



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01N 3/34 (2019.02)

(21) (22) Заявка: 2018130542, 22.08.2018

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
22.08.2018

Дата регистрации:
14.05.2019

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 22.08.2018

(45) Опубликовано: 14.05.2019 Бюл. № 14

Адрес для переписки:
196158, Санкт-Петербург, Московское ш., 44,
Федеральное государственное унитарное
предприятие "Крыловский государственный
научный центр", отдел патентования и
защиты интеллектуальной собственности

(72) Автор(ы):

Ярцев Борис Александрович (RU),
Иванов Михаил Александрович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное унитарное
предприятие "Крыловский государственный
научный центр" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2517989 C1, 10.06.2014. SU
983508 A1, 23.12.1982. SU 1366912 A1,
15.01.1988. SU 697874 A1, 15.11.1979. US
4321981 A1, 30.03.1982.

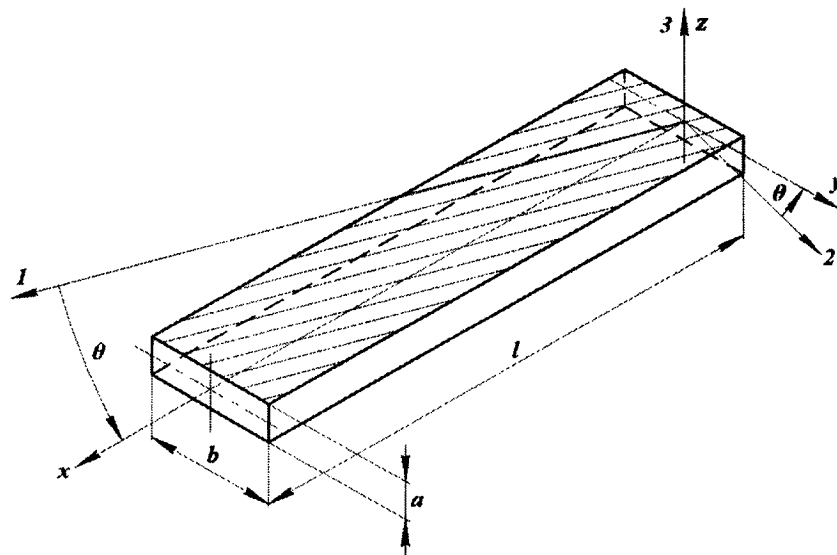
(54) СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГИХ И ДИССИПАТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

(57) Реферат:

Настоящее изобретение относится к области измерения, в части определения физических свойств материалов, и может быть использовано преимущественно для определения упругих и диссипативных постоянных полимерных композиционных материалов (ПКМ) неразрушающим способом в любых отраслях промышленности. Сущность: осуществляют обработку экспериментальных значений собственных частот и соответствующих этим частотам коэффициентов механических потерь низших тонов изгибных и крутильных колебаний безопорных балок, вырезанных из пластины ортотропного полимерного композиционного материала под углом 0, 45, 90°. В способе реализована возможность определять диссипативные характеристики полимерных композиционных материалов, при этом используется в своей основе процедура последовательных приближений, в соответствии с которой начальные значения динамических

модулей упругости в направлении основы и утка армирующего материала, модуля сдвига в плоскости армирования и межслойных модулей сдвига в направлении основы и утка, определенными при помощи собственных частот первого тона изгибных и крутильных колебаний, а также соответствующим им коэффициентов потерь, уточняются при помощи зависимостей, основанных на теории колебаний балки Тимошенко, используя значения собственных частот и соответствующих коэффициентов потерь изгибных колебаний безопорных балок полимерных композиционных материалов более высоких тонов. Технический результат: возможность определения комплексных модулей упругости E_{11} , E_{22} и сдвига G_{12} , G_{13} , G_{23} , необходимых для полного описания динамического поведения тонкостенных конструкций, включающие в себя жесткостных и диссипативные характеристики ортотропного ПКМ, имеющие высокую точностью и

достоверность. 1 з.п. ф-лы, 2 ил.



