

МЕХАНИКА

Научная статья

УДК 539.3

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178456>

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МОНОСЛОЯ В МЕТАЛЛО-ПОЛИМЕРНОМ СЛОИСТОМ КОМПОЗИТЕ

Чан Куэт Тханг

Государственный технический университет имени Ле Куи Дона,

236 ул. Хоанг Куок Вьет, Ханой, Вьетнам

quyetthang.mai@gmail.com

Аннотация. В работе представлены результаты идентификации упругих характеристик и коэффициентов потерь монослоев металлополимерного композита, состоящего из слоев алюминиевого сплава и стеклопластика (алюмопластика). Идентификация выполнена на основе испытаний на затухающие колебания консольно-закрепленных образцов. В испытаниях измерялись собственные частоты колебаний и коэффициенты потерь образцов композита с различными схемами армирования. Идентификация выполняется на основе решения обратной задачи с привлечением классической теории многослойных балок и метода комплексных модулей. Рассмотрены три подхода к решению обратной задачи, в которых для упругих характеристик монослоев проводится отдельная процедура идентификации на основе результатов статических или динамических испытаний, либо проводится одновременная идентификация

упругих и демпфирующих параметров на основе данных динамических испытаний.

Ключевые слова: алюмокомпозит, GLARE, идентификация монослоя, динамические свойства, собственная частота, коэффициент потерь

Для цитирования: Чан К.Т. Идентификация динамических свойств монослоя в металло-полимерном слоистом композите // Труды МАИ. 2024. № 134. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178456>

Original article

MECHANICS

IDENTIFICATION OF THE SINGLE PLY PROPERTIES IN FIBER-METALL LAMINTES

Tran Quyet Thang

Le Quy Don Technical University,

236 Hoang Quoc Viet, Ha Noi, Viet Nam

quyetthang.mai@gmail.com

Abstract. The paper presents the results of identifying the elastic characteristics and loss coefficients of monolayers of a metal-polymer composite consisting of layers of aluminum alloy and fiberglass (aluminum fiberglass). Identification was carried out on the basis of tests for damped vibrations of cantilever-mounted samples. For dynamic testing, the samples were rigidly fixed with a metallic clamp at one end, leaving the other end free. Subsequently, an impact was applied to the free end using a metallic striker, or an initial deflection of the beam's end from the equilibrium position was set. Displacements in the free end zone of the samples were measured by a laser displacement sensor and transferred

to a program that allowed for the registration of displacement/time curves, saving them in tabular and graphical formats. The length of the free end of the beam, denoted as L (excluding the clamps), was determined to achieve a specified natural frequency of beam oscillations ω_0 (20, 30 or 60 Hz). Specific values of lengths were used for beams with different laying schemes. The maximum deflection of the beam was $A_0 = 0.08L$. The tests measured the natural vibration frequencies and loss coefficients of composite samples with various reinforcement schemes. Identification is performed based on solving the inverse problem using the classical theory of multilayer beams and the complex module method. Three approaches to solving the inverse problem are considered, in which a separate identification procedure is carried out for the elastic characteristics of monolayers based on the results of static or dynamic tests, or simultaneous identification of elastic and damping parameters is carried out based on dynamic test data.

Keywords: glass laminate aluminum reinforced epoxy, GLARE, identification, monolayer, dynamic properties, natural frequency, loss factor

For citation: Tran Quyet Thang. Identification of the single ply properties in fiber-metal lamintes. *Trudy MAI*, 2024, no. 134. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=178456>

1. Введение

Алюмостеклопластики (GLARE) – это перспективный класс металло-полимерных композитов для элементов конструкций аэрокосмической техники. Эти композиты состоят из чередующихся слоев алюминиевого сплава и стеклопластика, обычно изготавливаемого на основе эпоксидного связующего. Композиты GLARE обладают уникальным сочетанием свойств, таких как высокая усталостная прочность, высокие удельные статические свойства, отличная ударопрочность, хорошая остаточная прочность после удара и трещиностойкость, высокая огнестойкость и хорошая коррозионная стойкость [1-7]. Следовательно, исследование механических свойств таких материалов и элементов конструкций, включая анализ их динамических свойств, частотных характеристик и коэффициентов потерь, приобретает особую важность, так как вибрационные нагрузки представляют собой распространенное воздействие на элементы конструкций авиационной техники. Результаты такого исследования могут быть крайне ценными на практике, особенно для корректной оценки динамических свойств композитных материалов, используемых в авиастроении.

В работе [21] были представлены результаты численного моделирования образцов с демпфирующим слоем и без. Проведен сравнительный анализ результатов текущего исследования и с экспериментальным и аналитическим методом. Установлена зависимость изменения коэффициента демпфирования от амплитуды для образцов с и без демпфирующих лент для разных амплитуд.

В работе [22] предложены подходы к определению динамических демпфирующих свойств слоистых композитов и композитов с цилиндрическими включениями.

Решена задача определения собственной частоты вязкоупругой композитной балки и коэффициента потерь. Показано, что классическая стержневая модель Бернулли-Эйлера изгибные колебания учитывает только при поперечной укладке волокон. А модель типа Тимошенко позволяет учесть сдвиговой механизм диссипации как при продольной, так и при поперечной укладке волокон.

В работе [23] было исследовано влияние прокатки алюминиево-литиевого сплава в слоях алюмостеклопластика на статические и динамические свойства.

