ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МАТЕРИАЛЫ ДЕМПФИРУЮЩИЕ

Графическое представление комплексных модулей упругости

Издание официальное

БЗ 11—99/460

ГОССТАНДАРТ РОССИИ
Москва

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН И ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 183 «Вибрация и удар»

2 ПРИНЯТ И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Постановлением Госстандарта России от 22 декабря 1999 г. № 658-ст

3 Настоящий стандарт представляет собой аутентичный текст ИСО 10112—91 «Материалы демпфирующие. Графическое представление комплексных модулей упругости»

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

© ИПК Издательство стандартов, 2000

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Госстандарта России

Содержание

1 Область применения 1
2 Определения и обозначения 1
3 Контроль данных 1
4 Функция температурного смещения 2
5 Представление данных 3
Приложение А Соотношения для комплексного модуля упругости 7
Приложение В Библиография 8

Введение

Демпфирование — одно из средств ослабления вибрации в конструкции. Демпфирование представляет собой рассеяние вибрационной энергии и превращение ее в тепловую энергию в процессе распространения колебаний. Если технически значимое демпфирование имеет место внутри материала конструкции, такой материал называют вибродемпфирующим. Рассеяние в вибродемпфирующем материале обусловлено межмолекулярным взаимодействием или взаимодействием узлов кристаллической решетки и может быть охарактеризовано петлей гистерезиса механического напряжения (деформации) в материале. Другие возможные причины демпфирования, такие как пластические деформации, относительные проскальзывания или воздушные зазоры в соединениях, акустическое излучение колебательной энергии, рассеяние энергии вследствие токов Фуко, настоящим стандартом не охвачены.

Механические свойства большинства демпфирующих материалов зависят от частоты, температуры, а при больших деформациях и от амплитуды деформации. Поскольку настоящий стандарт распространяется только на линейные случаи, зависимость от амплитуды деформации в нем не рассматривается.

Основной задачей настоящего стандарта является улучшение взаимопонимания между специалистами различных отраслей техники, в которых используют понятие вибродемпфирующего материала.

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МАТЕРИАЛЫ ДЕМПФИРУЮЩИЕ

Графическое представление комплексных модулей упругости

Damping materials.
Graphical presentation of the complex modulus

Дата введения 2000—07—01

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает форму представления в графическом виде комплексного модуля упругости вязкоупругого вибродемпфирующего материала, обладающего свойствами однородности (на макроскопическом уровне), линейности и термореологической простоты (см. приложение А). Такими комплексными модулями упругости могут быть, например, модуль сдвига, модуль Юнга, модуль объемной упругости или постоянная Ламе. Графическое представление этих физических величин является общепринятым и в большинстве случаев позволяет получить достаточную информацию о свойствах вибродемпфирующих материалов.

В приложении А определены предпочтительные параметры и символы, используемые для представления комплексного модуля упругости.

2 Определения и обозначения

В настоящем стандарте используют следующие обозначения:

η_G — коэффициент потерь;

G — комплексный модуль упругости;

G_M — абсолютное значение комплексного модуля упругости;

G_R — действительная часть комплексного модуля упругости;

G_I — мнимая часть комплексного модуля упругости;

$\alpha_T(T)$ — функция температурного смещения;

T — температура;

t — время;

f — циклическая частота;

ω — угловая частота;

t_R — приведенное время;

f_R — приведенная циклическая частота;

ω_R — приведенная угловая частота.

Пояснение терминов и обозначений, используемых в настоящем стандарте, дано в приложении А.

3 Контроль данных

В настоящем стандарте предполагается, что все экспериментальные данные, связанные с комплексным модулем упругости, получены в соответствии с хорошо зарекомендовавшими себя методами (см., например, [1]). Тем не менее, целесообразно осуществлять контроль достоверности данных. Для этого следует, по крайней мере, построить график зависимости $\lg \eta_G$ от $\lg G_M$ (см. в качестве примера рисунок 1). Если данные соответствуют термореологически простому материалу, получены в одном масштабе и в них не наблюдается значительного разброса, тогда эти данные на графике зависимости должны лежать на некоторой плавной кривой.

