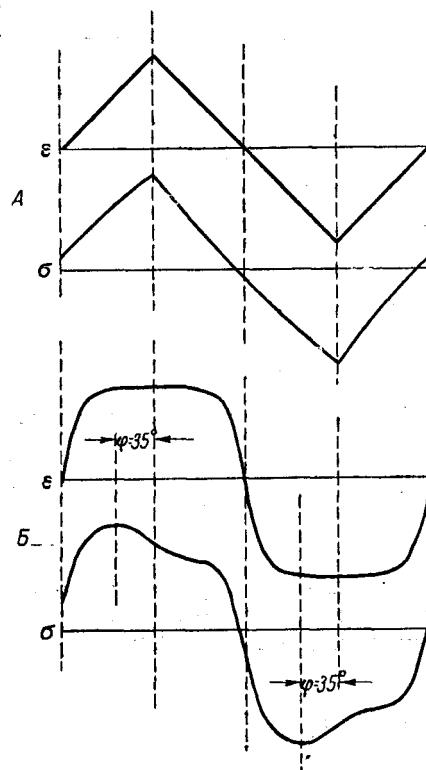


Рис. 4. Зависимость угла сдвига фаз между максимальными значениями деформации и напряжения от формы импульса

На рис. 5—9 показаны зависимости отношения $K/K_{\text{гарм}}$, вычисленного по формуле (19), от длительности паузы, от соотношения между длительностью пауз, от асимметрии цикла по времени и по знаку и от величины плато импульса. В таблице приведены значения $K/K_{\text{гарм}}$ для

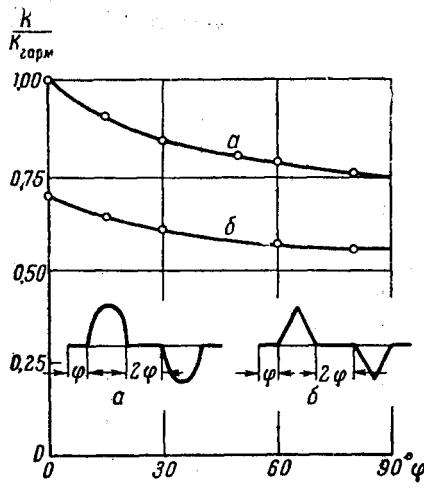


Рис. 5. Зависимость K от длительности паузы

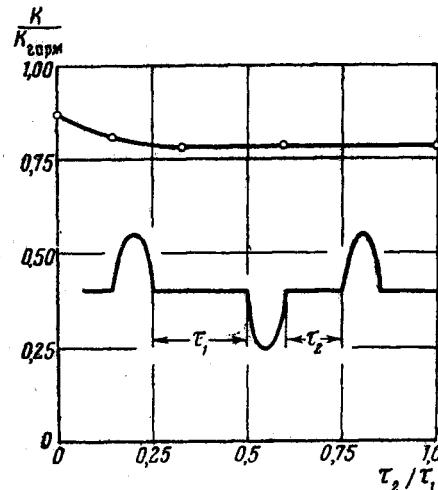


Рис. 6. Зависимость K от соотношения между длительностью пауз

негармонических режимов, симметричных по знаку и по времени, но различающихся крутизной фронта. Аналитические выражения $e(t)$ для первой четверти периода даны в первом столбце.