Фиг. 1

RU 2687503 C1

RU 2687503 C1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(19) **RU** (11) **2 687 503**⁽¹³⁾ **C1**

(51) Int. Cl.
G01N 3/34 (2006.01)

(52) CPC
G01N 3/34 (2019.02)

(21) (22) Application: **2018130542, 22.08.2018**

(24) Effective date for property rights:
22.08.2018

Registration date:
14.05.2019

Priority:

(22) Date of filing: **22.08.2018**

(45) Date of publication: **14.05.2019** Bull. № 14

Mail address:

**196158, Sankt-Peterburg, Moskovskoe sh., 44,
Federalnoe gosudarstvennoe unitarnoe
predpriyatie "Krylovskij gosudarstvennyj nauchnyj
tsentr", otdel patentovedeniya i zashchity
intelektualnoj sobstvennosti**

(72) Inventor(s):

**Yartsev Boris Aleksandrovich (RU),
Ivanov Mikhail Aleksandrovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federalnoe gosudarstvennoe unitarnoe
predpriyatie "Krylovskij gosudarstvennyj
nauchnyj tsentr" (RU)**

(54) **METHOD OF DETERMINING ELASTIC AND DISSIPATIVE CHARACTERISTICS OF COMPOSITE MATERIAL**

(57) Abstract:

FIELD: measurement.

SUBSTANCE: present invention relates to measurement, in terms of determining physical properties of materials, and can be used primarily for determination of elastic and dissipative constants of polymer composite materials (PCM) by non-destructive method in any industries. Method comprises processing of experimental values of natural frequencies and coefficients of mechanical losses corresponding to these frequencies of lower tones of bending and torsional oscillations of unsupported beams cut from plate of orthotropic polymer composite material at angle of 0, 45, 90°. Method enables to determine dissipative characteristics of polymer composite materials, wherein based on successive approximation procedure, according to which initial values of dynamic elastic moduli in direction of base and weft of reinforcing

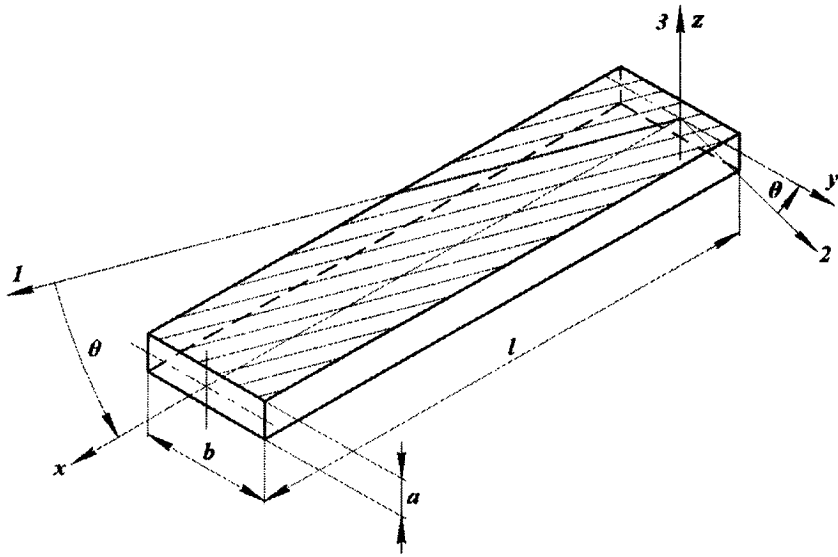
material, a shear modulus in the reinforcement plane and interlayer shear moduli in the warp and weft direction, determined by natural frequencies of the first tone of bending and torsional vibrations, as well as their corresponding loss coefficients, are refined using relationships based on the theory of Tymoshenko beam oscillations, using values of natural frequencies and corresponding loss coefficients of bending oscillations of unsupported beams of polymer composite materials of higher tones.

EFFECT: technical result is possibility of determining complex elasticity moduli E_{11} , E_{22} and shift G_{11} , G_{13} , G_{23} , required for complete description of dynamic behaviour of thin-walled structures, including stiffness and dissipation characteristics of orthotropic PCM, having high accuracy and reliability.

1 cl, 2 dwg

RU 2 687 503 C 1

RU 2 687 503 C 1



Фиг. 1

Настоящее изобретение относится к области измерения, в части определения физических свойств материалов, и может быть использовано преимущественно для определения упругих и диссипативных постоянных полимерных композиционных материалов (ПКМ) неразрушающим способом в любых отраслях промышленности.

Динамическое поведение ПКМ, характеризующихся анизотропией упругих и диссипативных характеристик в плоскости укладки армирующих материалов, привлекает внимание исследователей в связи с возрастающим применением в конструкциях, испытывающих вибрационные воздействия. Поскольку реакция таких конструкций на действие вибрации зависит, главным образом, от жесткостных и диссипативных свойств, то оптимальное конструирование состоит в варьировании этих свойств с целью достижения соответствия тем или иным критериям качества, например, минимизации смещений, запасенной энергии и т.д. Подбор упругих и диссипативных характеристик конструкций может осуществляться посредством варьирования ориентацией и последовательностью укладки слоев армирующего материала по толщине композита. Такая задача может быть решена на основе методов механики слоистых композитов при наличии полного набора упругих и диссипативных характеристик всех компоуемых монослоев ПКМ.

