

EVALUATION OF DAMPING PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS FOR TRANSPORT ENGINEERING

ОЦЕНКА ДЕМПИРУЮЩИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Prof., Dr.Sc.(Eng.) Koryagin S.I., Assoc. Prof., Dr.Sc.(Eng.) Sharkov O.V., Assoc. Prof., Dr.(Eng.) Buylov S.V.
Immanuel Kant Baltic Federal University – Russia, Kaliningrad

skoryagin@kantiana.ru, o_sharkov@mail.ru, sbuilov@kantiana.ru

Abstract: *Polymeric coatings are widely used for effective vibration damping of sheet or hull structures of different vehicles. The article presents a computational and experimental technique which enables improved precision and accuracy of determination of polymer coatings damping properties. The mathematical models for determination of the parameters of the experimental sample having a uniform strain state of the polymer coating are produced. It is experimentally confirmed that the use of coatings based on adhesive compositions such as «Sprut» increases the damping capability of metal structures in 18–28 times. The introduction of fillers into adhesive compositions like «Sprut» in a proportion of 30–50% of its weight reduces the damping properties of metal structures by 2.4 times.*

Keywords: COMPOSITE MATERIAL, DAMPING CAPACITY, POLYMER, TRANSPORT ENGINEERING

1. Введение

В процессе эксплуатации металлические конструкции транспортных средств подвергаются интенсивному воздействию ударных и вибрационных нагрузок.

В настоящее время для эффективного демпфирования колебаний листовых и оболоченных конструкций, в частности, обшивок транспортных, самоходных и летательных аппаратов находят широкое применение полимерные покрытия [1–3].

Определение демпфирующих характеристик таких покрытий требует проведения экспериментальных исследований, причем надежность и достоверность полученных данных существенно зависят от применяемой методики. Известные методики не позволяют проводить испытания демпфирующих свойств полимерных покрытий в условиях однородного деформированного состояния исследуемого материала, хотя результаты именно таких испытаний необходимы для динамических расчетов [4–5].

Для повышения точности и достоверности определения демпфирующих свойств полимерных покрытий авторами предлагается расчетно-экспериментальная методика, основанная на обеспечении однородного деформированного состояния полимерного покрытия.

2. Расчетная схема и математическая модель

Деформированное состояние в материале покрытия, близкое к однородному, может быть получено при колебаниях консольной балки с инерционным грузом на конце, если она имеет форму, определенным образом отражающую связь геометрических и механических параметров с параметрами инерционного груза и режима испытаний.

На рис. 1 показана расчетная схема экспериментального образца, который представляет собой консольную балку равного сопротивления динамическому изгибу с инерционным грузом на свободном конце. Балка является трехслойной и состоит из металлической подложки, на которую с двух сторон нанесено полимерное покрытие равной толщины. Параметры экспериментального образца рассчитываются следующим образом.

Колебания консольной балки переменной ширины с инерционным грузом на конце без учета рассеяния энергии могут быть описаны дифференциальным уравнением:

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(D_{(x)} \frac{d^2 y_{(x,t)}}{dx^2} \right) + m_{(x)} \frac{d^2 y_{(x,t)}}{dt^2} = 0 \quad (1)$$

и граничными условиями:

$$[Y]_{x=0} = 0; \quad \left[\frac{dy_{(x,t)}}{dx} \right]_{x=0} = 0; \quad (2,a)$$

$$\left[\frac{d}{dx} D_{(x)} \left(\frac{d^2 Y_{(x,t)}}{dx^2} \right) \right]_{x=1} = - \left[M \frac{d^2 Y_{(x,t)}}{dt^2} \right]_{x=1}; \quad (2,b)$$

$$\left[D_{(x)} \left(\frac{d^2 Y_{(x,t)}}{dx^2} \right) \right]_{x=1} = - \left[J \frac{d^3 Y_{(x,t)}}{dx dt^2} \right]_{x=1}, \quad (2,b)$$

где m – погонная масса балки; D – изгибная жесткость единицы длины балки; J – момент инерции груза; M – масса груза; Y – прогиб балки; x – координаты точки по длине балки; t – время.