Издание официальное

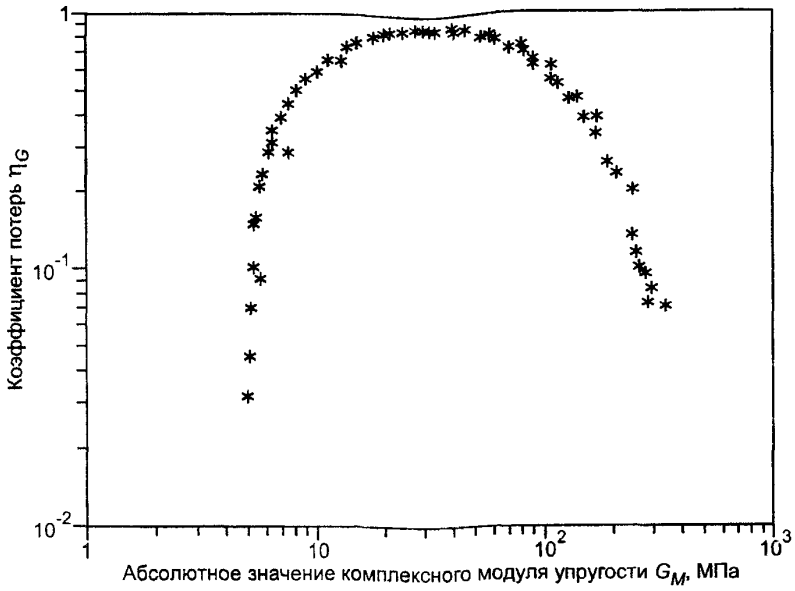

Рисунок 1 — Проверка качества данных

Каждая точка на этой кривой соответствует одному значению приведенной частоты [см. формулу (А.6)]. Однако сам график не предназначен для определения данной величины. Коэффициент потерь в материале и абсолютное значение комплексного модуля упругости связаны между собой параметрической зависимостью через приведенную частоту, которая (так же, как и частота, и температура) не присутствует на графике в явном виде. Ни в какой части разброс в данных на графике не может быть отнесен на счет функции температурного смещения.

График зависимости коэффициента потерь от комплексного модуля упругости, построенный в логарифмическом масштабе, помогает выявить ценную информацию о разбросе в экспериментальных данных. Этот разброс может быть охарактеризован шириной полосы, в которой лежат данные, а также выбросами отдельных точек относительно средней линии полосы. Насколько данный разброс допустим, зависит от конкретных приложений. По данному графику, однако, ничего нельзя узнать о точности измерений температуры и частоты, а также о наличии каких-либо систематических ошибок.

4 Функция температурного смещения

Данные о комплексном модуле упругости, если они получены во всем экспериментальном диапазоне температур и частот, определяют функцию температурного смещения $\alpha_T(T)$ (при условии, что эта функция единственная).

Рекомендуется, чтобы для всего экспериментального диапазона температур были построены графики трех величин, связанных с функцией температурного смещения, которые наиболее широко используются в практических приложениях (см. в качестве примера рисунок 2):

- самой функции температурного смещения $\alpha_T(T)$;
- ее углового коэффициента $d(\lg \alpha_T)/dT$;
- полной энергии активации ΔH_A [2].

Последнюю величину определяют по формуле

$$\Delta H_A = 2{,}303RT^2 d(\lg \alpha_T)/dT, \quad (1)$$

где R — универсальная газовая постоянная:

$$R = 8{,}314 \text{ Дж}\cdot\text{К}^{-1}\cdot\text{моль}^{-1}. \quad (2)$$

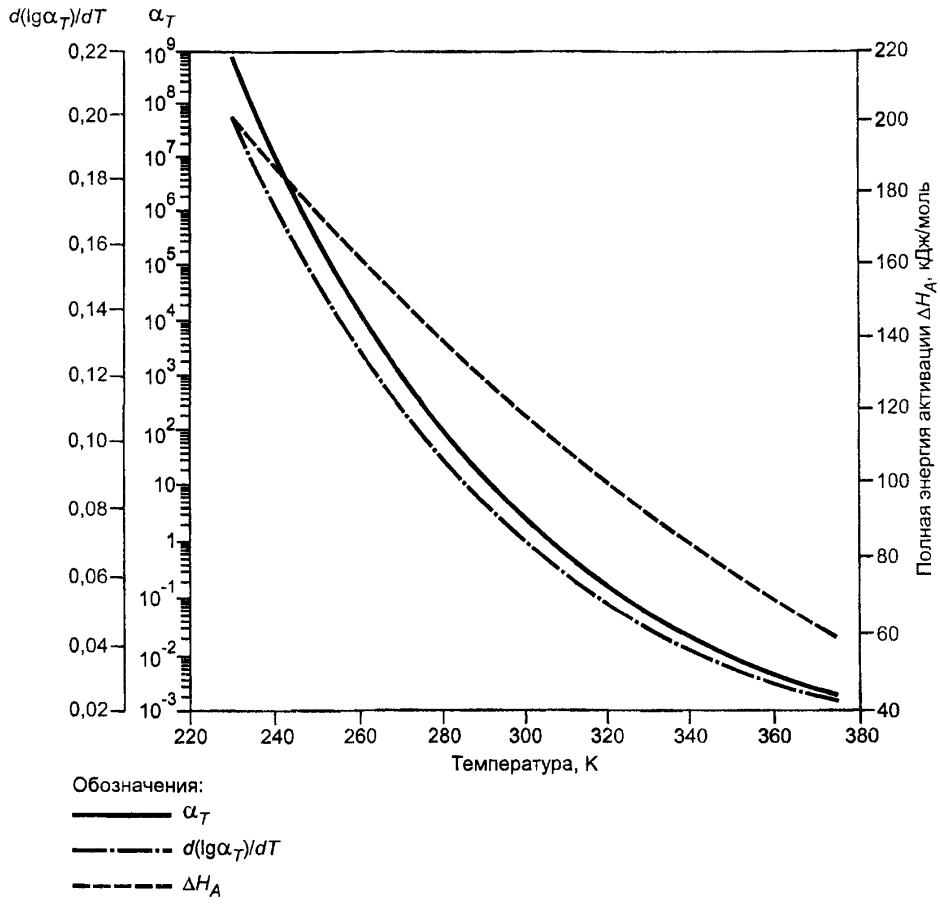

Рисунок 2 — Функция температурного смещения

5 Представление данных

5.1 График приведенной частоты

Данные для комплексного модуля упругости представлены на рисунке 3. Вдоль вертикальной оси отложены в логарифмическом масштабе действительная G_R и мнимая G_I части модуля упругости, МПа, и безразмерный коэффициент потерь η_G. Вдоль горизонтальной оси в логарифмическом масштабе отложена приведенная циклическая частота f_R, Гц.

Приведенную частоту f_{Ri} для i-й экспериментальной точки определяют по формуле

$$f_{Ri} = f_i \, \alpha_T (T_i), \tag{3}$$

где f_i — частота, соответствующая i-й экспериментальной точке;

T_i — температура, соответствующая i-й экспериментальной точке.

5.1.1 Температурные линии Джоунса

Правая шкала в логарифмическом масштабе на рисунке 3 соответствует циклической частоте f, Гц. Неравномерно расположенные диагональные прямые линии постоянной температуры, соответствующие формуле (А.5) для переменных в логарифмическом масштабе

$$\lg f_R = \lg f + \lg \alpha_T (T), \tag{4}$$

совместно с горизонтальной осью приведенной частоты и вертикальной осью частоты, составляют номограмму «температура — частота — приведенная частота» [3].