Учитывая, что практически все конструкции из ПКМ являются тонкостенными (в этом случае свойства материалов реализуются наилучшим образом), в теории слоистых композитов, как правило, пренебрегают поперечными нормальными напряжениями ($\sigma_{33}=0$, см. фиг. 1, где представлена геометрия стержня, вырезанного из пластины ортотропного материала под углом θ к направлению оси симметрии 3).

Таким образом, для описания динамического поведения конструкций из ортотропного ПКМ с армирующими волокнами, расположенными параллельно его срединной плоскости, необходимо знать численные значения главных комплексных динамических модулей упругости E_{11} , E_{22} , комплексных динамических модулей сдвига G_{12} , G_{13} , G_{23} и коэффициента Пуассона ν_{12} :

$$\begin{aligned} E_{11} &= \operatorname{Re} E_{11} + i \cdot \operatorname{Im} E_{11} = E'_{11} + i \cdot E''_{11} = E'_{11} (1 + i \cdot \eta_{11}), \\ E_{22} &= \operatorname{Re} E_{22} + i \cdot \operatorname{Im} E_{22} = E'_{22} + i \cdot E''_{22} = E'_{22} (1 + i \cdot \eta_{22}), \\ G_{12} &= \operatorname{Re} G_{12} + i \cdot \operatorname{Im} G_{12} = G'_{12} + i \cdot G''_{12} = G'_{12} (1 + i \cdot \eta_{12}), \\ G_{13} &= \operatorname{Re} G_{13} + i \cdot \operatorname{Im} G_{13} = G'_{13} + i \cdot G''_{13} = G'_{13} (1 + i \cdot \eta_{13}), \\ G_{23} &= \operatorname{Re} G_{23} + i \cdot \operatorname{Im} G_{23} = G'_{23} + i \cdot G''_{23} = G'_{23} (1 + i \cdot \eta_{23}), \end{aligned} \quad (1)$$

где

$\operatorname{Re} E_{11} = E'_{11}$ - вещественная часть комплексного модуля упругости ПКМ в направлении основы армирующего материала ($\theta=0^\circ$);

$\operatorname{Im} E_{11} = E''_{11} = E'_{11} \cdot \eta_{11}$ - мнимая часть комплексного модуля упругости ПКМ в направлении основы армирующего материала ($\theta=0^\circ$);

η_{11} - коэффициент механических потерь при изгибе образца в направлении основы армирующего материала ($\theta=0^\circ$);

$$i = \sqrt{-1};$$

$\text{Re}E_{22} = E'_{22}$ - вещественная часть комплексного модуля упругости ПКМ в направлении утка армирующего материала ($\theta=90^\circ$);

5 $\text{Im}E_{22} = E''_{22} = E'_{22} \cdot \eta_{22}$ - мнимая часть комплексного модуля упругости ПКМ в направлении утка армирующего материала ($\theta=90^\circ$);
 η_{22} - коэффициент механических потерь при изгибе образца в направлении утка армирующего материала ($\theta=90^\circ$);

10 $\text{Re}G_{12} = G'_{12}$ - вещественная часть комплексного модуля сдвига в плоскости армирования ПКМ;

$\text{Im}G_{12} = G''_{12} = G'_{12} \cdot \eta_{12}$ - мнимая часть комплексного модуля сдвига в плоскости армирования ПКМ;
 15 η_{12} - коэффициент механических потерь при сдвиге ПКМ в плоскости армирования;

$\text{Re}G_{13} = G'_{13}$ - вещественная часть комплексного модуля межслойного сдвига ПКМ в направлении основы армирующего материала ($\theta=0^\circ$);

20 $\text{Im}G_{13} = G''_{13} = G'_{13} \cdot \eta_{13}$ - мнимая часть комплексного модуля межслойного сдвига ПКМ в направлении основы армирующего материала ($\theta=0^\circ$);
 η_{13} - коэффициент механических потерь при межслойном сдвиге ПКМ в направлении основы армирующего материала ($\theta=0^\circ$);

25 $\text{Re}G_{23} = G'_{23}$ - вещественная часть комплексного модуля межслойного сдвига ПКМ в направлении утка армирующего материала ($\theta=90^\circ$);

$\text{Im}G_{23} = G''_{23} = G'_{23} \cdot \eta_{23}$ - мнимая часть комплексного модуля межслойного сдвига ПКМ в направлении утка армирующего материала ($\theta=90^\circ$);
 30 η_{23} - коэффициент механических потерь при межслойном сдвиге ПКМ в направлении утка армирующего материала ($\theta=90^\circ$).