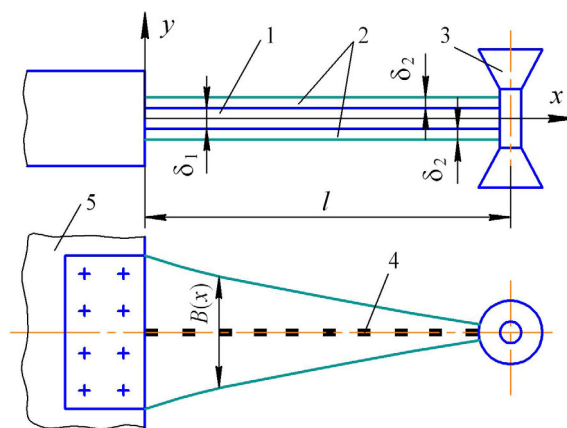


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – подложка; 2 – полимерное покрытие; 3 – инерционная масса; 4 – тензодатчик; 5 – стол вибростенда

Изгибная жесткость и погонная масса слоистой балки равны:

$$D_{(x)} = B_{(x)} \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} E_k z^2 dz; \quad (3)$$

$$m_{(x)} = B_{(x)} \sum_{k=1}^n \rho_k \delta_k, \quad (4)$$

где E_k – модуль упругости материала слоя; B – ширина балки; z – расстояние от нейтральной оси балки до рассматриваемого волокна; h_k – расстояние от нейтральной

оси до нижней поверхности k -го слоя; n – число слоев; ρ_k – плотность материала слоя; δ_k – толщина слоя.

Зададим, чтобы колебания балки описывались зависимостью:

$$Y_{(x,t)} = \frac{\xi_a}{z} \frac{x^2}{2} \cos \omega t, \quad (5)$$

где $x^2/2 = J_{(x)}$ – форма колебаний балки; ξ_a – амплитудное значение относительной деформации; ω – собственная круговая частота колебаний балки.

При такой форме колебаний балки с учетом известной зависимости между относительной деформацией ξ_a и прогибом $Y_{(x,t)}$

$$\xi_{(x,z,t)} = z \frac{d^2 Y_{(x,t)}}{dx^2}. \quad (6)$$

Деформированное состояние в материале постоянно по длине образца:

$$\xi_{(x,t)} = \xi_a \cos \omega t. \quad (7)$$

Найдем форму балки, при которой удовлетворяется зависимость (5). Подставив (5) в уравнение (1), получим дифференциальное уравнение ширины балки:

$$B''_{(x)} - Cx^2 B_{(x)} = 0, \quad (8)$$

$$C = \frac{\omega^2 \sum_{k=1}^n \rho_k \delta_k}{2 \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} E_k z^2 dz}$$

Решение уравнения (8) имеет вид:

$$B_{(x)} = \sqrt{x} [C_1 I_{1/4}(k) + C_2 K_{1/4}(k)], \quad (9)$$

где C_1 и C_2 – постоянные; $I_{1/4}(k)$ и $K_{1/4}(k)$ – модифицированные функции Бесселя первого и второго рода; $k = 0.5x^2 \sqrt{C}$ – аргумент функции

Значения постоянных C_1 и C_2 определяются в соответствии с зависимостью (2,б);

$$C_1 = \frac{B_{(l)} \sqrt{l} - C_2 K_{1/4}(k_1)}{I_{1/4}(k_1)}; \quad k_1 = \frac{l^2}{2} \sqrt{C}; \quad (10,а)$$

$$C_2 = \left\{ B_{(l)} \left[\frac{1}{2l} + l \sqrt{C} \frac{I_{3/4}(k_1) - \frac{I_{1/4}(k_1)}{2l^2 \sqrt{C}}}{I_{1/4}(k_1)} \right] - B'_{(l)} \right\} \frac{1}{C_3}; \quad (10,б)$$

$$C_3 = l \sqrt{l C} \left\{ \frac{K_{1/4}(k_1)}{I_{1/4}(k_1)} \left[I_{-3/4}(k_1) - \frac{I_{1/4}(k_1)}{2l^2 \sqrt{C}} \right] + K_{-3/4}(k_1) + \frac{K_{1/4}(k_1)}{2l^2 \sqrt{C}} \right\}; \quad (10,в)$$

$$B_{(l)} = \frac{J \omega^2 l}{\sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} E_k z^2 dz}; \quad B'_{(l)} = \frac{J \omega^2 l^2}{2 \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} E_k z^2 dz}, \quad (10,г)$$

где $B_{(l)}$ и $B'_{(l)}$ – ширина образца и значение ее первой производной в точке крепления инерционного груза.

Требуемая степень однородности деформированного состояния по толщине покрытия достигается выбором соотношения толщины подложки и покрытия образца.

Учитывая (6), можно получить:

$$\frac{\xi_m(x, z, t)}{z_m} = \frac{\xi_1(x, z, t)}{0,5\delta_2}, \quad (11)$$

где $\xi_m(x, z, t)$ – средний уровень деформации в материале покрытия; $\xi_1(x, z, t)$ – деформация на поверхности подложки; δ_1 – толщина подложки (металла); δ_2 – толщина материала покрытия; z_m – расстояние до средней плоскости покрытия, $z_m = 0,5(\delta_1 + \delta_2)$.