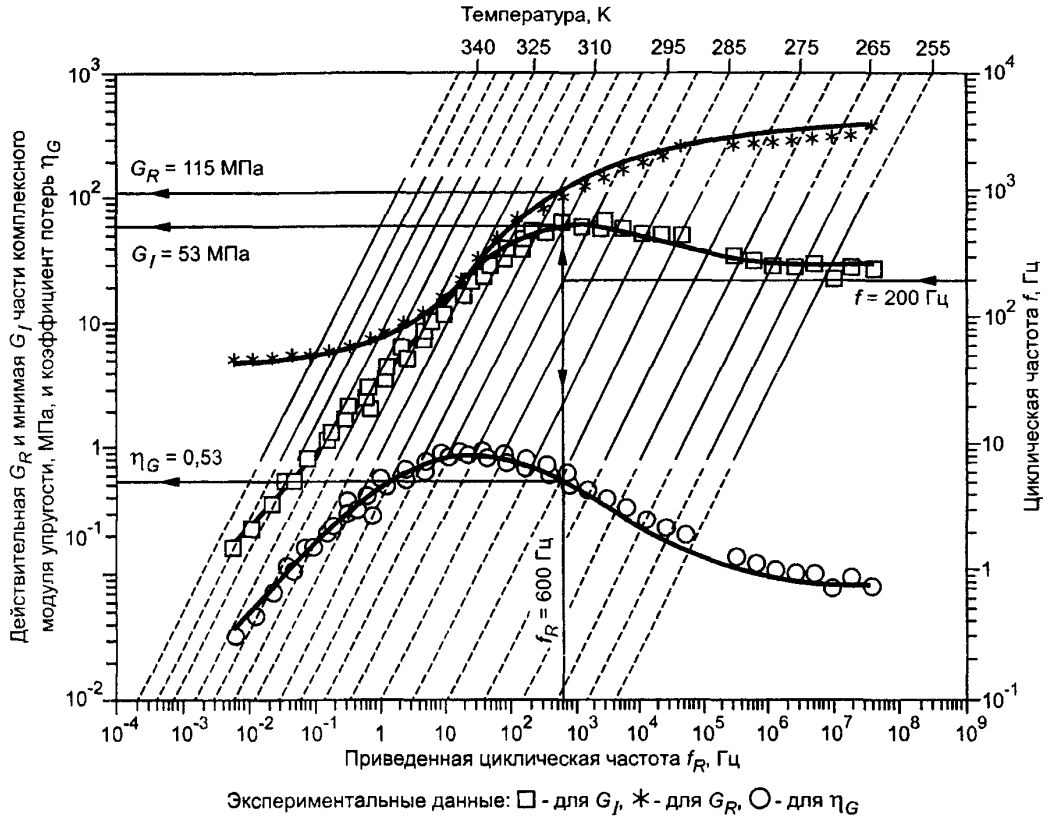

Рисунок 3 — График комплексного модуля упругости для приведенной частоты

Выбирают значения температуры T, K, отстоящие друг от друга на некоторое принятое значение. Расстояния между прямыми линиями постоянной температуры зависят от функции температурного смещения. Число диагональных линий должно быть таким, чтобы покрывать весь диапазон экспериментальных температур — это позволяет избежать непредусмотренной (и чреватой серьезными ошибками) экстраполяции.

В пределах диапазона частот эксперимента диагональные изотермы показаны сплошными линиями, а вне этого диапазона — пунктирными. Это определяет диапазон изменения приведенной частоты, который изменяется от линии низшей температуры и максимальной частоты в правой части шкалы до линии высшей температуры и минимальной частоты.

Пример

Используя данные, представленные на рисунке 3, введем значение частоты 200 Гц на правой вертикальной шкале и от точки, соответствующей 200 Гц, проведем горизонтальную линию до пересечения с диагональной прямой, соответствующей 295 K. Точка пересечения определяет значение приведенной частоты 600 Гц. Вертикаль на этой приведенной частоте пересекает кривые данных в точках, соответствующих значениям 115 МПа для действительной части, 53 МПа для мнимой части и значению коэффициента потерь, определяемому по левой вертикальной шкале, 0,53.

5.1.2 График «перевернутое U»

Те же данные для комплексного модуля упругости G представлены на рисунке 4, где левая вертикальная логарифмическая шкала соответствует безразмерному коэффициенту потерь η_G, а по горизонтальной логарифмической оси отложена действительная часть комплексного модуля упругости G_R, МПа.