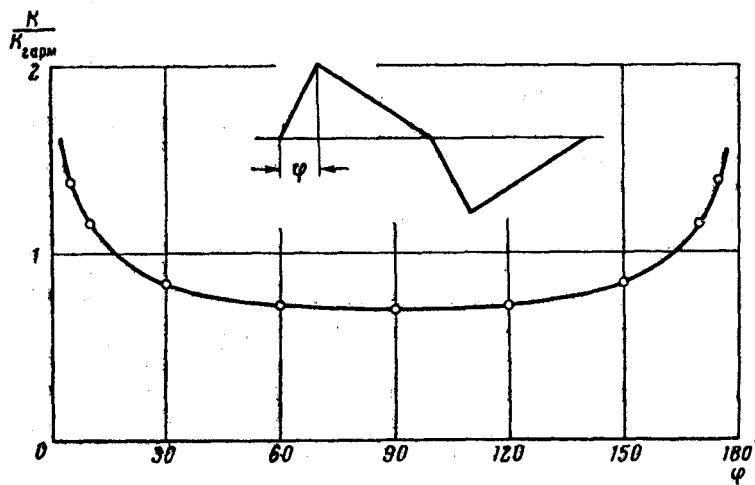


Рис. 7. Зависимость K от асимметрии цикла по времени

Из приведенных данных видно, что модуль внутреннего трения зависит от всех параметров негармонического нагружения. При этом влияние какого-либо параметра проявляется одинаково на разных режимах. Это иллюстрируется рис. 5, на котором приведены зависимости K от длительности паузы для двух режимов, имеющих форму импульса в виде полусинусоиды (а) и треугольника (б). Влияние различных параметров

на величину K различно. Так, K очень слабо зависит от соотношения между длительностью пауз и изменяется в 2–3 и более раз при изменении величины плато (рис. 9) и крутизны фронта импульса (таблица). При

Зависимость модуля внутреннего трения от крутизны фронта импульса деформации

Уравнение импульса деформации в интервале от 0 до $T/4$	$K/K_{\text{ гарм}}$	$\bar{\epsilon}$	$K'/K'_{\text{ гарм}}$	$\bar{\epsilon}^2$	$K''/K''_{\text{ гарм}}$
$\epsilon = 2\sqrt{t/T}$	1,222	0,667	1,11	0,500	1,222
$\epsilon = \sin(2\pi t/T)$	1,000	0,637	1,00	0,500	1,00
$\epsilon = 4t/T$	0,691	0,500	1,12	0,333	1,04
$\epsilon = 16t^2/T^2$	0,523	0,333	1,91	0,200	1,31
$\epsilon = 64t^3/T^3$	0,482	0,250	3,13	0,143	1,68
$\epsilon = 256t^4/T^4$	0,445	0,200	4,51	0,111	2,00

рассмотрении всех представленных зависимостей можно заметить, что наибольшее изменение K вызывают те параметры негармонического режима, которые изменяют среднее значение деформации за половину цикла. Возникает вопрос: нельзя ли уменьшить зависимость K от этих параметров?

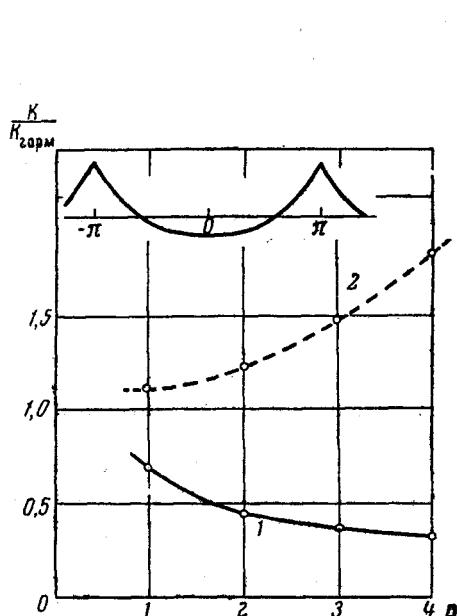


Рис. 8. Зависимость K от асимметрии цикла по знаку

В пределах от 0 до $T/2$ $\epsilon(t)$ выражается зависимостью $\epsilon(t) = [(n+1)/n]2^n(t^n/T^n) - (1/n)1-K$ (по формуле (4)); $2 - K'$ (по формуле (21))

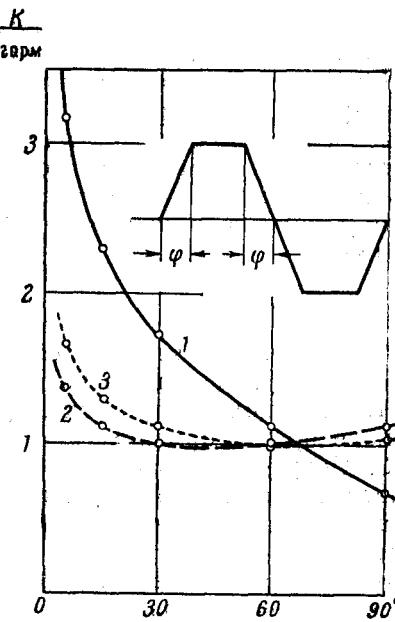


Рис. 9. Зависимость K от величины плато импульса

1 — K (по формуле (4)); 2 — K' (по формуле (21)); 3 — K'' (по формуле (22))

метров, определяя его несколько иным образом, например относя потери за цикл не к квадрату максимального значения деформации, а к квадрату среднего значения деформации за половину цикла:

$$K' = \Delta W / \bar{\epsilon}^2 \quad (21)$$

или к среднему значению квадрата деформации

$$K'' = \Delta W / \bar{\varepsilon}^2. \quad (22)$$

Следует отметить, что K' в качестве показателя потерь в материале удобно и в другом отношении — в начале статьи мы указывали, что величину деформации при негармоническом режиме следует характеризовать не максимальным, а средним значением деформации за половину цикла.