Введем обозначение:

$$K_0 = 1 - \frac{\Delta \xi(x, z, t)}{\xi_m(x, z, t)}. \quad (12)$$

Здесь K_0 характеризует степень однородности деформированного состояния материала покрытия по толщине:

$$\Delta \xi(x, z, t) = \xi_m(x, z, t) - \xi_1(x, z, t). \quad (13)$$

Тогда из (11) получим соотношение для выбора толщины наносимого покрытия:

$$\delta_2 = \delta_1 \frac{1 - K_0}{K_0}. \quad (14)$$

3. Экспериментальная проверка теоретических положений

С целью проверки точности выполнения условия (7) и оценки границ применимости основных положений предлагаемой методики проведены экспериментальные исследования образца со следующими параметрами: длина балки $l = 0.3$ м; ширина балки в месте заделки и в месте присоединения инерционного груза $B = 55.09$ и 7.38 мм; толщина подложки $\delta_1 = 9.87 \cdot 10^{-4}$ м; толщина полимерного покрытия $\delta_2 = 1.5 \cdot 10^{-3}$; масса инерционного груза $M = 1.337$ кг; момент инерции $J = 1.02 \cdot 10^{-2}$ кг·м²; коэффициент однородности $K_0 = 0.868$.

На рис. 2 показано распределение напряжений на поверхности подложки по длине образца на резонансной и околорезонансной частотах. Замеры деформаций материала покрытия осуществлялись с помощью тензорезисторов, равномерно нанесенных с двух сторон образца по длине на подложку и покрытие. Колебания возбуждались путем плоскопараллельного перемещения конца балки, закрепленного на столе вибрационного стенда.

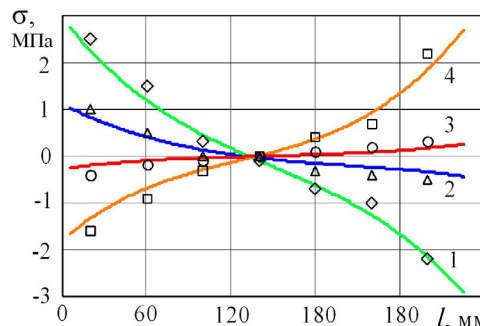


Рис.2. Распределение напряжений на поверхности подложки по длине образца при частоте колебания: 1 – 29 Гц; 2 – 31 Гц; 3 – 32 Гц; 4 – 35 Гц

Как видно из рис. 1 разброс величин возникающих напряжений не превышает 0.3 МПа для частоты 32 Гц, при наибольшей величине 2.8 МПа для частоты колебаний 35 Гц. Таким образом, при колебаниях балки с частотой близкой к резонансной, с достаточной для практических случаев

точность, можно считать, что полимерное покрытие находится в условиях однородного деформированного состояния.

4. Экспериментальное исследование демпфирующих свойств композитов

В целях определения эффективности применения полимерных покрытий на их основе проведены экспериментальные исследования демпфирующих свойств клеевых композиций типа «Спрут».

Экспериментальный образец представлял собой консольную балку равного сопротивления с размером рабочей части 4x20x190 мм. Материал балки сталь Ст3. Толщина подложки 2 мм, масса полимерного покрытия составляла около 30% от массы подложки, величина коэффициента однородности материала находилась в диапазоне $K_0=0,84-0,87$.

В качестве исследуемого параметра принят логарифмический декремент колебаний λ , который определялся в соответствии с методикой источника [6]. Как независимый параметр бала принята амплитуда относительной деформаций ε при изгибных колебаниях балки на околорезонансной частоте равной 32 Гц.

На рис. 3 представлены зависимости декремента колебаний от амплитуды деформации для экспериментальных образцов без покрытия и с полимерным покрытием на основе клеевых композиций типа «Спрут».

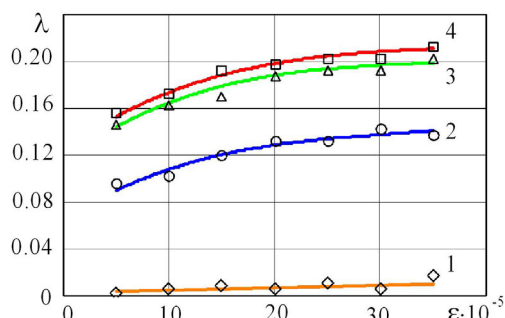


Рис. 3. Зависимость декремента колебаний от амплитуды деформации для композиционных элементов: 1 – Ст.3; 2 – Ст.3+Спрут-5М; 3 – Ст.3+Спрут-9М; 4 – Ст.3+Спрут-Плюс

Как показывает анализ средних значений декремента колебаний (рис. 3) применение полимерных покрытий позволяет повысить демпфирующую способность металлических конструкций от 18 (композиция «Спрут-5М») до 28 раз (композиция «Спрут-Плюс»).