Известен способ определения упругих свойств ПКМ [Патент на изобретение RU 2517989 C1, Опубликовано: 10.06.2014 Бюл. №16]. Способ заключается в возбуждении колебаний образца ПКМ в виде прямоугольной пластины со свободными краями и
 35 определении ее частот и форм собственных колебаний. Упругие характеристики ПКМ определяются путем перебора значений модулей упругости, модулей сдвига и коэффициентов Пуассона, подставляя их в математическую модель пластины и сравнивая каждый раз вычисленную частоту колебаний для каждой формы колебаний с частотами и формами колебаний, полученными экспериментально. В итоге
 40 определяются девять упругих постоянных. Недостатком указанного способа является высокая трудоемкость, а также необходимость определять большое кол-во собственных частот и форм колебаний образцов с высокой точностью. Кроме того, указанный способ имеет узкую область применения, а именно не позволяет определять диссипативные характеристики ПКМ.

45 Известен также способ определения механических свойств материалов [ASTM Standard E1876-01, Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration, Book of Standards, Volume 03]. Способ заключается в возбуждении колебаний образца материалов и определении, как правило, его

собственных частот первого тона колебаний. Полученные собственные частоты подставляются в частотное уравнение, из которого, определяют упругие постоянные. Образцы, как правило, имеют простую геометрическую форму в виде балок. Данный способ может быть использован для изотропных материалов, но неприемлем для образцов ортотропных ПКМ. Кроме того, указанный способ имеет узкую область применения, а именно не позволяет определять диссипативные характеристики ПКМ.

Известен также способ определения механических свойств материалов [ГОСТ 23813-79 «Стеклопластики конструкционные для судостроения. Метод определения модуля упругости»]. Указанный подход основан на экспериментальном определении изгибных собственных частот призматических образцов с углами вырезки $\theta=0,90^\circ$. Способ дает возможность определять только главные динамические модули упругости ReE_{11} , ReE_{22} и имеет узкую область применения, а именно не позволяет определять диссипативные характеристики ПКМ.

Наиболее близким к предлагаемому техническому решению является способ [ГОСТ 23814-79 «Стеклопластики конструкционные для судостроения. Метод определения модулей сдвига»]. Указанный подход основан на экспериментальном определении крутильных собственных частот призматических образцов в виде безопорных балок с углами вырезки $\theta=0, 90^\circ$ с высотой сечения a и $2a$. При определении модулей сдвига ReG_{12} , ReG_{13} , ReG_{23} используются зависимости, связывающие частоты собственных крутильных колебаний ортотропного стержня с модулями сдвига. Для нахождения этих зависимостей решается статическая задача о кручении ортотропного прямоугольного стержня, которая сводится к интегрированию уравнения Пуассона. Указанный метод не обеспечивает точного определения упругих характеристик. Кроме того, указанный способ имеет узкую область применения, а именно не позволяет определять диссипативные характеристики ПКМ.

Техническим результатом настоящего изобретения является возможность определения комплексных модулей упругости E_{11} , E_{22} и сдвига G_{12} , G_{13} , G_{23} , необходимых для полного описания динамического поведения тонкостенных конструкций, включающие в себя жесткостные и диссипативные характеристики ортотропного ПКМ, имеющие высокую точностью и достоверность.

Технический результат достигается следующим образом. Способ определения упругих и диссипативных характеристик композиционного материала, заключающийся в обработке экспериментальных значений собственных частот и соответствующих этим частотам коэффициентов механических потерь низших тонов изгибных и крутильных колебаний безопорных балок, вырезанных из пластины ортотропного полимерного композиционного материала под углом $0, 45, 90^\circ$. В способе реализована возможность определять диссипативные характеристики полимерных композиционных материалов, при этом используется в своей основе процедура последовательных приближений, в соответствии с которой начальные значения динамических модулей упругости в направлении основы и утка армирующего материала, модуля сдвига в плоскости армирования и межслойных модулей сдвига в направлении основы и утка, определенными при помощи собственных частот первого тона изгибных и крутильных колебаний, а также соответствующим им коэффициентов потерь, уточняются при помощи зависимостей, основанных на теории колебаний балки Тимошенко, используя значения собственных частот и соответствующих коэффициентов потерь изгибных колебаний безопорных балок полимерных композиционных материалов более высоких тонов.