Рисунок представляет собой номограмму, основанную на формуле (3) [4].

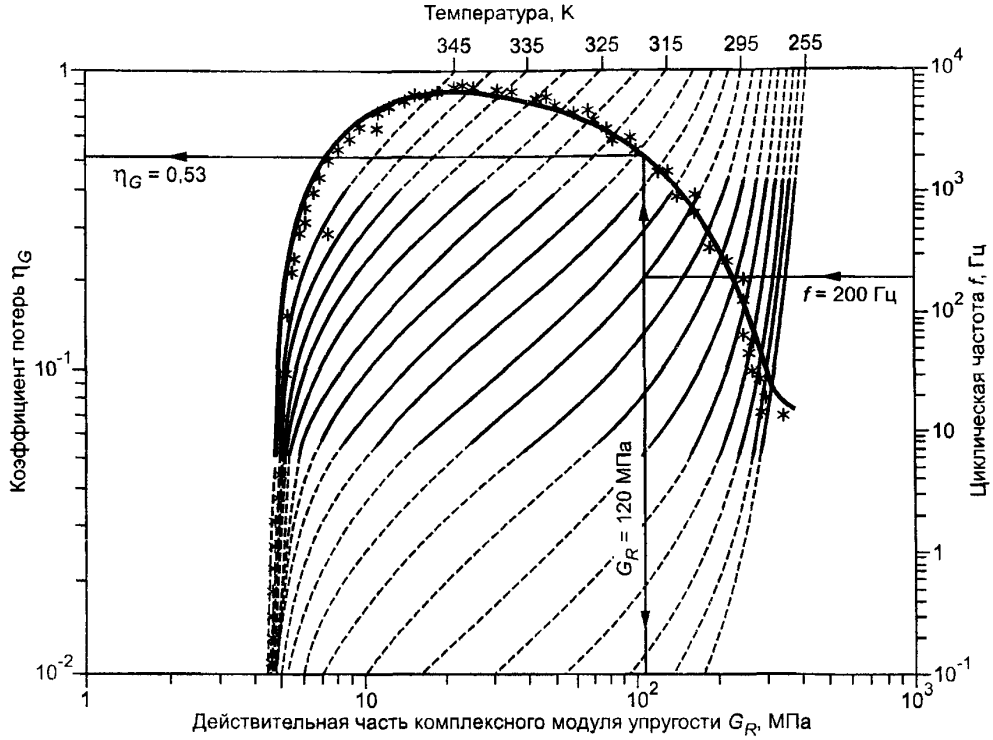

Рисунок 4 — График «перевернутое U» для комплексного модуля упругости

Пример

Введем на правой шкале значение 200 Гц и от точки, соответствующей 200 Гц, проведем горизонтальную линию до пересечения с кривой, соответствующей 295 K; от точки пересечения проследуем вниз и прочитаем на горизонтальной оси 120 МПа, после чего продолжим вертикаль вверх до пересечения с кривой данных. Проведя горизонталь от точки пересечения до левой вертикальной шкалы, получим значение коэффициента потерь 0,53.

5.2 Аналитическое представление данных

В ряде задач определенные удобства обеспечивает аппроксимация полученных данных для функции температурного смещения и комплексного модуля упругости некоторыми аналитическими кривыми. Поэтому, помимо графического, рекомендуется также аналитическое представление данных (например в виде таблиц 1 и 2).

Таблица 1 — Пример аналитического представления функции температурного смещения

$$\lg \alpha_T = a(1/T - 1/T_Z) + 2{,}303(2a/T_Z - b)\lg(T/T_Z) - (b/T_Z - a/T_Z^2 - S_{AZ})(T - T_Z) -$$
$$- d(\lg \alpha_T)/dT = a(1/T - 1/T_Z)^2 + b(1/T - 1/T_Z) + S_{AZ}$$