Значения K , K' и K'' для различных режимов, отнесенные к соответствующим значениям для гармонического режима, приведены в таблице и на рис. 8 и 9. Характер изменения этих величин при изменении разных параметров различен. Так, K' и K'' значительно меньше зависят от величины плато импульса, чем K (рис. 9).

Для режимов, не симметричных по знаку (рис. 8), наоборот, K меньше зависит от асимметрии режима, чем K' , а зависимость K'' (не показана на рисунке) выражена еще сильнее, чем для K' . Наконец, в зависимости от крутизны фронта импульса K и K'' изменяются примерно в равной степени (в противоположных направлениях), а зависимость K' выражена значительно сильнее.

Таким образом, проведенное сопоставление не позволяет отдать предпочтение какому-либо из рассмотренных определений модуля внутреннего трения. Но из соображений удобства определения величины деформации для режимов, не симметричных по знаку, следует остановиться на показателе K' , определяемом формулой (21).

Изложенный материал показывает, что оценка динамических свойств вязко-упругих материалов должна производиться в условиях, сопоставимых с эксплуатационными. Приведенные зависимости K от различных параметров негармонического нагружения позволяют произвести качественную оценку величины механических потерь при любом негармоническом режиме на основании данных, полученных при синусоидальном режиме.

Выводы

- Предложена терминология для периодических негармонических режимов нагружения и произведен выбор рациональных показателей, характеризующих динамическую упругость и механические потери в материале при негармоническом нагружении.
- Получены выражения для динамического модуля и модуля внутреннего трения вязко-упругих материалов, свойства которых описываются трехэлементной моделью и моделью с непрерывным спектром времен релаксации.
- Проанализирован характер зависимостей напряжения от времени, соответствующих различным режимам негармонического изменения деформации. Приведены графические зависимости для ряда конкретных случаев.
- Рассмотрено влияние различных параметров негармонического режима: длительности пауз, соотношения между длительностью пауз, асимметрии цикла по времени и по знаку, величины плато и крутизны фронта импульса на величину механических потерь в материале, свойства которого описываются моделью с непрерывным спектром времен релаксации.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. B. Stambouch, M. Rohner, S. D. Gehman, J. Appl. phys., 15, 740, 1944.
2. P. A. Mrowka, S. L. Dart, E. Guth, J. Appl. phys., 16, 86, 1945.
3. М. М. Резниковский, М. К. Хромов, Коллоидн. ж., 14, 177, 1952.
4. М. М. Резниковский, Е. Г. Востротинов, Ж. техн. физики, 24, 997, 1954.
5. D. Ballgin, G. D. Hubbard, IRI Trans., 34, 201, 1958.

**DYNAMIC PROPERTIES OF VISCOELASTIC MATERIALS DURING
ANHARMONIC LOADING**

L. S. Priss

Summary

The behavior of viscoelastic materials under conditions of periodic change in deformation according to anharmonic law has been examined. A terminology for anharmonic loading conditions has been proposed and characteristics have been selected that would effectively describe the dynamic elasticity and mechanical losses of the material under such conditions.

The time-stress relations corresponding to different cases of anharmonic change of deformation have been analyzed and it has been shown that with increasing sharpness of impulse the angle of phase difference between maximum strain and stress values decreases, tending towards zero. For «smoothed out» impulses the difference in phases may greatly exceed the value corresponding to harmonic conditions. The effect of various parameters of the anharmonic process, namely, the duration of the pauses and their ratios, the time and sign of asymmetries of the cycle, and the values of the plateau and curvature of the impulse front, on the magnitude of the mechanical losses has been examined. All calculations have been made for materials the properties of which are described by a three-element model and by a model with continuous spectrum of relaxation times.