Количество образцов равно трем.

Указанные существенные признаки способа обеспечивают решение поставленной задачи с достижением заявленного технического результата. Блок-схема итерационной процедуры уточнения вещественных и мнимых частей комплексных модулей упругости и сдвига, раскрывающая сущность изобретения приведена на фиг. 2.

На фиг. 2 показано, что на первом шаге по первой собственной частоте $f_{1И}(\theta)$ изгибных колебаний, а также соответствующем коэффициенте потерь $\eta_{1И}(\theta)$ определяются начальные значения динамических модулей упругости $E'(\theta)$ стержневых образцов ПКМ ($\theta=0, 45, 90^\circ$). Далее при помощи коэффициента Пуассона ν_{12} , а также полученных комплексных модулей упругости $E_{11}=E(0^\circ)$, $E(45^\circ)$, $E_{22}=E(90^\circ)$ определяется начальное значение комплексного модуля сдвига в плоскости укладки слоев армирующих волокон G_{12} . При помощи зависимостей, связывающих частоты собственных крутильных колебаний $f_{1К}(\theta)$, а также соответствующих коэффициентов потерь $\eta_{1К}(\theta)$ образцов ПКМ ($\theta=0^\circ, 90^\circ$) с модулями сдвига, определяются начальные значения комплексных модулей межслойного сдвига G_{13} , G_{23} . На следующем шаге начальные значения $E_{11}=E(0^\circ)$, $E(45^\circ)$, $E_{22}=E(90^\circ)$ уточняются с учетом известных G_{13} , G_{23} по значениям собственных частот $f_{2И}(\theta)$, $f_{3И}(\theta)$ и соответствующих коэффициентов потерь $\eta_{2И}(\theta)$, $\eta_{3И}(\theta)$ второго и третьего тонов изгибных колебаний. Указанная процедура повторяется до тех пор, пока две следующие друг за другом последовательности вещественных и мнимых частей комплексных модулей упругости и комплексных модулей сдвига не станут практически неизменными.

Способ определения модулей упругости и диссипативных характеристик ПКМ осуществляется следующим образом. Из исследуемого материала под углом $\theta=0, 45, 90^\circ$ к направлению основного армирования материала вырезают балки постоянного по длине поперечного сечения с размерами $L \times a \times b$ (см. рис. 1). С целью минимизации экспериментальных погрешностей рекомендуется использовать образцы со следующими геометрическими характеристиками для углепластиков: $1.5 \leq a/b \leq 3$, $L/a \geq 30$ и для стеклопластиков $1/3 \leq a/b \leq 2/3$, $L/a \geq 15$. Перед началом испытаний производят измерения длины, ширины, высоты сечения образцов, а также их массы. Производят возбуждения колебаний образцов ПКМ импульсной силой и определяют их частотные характеристики. По полученным частотным характеристикам путем анализа форм колебаний определяются собственные частоты первых трех тонов $f_{1И}(\theta)$, $f_{2И}(\theta)$, $f_{3И}(\theta)$ изгибных колебаний образцов ПКМ, вырезанных под углами $\theta=0, 45, 90^\circ$ и первого тона крутильных $f_{1К}(\theta)$ колебаний образцов, вырезанных под углами $\theta=0, 90^\circ$, а также соответствующие этим частотам коэффициенты потерь $\eta_{1И}(\theta)$, $\eta_{2И}(\theta)$, $\eta_{3И}(\theta)$, $\eta_{1К}(\theta)$ (см. формулу 3).

$$\eta = \frac{f_2 - f_1}{f_0}, \quad (3)$$

где f_0 - резонансная частота; f_2, f_1 - частоты, соответствующие уровню 0.707 от максимальной амплитуды виброускорений на резонансной частоте.

Начальные значения вещественных частей комплексных модулей упругости $\text{Re}E(\theta)$ в направлениях $\theta=0, 45, 90^\circ$ ($\text{Re}E(0^\circ)=\text{Re}E_{11}$, $\text{Re}E(45^\circ)=E'(45^\circ)$, $\text{Re}E(90^\circ)=\text{Re}E_{22}$) определяются по полученным из эксперимента величинам резонансных частот 1-го тона изгибных колебаний образцов ПКМ $f_{1И}(\theta)$ по формуле:

$$\operatorname{Re} E(\theta) = E'(\theta) = 0,9607 \cdot m \cdot \frac{L^3 \cdot f_{1и}(\theta)^2}{a^3 b}, \quad (4)$$

Начальные значения коэффициентов механических потерь $\eta(\theta)$ при изгибе образцов в направлениях $\theta=0, 45, 90^\circ$ определяются по формуле (3) как наименьшая из экспериментально определенных величин коэффициентов механических потерь, соответствующих двум первым резонансным частотам изгибных колебаний образцов ПКМ.