$$T_Z = A(1) = 290;\ S_{AZ} = A(4) = 0{,}069$$

$$T_L = A(2) = 230;\ S_{AL} = A(5) = 0{,}2$$

$$T_H = A(3) = 360;\ S_{AH} = A(6) = 0{,}04$$

$$C_A = (1/T_L - 1/T_Z)^2$$

$$C_B = 1/T_L - 1/T_Z$$

$$C_C = S_{AL} - S_{AZ}$$

$$D_A = (1/T_H - 1/T_Z)^2$$

$$D_B = 1/T_H - 1/T_Z$$

Окончание таблицы 1

$D_C = S_{AH} - S_{AZ}$
$D_E = D_B C_A - C_B D_A$
$a = (D_B C_C - C_B D_C)/D_E$
$b = (C_A D_C - D_A C_C)/D_E$

Таблица 2 — Пример аналитического представления комплексного модуля упругости

$G = [G_e(jf_R/10^{-\alpha_R} f_{RO})^{\beta_R} + G_g(jf_R/f_{RO})^{\beta_T}]/[1+(jf_R/10^{-\alpha_T} f_{RO})^{\alpha_B \beta_T} + (jf_R/f_{RO})^{\beta_T - \beta_G}]$
$G_e = B(1) = 5{,}0$
$G_g = B(2) = 320$
$f_{RO} = B(3) = 410$
$\beta_T = B(4) = 0{,}66$
$\beta_G = B(5) = 0{,}01$
$\beta_R = B(6) = 0{,}005$
$\alpha_F = B(7) = 0{,}52$
$\alpha_B = B(8) = 0{,}58$
$\alpha_R = B(9) = 3$

Если для определения значений параметров зависимостей или при интерпретации данных используют графические изображения (например линеаризованной зависимости между действительной и мнимой частями модуля упругости для определения угла пересечения кривой данных с осью действительной части модуля), они также должны быть включены в представление данных.

При использовании аналитического представления данных следует избегать ненужной экстраполяции.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(справочное)

Соотношения для комплексного модуля упругости

Основное уравнение для деформируемого линейного, изотермического, изотропного, однородного, термореологически простого [см. формулу (А.7)] вязкоупругого материала в операторной форме имеет вид [5]:

$$P(p_R)\,\tau(t) = Q(p_R)\,\gamma(t), \tag{А.1}$$

где $\tau(t)$ — сдвиговое напряжение;
$\gamma(t)$ — сдвиговая деформация;
$P(p_R)$ и $Q(p_R)$ — полиномы от p_R.

Оператор p_R определяют как

$$p_R = d/dt_R. \tag{А.2}$$

Дифференциал приведенного времени dt_R определяют как

$$dt_R = dt/\alpha_T(T), \tag{А.3}$$

где t — время, с;
$\alpha_T(T)$ — безразмерная функция температурного смещения [2], зависящая от температуры T, К.

Осуществив преобразование Фурье для обеих частей формулы (А.1), можно определить комплексный модуль сдвига G для изменяющихся по синусоидальному закону напряжения и деформации в виде

$$G(j\omega_R) = \tau^*(j\omega_R)/\gamma^*(j\omega_R) = Q(j\omega_R)/P(j\omega_R), \tag{А.4}$$

где знак * означает преобразование Фурье некоторой функции времени, например $\tau^*(j\omega_R)$ — преобразование Фурье для $\tau(t)$.

Приведенная угловая частота

$$\omega_R = \omega\,\alpha_T(T) = 2\pi f_R = 2\pi f\alpha_T(T) \tag{А.5}$$

представляет собой произведение угловой частоты ω, рад/с, и безразмерной функции температурного смещения $\alpha_T(T)$; f_R и f являются приведенной циклической частотой и циклической частотой, Гц, соответственно.

Комплексный модуль сдвига зависит как от частоты, так и от температуры:

$$G = G(\omega, T). \tag{А.6}$$

В том и только в том случае, когда эта зависимость имеет вид

$$G = G(j\omega_R) = G[j\omega\,\alpha_T(T)], \tag{А.7}$$

материал называют термореологически простым. Формулы (А.1) — (А.7) справедливы только при выполнении предположения о линейности модели.