Введение в полимерную матрицу наполнителей позволяет снизить её стоимость, но изменяет физико-механические свойства покрытия. С целью выяснения характера влияния вида и количества наполнителя на демпфирующие свойства полимерных покрытий были проведены испытания экспериментального образца, для которого в качестве полимерной матрицы использовалась клеевая композиция «Спрут-Плюс», а в качестве армирующего материала – минеральные и металлические наполнители (графит, алюминиевая и бронзовая пудра). Наполнители имели приблизительно одинаковую форму и диаметр частиц (от 15 до 20 мк). Концентрация наполнителя, вводимого в клеевую композицию, составляла от 10 до 50% от массы получаемой армированной композиции в зависимости от вида материала, используемого в качестве наполнителя.

На рис. 4 представлены зависимости декремента колебаний от амплитуды относительной деформации для экспериментальных образцов без покрытия и с полимерным покрытием на основе клеевых композиций типа «Спрут-Плюс» с различными наполнителями.

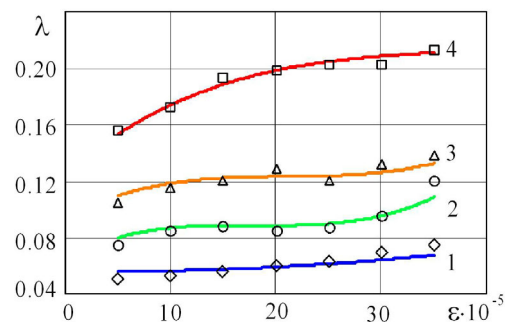


Рис. 4. Зависимость декремента колебаний от амплитуды деформации для композиции Спрут-Плюс: 1 – Ст.3+бронзовая пудра; 2 – Ст.3+алюминевая пудра; 3 – Ст.3+графит; 4 – Ст.3+Спрут-Плюс

Как видно из полученных результатов (рис. 3 и рис. 4), введение наполнителя заметно снижается декремент колебания. Вместе с тем наблюдалось увеличение частоты колебаний, что говорит о повышении упругих свойства композиционных материалов.

Наибольшее снижение демпфирующей способности при введении бронзовой пудры. Декремент колебаний при использовании такого наполнителя в среднем в 3.30 раза меньше, чем для покрытий без наполнителя. Применение алюминиевой пудры снижает декремент колебаний в среднем несколько меньше в 2.27 раза.

Использование минерального наполнителя в виде графита, меньше всего (в 1.66 раза) уменьшает декремент колебаний. Однако, необходимо учитывать невысокие адгезионные свойства покрытия с данным наполнителем.

5. Выводы

Экспериментально подтверждено, что использование образца в виде балки равного сопротивления динамическому изгибу при выполнении зависимостей (9), (10,а-г) и (14), позволяет получать деформированное состояние в материале покрытия, близкое к однородному.

Применение покрытий на основе рассмотренных клеевых композиций приводит к значительному увеличению демпфирующей способности в 18–28 раз.

Введение наполнителей в клеевую композицию в пропорции 30–50% от ее массы снижает демпфирующие свойства металлических конструкций в 2.4 раза.

6. Литература

- [1] Chung D.D.L. Composite Materials: Science and Applications. New York: Springer Science & Business Media, 2010. 371 p.
- [2] Baker A.A., Dutton S., Kelly D. Composite Materials for Aircraft Structures. Reston, USA: AIAA. 599 p.
- [3] Koryagin S.I., Sharkov O.V., Buylov S.V., Velikanov N.L., Kulakov A.S. Estimation of load capacity of adhesive joints for transport engineering. Machines, technologies, materials, 2016. №7. P. 3–6.
- [4] Pendleton R., Tuttle M. Manual on Experimental Methods for Mechanical Testing of Composites. New York: Springer Science & Business Media. 170 p.
- [5] Малкин А.Я., Аскадский А.А., Коврига В.В. Методы измерений механических свойств полимеров. М.: Химия, 1978. 336 с.
- [6]. А.с. 1536256 СССР, МПК G01 N 3/32. Способ определения декремента колебаний низкомолекулярных материалов при изгибных колебаниях / С.В. Буйлов, С.В. Дятченко, С.И. Корягин, А.П. Яковлев. Изобретения. М., 1990. № 2.