Начальное значение комплексного модуля сдвига в плоскости армирования G_{12} вычисляется из соотношения:

$$G_{12} = \frac{E_{11} \cdot E(45^\circ) \cdot E_{22}}{E_{11} \cdot [4E_{22} - E(45^\circ)] - (1 - 2\nu_{12}) \cdot E_{22} \cdot E(45^\circ)}, \quad (5)$$

где $E(45^\circ) = E'(45^\circ)(1 + i \cdot \eta(45^\circ))$, ν_{12} - коэффициент Пуассона, определяемый из статических испытаний на одноосное растяжение.

Значения комплексной крутильной жесткости $C(\theta)$ образцов, вырезанных в направлениях $\theta=0, 90^\circ$, определяются по полученным из эксперимента величинам собственных частот 1-ого тона крутильных колебаний $f_{1К}(\theta)$ образцов ПКМ, а также соответствующим им коэффициентам механических потерь $\eta_{1К}(\theta)$, по формуле:

$$C(\theta) = \operatorname{Re} C(\theta) + i \cdot \operatorname{Im} C(\theta) = C'(\theta) + i \cdot C''(\theta) = C'(\theta) [1 + i \cdot \eta_{1К}(\theta)], \quad (6)$$

где

$\operatorname{Re} C(\theta) = C'(\theta) = \rho \cdot I_p \cdot L^2 \cdot f_{1К}^2(\theta)$ - вещественная часть комплексной крутильной жесткости;

$$\rho = \frac{m}{a \cdot b \cdot L} \quad \text{- плотность материала;}$$

$$I_p = \frac{a^3 \cdot b}{12} + \frac{a \cdot b^3}{12} \quad \text{- полярный момент инерции прямоугольного поперечного сечения;}$$

$\operatorname{Im} C(\theta) = C''(\theta) = C'(\theta) \cdot \eta_{1К}(\theta)$ - мнимая часть комплексной крутильной жесткости; $\eta_{1К}(\theta)$ - коэффициент механических потерь при кручении образца ПКМ вычисляемый по формуле (3).

По вычисленным начальным значениям комплексного модуля сдвига G_{12} в плоскости армирования и комплексной крутильной жесткости $C(\theta)$ образцов ПКМ, вырезанных в направлениях $\theta=0, 90^\circ$ определяются начальные значения комплексных модулей межслойного сдвига G_{13} , G_{23} в направлениях основы и утка армирующего материала из соотношений:

$$\begin{aligned} G_{13} &= G_{12} z_0^2 \\ G_{23} &= G_{12} z_{90}^2, \end{aligned} \quad (7)$$

где z_0, z_{90} определяются из решения задачи минимизации $|\Psi(z)| \rightarrow \min$ выражения:

$$\Psi(z) = C(\theta) - \frac{a^3 b G_{12}}{3} \left[1 - \frac{192 a}{\pi^5 b} \frac{1}{z} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^5} \operatorname{th} \frac{(2n+1)\pi b}{2a} z \right] \quad (8)$$

При численной реализации задачи минимизации рекомендуется использовать алгоритм №178 прямого поиска точки минимума [5], для которого требуются лишь начальное приближение к искомому решению Z и значения функции $\Psi(z)$ в соответствующих точках. В качестве начального приближения берется точка:

$$z = \frac{\frac{192 a}{\pi^5 b}}{1 - \frac{3 \cdot C(\theta)}{a^3 b G_{12}}} \quad (9)$$

Начальное значение комплексного модуля межслойного сдвига $G(45^\circ)$ по вычисленным начальным значениям комплексных модулей межслойного сдвига G_{13} , G_{23} определяется из соотношения:

$$G(45^\circ) = \frac{2G_{13}G_{23}}{G_{13} + G_{23}} \quad (10)$$

Полученные начальные значения комплексных модулей упругости $E_{11}=E(0^\circ)$, $E(45^\circ)$, $E_{22}=E(90^\circ)$ и комплексных модулей сдвига G_{12} , G_{13} , G_{23} подвергаются итерационной процедуре уточнения (см. фиг. 2).