Рассмотрим теперь участок вязкоупругого материала под воздействием сдвиговой деформации, изменяющейся по синусоидальному закону [6]:

$$\gamma = \gamma_A \sin\omega t, \tag{А.8}$$

которая отстает по фазе от сдвигового напряжения на угол δ_G:

$$\tau = \tau_A \sin(\omega t + \delta_G). \tag{А.9}$$

В комплексном виде эти величины могут быть представлены как

$$\gamma^* = \gamma_A\, e^{j\omega t}, \tag{А.10}$$

$$\tau^* = \tau_A\, e^{j(\omega t + \delta_G)}. \tag{А.11}$$

Тогда комплексный модуль сдвига может быть представлен также в виде

$$\begin{aligned} G = \tau^*/\gamma^* = \tau_A\, e^{j\delta_G}/\gamma_A = G_M e^{j\delta_G} = G_M \cos\delta_G\,(1 + j\tan\delta_G) = G_R + jG_I = \\ = G' + jG'' = G_R(1 + j\eta_G), \end{aligned} \tag{А.12}$$

где G_M — абсолютное значение комплексного модуля сдвига;
$G_R = G'$ — действительная часть комплексного модуля сдвига;
$G_I = G'' = G_R\,\eta_G$ — мнимая часть комплексного модуля сдвига;
$\eta_G = \tan\delta_G$ — коэффициент потерь в материале при сдвиге.

Сказанное справедливо для одно-, двух- и трехосных деформаций и напряжений [2] и может быть распространено и на другие параметры, такие как модуль Юнга E, модуль объемной упругости K, постоянную Ламе λ и др.

К термореологически простым материалам относят те материалы, для которых комплексный модуль упругости может быть выражен в виде комплексной функции одной независимой переменной, а именно — приведенной частоты, которая отражает зависимость комплексного модуля упругости как от частоты, так и от температуры.

Примечание — Иногда действительную часть комплексного модуля упругости и коэффициент потерь в материале рассматривают как независимые функции приведенной частоты. Хотя это и может облегчить получение удовлетворительных практических результатов, с концептуальной точки зрения данное предположение ошибочно.

Оценка комплексного модуля упругости, полученная для заданной температуры и заданной частоты, определяет амплитудное и фазовое соотношение между синусоидальными напряжением и деформацией.

ПРИЛОЖЕНИЕ В
(справочное)

Библиография

[1] Standard method for measuring vibration-damping properties of materials, American Society for Testing and Materials, ASTM E 756—83, 1983

[2] Ferry, J.D. Viscoelastic properties of polymers, 3rd ed, Wiley, 1980

[3] Jones, D.I.G. A reduced temperature nomogram for characterization of damping material behavior, Shock and Vibration Bulletin, 1978, Vol. 48, No 2, pp. 13—22

[4] Jones, D.I.G. and Rao, D.K. A new method for representing damping material properties, ASME Vibration Conference, Boston, MA, Sept. 1987

[5] Rogers, L. Operators and fractional derivatives for viscoelastic constitutive equations, J. Rheology, 1983, Vol. 27, No 4, pp. 351—372

[6] Нашиф А., Джоунс Д., Хендерсон Дж. Демпфирование колебаний. — М.: Мир, 1988. — 448 с.

УДК 539.32:620.17:006.354 ОКС 17.160 Т34 ОКСТУ 0011

Ключевые слова: модули упругости, измерения, представление данных

Редактор *Л.В. Афанасенко*
Технический редактор *О.Н. Власова*
Корректор *В.Е. Нестерова*
Компьютерная верстка *В.И. Грищенко*

Изд. лиц. № 021007 от 10.08.95. Сдано в набор 21.02.2000. Подписано в печать 03.04.2000. Усл. печ. л. 1,40. Уч.-изд. л. 0,97. Тираж 211 экз. С 4818. Зак. 290.

ИПК Издательство стандартов, 107076, Москва, Колодезный пер., 14.
Набрано в Издательстве на ПЭВМ
Филиал ИПК Издательство стандартов — тип. "Московский печатник", 103062, Москва, Лялин пер., 6.
Плр № 080102

gost.e-ecolog.ru