Уточнение начальных значений $\operatorname{Re}E(\theta)=E'(\theta)$ и $\operatorname{Im}E(\theta)=E''(\theta)$ $\theta=0, 45, 90^\circ$ выполняется на основе теории затухающих колебаний балки Тимошенко. Для этого используются экспериментально определенные величины собственных частот изгибных колебаний второго $f_{2И}(\theta)$ и третьего $f_{3И}(\theta)$ тонов, а также соответствующие этим частотам величины коэффициентов механических потерь $\eta_{2И}(\theta)$, $\eta_{3И}(\theta)$.

Уточненные комплексные модули упругости определяются из решения задачи минимизации $\Psi(E_{ij}, G_{ij}) \rightarrow \min$ выражения:

$$\Psi(E_{ij}, G_{ij}) = |\det(\omega_{2И})| + |\det(\omega_{3И})|, \quad (11)$$

где

$$\omega_{2И} = 2\pi f_{2И}(\theta) \left(1 + i \cdot \frac{\eta_{2И}(\theta)}{2} \right) \quad \text{- круговая частота 2-го тона изгибных}$$

колебаний;

$$\omega_{3И} = 2\pi f_{3И}(\theta) \left(1 + i \cdot \frac{\eta_{3И}(\theta)}{2} \right) \quad \text{- круговая частота 3-го тона изгибных}$$

колебаний;

$$\det(\omega) = \begin{vmatrix} \sum_{k=0}^3 \frac{p_k^2 + a_0 - a_g}{2(2p_k^2 + a_0)} (p_k^2 + a_g) e^{l \cdot p_k} & \sum_{k=0}^3 \frac{(p_k^3 + a_g p_k)}{2(2p_k^2 + a_0)} e^{l \cdot p_k} \\ \sum_{k=0}^3 \frac{p_k^2 + a_0 - a_g}{2(2p_k^2 + a_0)} (p_k^3 + a_0 p_k) e^{l \cdot p_k} & \sum_{k=0}^3 \frac{(p_k^4 + a_0 p_k^2)}{2(2p_k^2 + a_0)} e^{l \cdot p_k} \end{vmatrix},$$

$$p_k = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{\sqrt{a_0^2 - 4b_0} - a_0}{2}} \frac{a_0}{2} \\ \sqrt{\frac{\sqrt{a_0^2 - 4b_0} - a_0}{2}} \frac{a_0}{2} \\ \sqrt{\frac{\sqrt{a_0^2 - 4b_0} + a_0}{2}} + \frac{a_0}{2} \\ \sqrt{\frac{\sqrt{a_0^2 - 4b_0} + a_0}{2}} + \frac{a_0}{2} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

где $a_g = \rho \omega^2 \frac{1}{kG_{xz}}$; $a_0 = \rho \omega^2 \left(\frac{1}{E_{xx}} + \frac{1}{kG_{xz}} \right)$; $b_0 = \rho^2 \omega^4 \frac{1}{kG_{xz} E_{xx}} - \rho \omega^2 \frac{A}{I_y E_{xx}}$.

При численной реализации задачи минимизации рекомендуется воспользоваться процедурой прямого поиска точки глобального минимума [Библиотека алгоритмов 1516 - 2006 // Под ред. Агеева М.И. М.: Радио и связь. 1981, 184 с.] функции (11).

Уточненные значения $\text{Re}E(\theta)=E'(\theta)$ и $\text{Im}E(\theta)=E''(\theta)$ $\theta=0, 45, 90^\circ$ влекут за собой новые значения вещественной $\text{Re}G_{12} = G'_{12}$ и мнимой $\text{Im}G_{12} = G''_{12}$ частей комплексного модуля сдвига в плоскости армирования G_{12} (в соответствии с формулой 2), а также новые значения вещественных $\text{Re}G_{13} = G'_{13}$, $\text{Re}G_{23} = G'_{23}$ и мнимых

$\text{Im}G_{13} = G''_{13} = G'_{13} \cdot \eta_{13}$, $\text{Im}G_{23} = G''_{23} = G'_{23} \cdot \eta_{23}$ частей комплексных модулей межслойного сдвига в направлениях основы G_{13} и утка G_{23} армирующего материала (в соответствии с формулой 7);

Указанная процедура повторяется до тех пор, пока две следующие друг за другом последовательности вещественных и мнимых частей комплексных модулей упругости $E_{11}=E(0^\circ)$, $E(45^\circ)$, $E_{22}=E(90^\circ)$ и комплексных модулей сдвига G_{12} , G_{13} , G_{23} не станут практически неизменны (рекомендуемое отличие 1%).

Таким образом, предложенный способ определения упругих и диссипативных характеристик полимерного композиционного материала дает возможность определять диссипативные свойства, а также позволяет повысить точность и достоверность определения жесткостных постоянных ортотропного ПКМ.

(57) Формула изобретения

1. Способ определения упругих и диссипативных характеристик композиционного

материала, заключающийся в обработке экспериментальных значений собственных частот и соответствующих этим частотам коэффициентов механических потерь низших тонов изгибных и крутильных колебаний безопорных балок, вырезанных из пластины ортотропного полимерного композиционного материала под углом 0, 45, 90°,
5 отличающийся тем, что в способе реализована возможность определять диссипативные характеристики полимерных композиционных материалов, при этом используется в своей основе процедура последовательных приближений, в соответствии с которой начальные значения динамических модулей упругости в направлении основы и утка армирующего материала, модуля сдвига в плоскости армирования и межслойных
10 модулей сдвига в направлении основы и утка, определенными при помощи собственных частот первого тона изгибных и крутильных колебаний, а также соответствующим им коэффициентов потерь, уточняются при помощи зависимостей, основанных на теории колебаний балки Тимошенко, используя значения собственных частот и соответствующих коэффициентов потерь изгибных колебаний безопорных балок
15 полимерных композиционных материалов более высоких тонов.

2. Способ по п. 1, отличающийся тем, что количество безопорных балок равно трем.

20

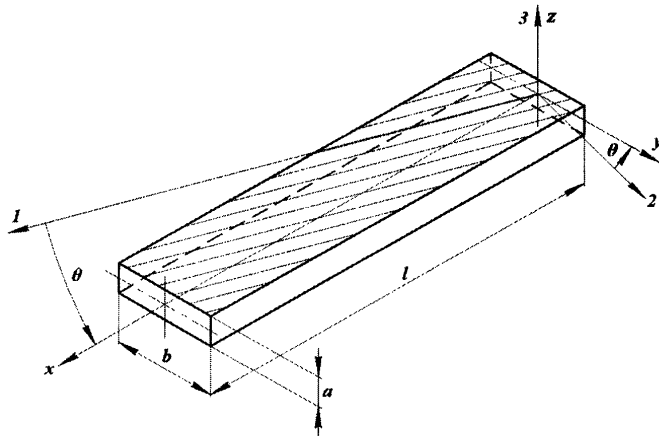
25

30

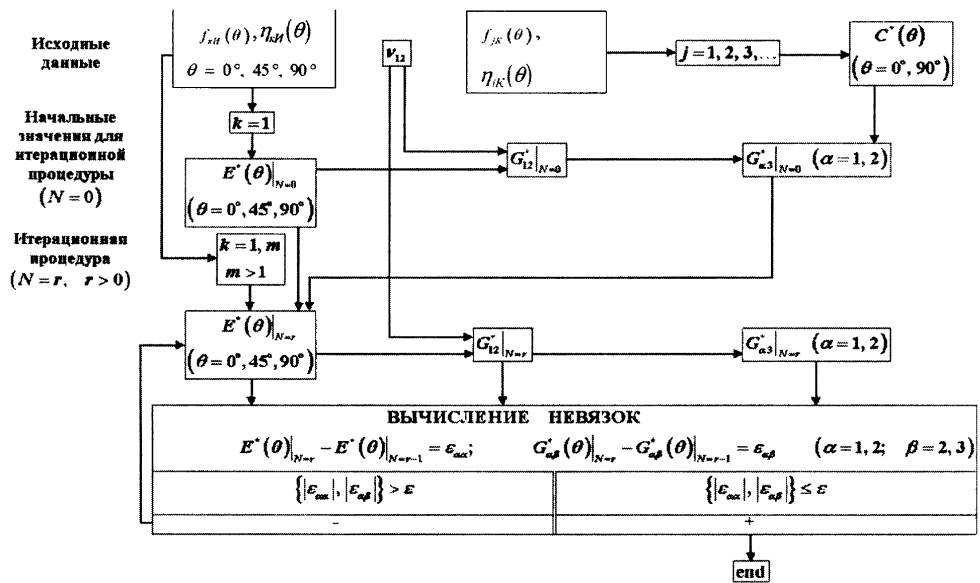
35

40

45



Фиг. 1



Фиг. 2