В настоящей работе рассматривается проблема определения динамических свойств слоистых композитов, изготовленных из алюмостеклопластика. Задача настоящей работы связана с идентификацией упругих свойств монослоев. Монослой стеклопластика предполагается ортотропным (и изотропным – для алюминиевых слоев) и работающим в условиях плоского напряженного состояния. Проводятся экспериментальные исследования и соответствующий обратный анализ для образцов в виде балок с оценкой влияния частоты вибрации и уровня максимальных деформации на демпфирующие свойства алюмостеклопластиков. Обратный анализ выполняется с использованием теории многослойных балок и метода комплексных модулей [8-10, 11-13, 17, 20]. Показано, что динамические свойства монослоев алюмостеклопластиков можно достоверно определять на основе предложенного подхода.

2. Материал и экспериментальные испытания

Настоящая работа посвящена исследованию поведения алюмостеклопластика с пятислойной структурой 3/2 (три слоя алюминиевого сплава и два слоя

стеклопластика). Композитные слои выполнены из стеклопластика марки КМКС-2.120. Т60.37 и имеют различные схемы армирования. Для проверки схемы армирования и определения толщины каждого слоя в исследуемых образцах проводилось исследование поверхности с использованием лазерного конфокального микроскопа Olympus LEXT OLS5000. Макроснимки представлены на рисунке 1. Геометрические размеры образцов представлены в таблице 1, толщина монослоев – в таблице 2. В испытаниях были использованы образцы в виде балок (полос) шириной 20 мм и длиной 300 мм, вырезанных из листов исходного композита.

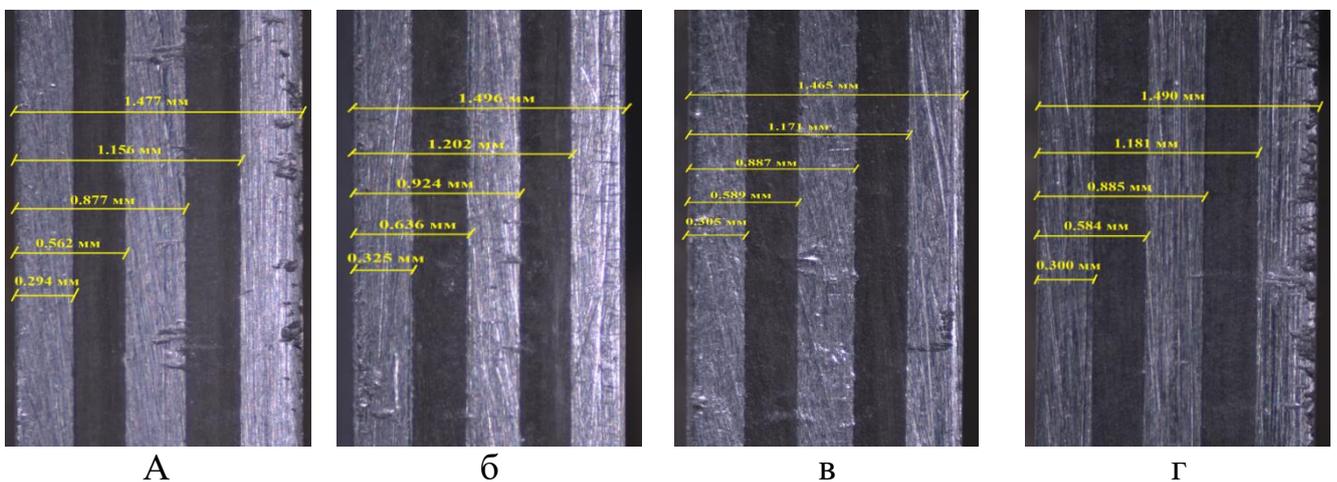


Рисунок 1. Макроснимки слоев GLARE

а. GLARE $-[0]$ б. GLARE $-[0/90]_c$ в. GLARE $-[\pm 45]_c$ г. GLARE $-[90]$

Таблица 1- Геометрические размеры образцов

Тип	Схема армирования	Толщина (мм)	Ширина (мм)
GLARE- $[0]$	$[Al/C-[0]_2/Al/C-[0]_2/Al]$	1,477	20,10
GLARE- $[0/90]_c$	$[Al/C-[0/90]/Al/C-[0/90]/Al]$	1,496	20,13
GLARE- $[\pm 45]_c$	$[Al/C-[\pm 45]/Al/C-[\pm 45]/Al]$	1,465	20,16
GLARE- $[90]$	$[Al/C-[90]_2/Al/C-[90]_2/Al]$	1,490	20,23

Таблица 2- Толщина монослоя GLARE

Тип	Толщина монослоя (мм)
GLARE-[0]	0,321/0,140/0,140/0,315/0,134/0,134/0,294
GLARE-[0/90] _c	0,325/0,156/0,156/0,288/0,139/0,139/0,294
GLARE-[±45] _c	0,305/0,142/0,142/0,298/0,142/0,142/0,294
GLARE-[90]	0,300/0,142/0,142/0,301/0,148/0,148/0,309

Все испытания проводились при комнатной температуре $T \approx 22 (\pm 1) ^\circ\text{C}$.

Квазистатические испытания на растяжение проводились с использованием универсальной испытательной машины Instron 5969 с бесконтактным видеоэкстензометром AVE 2 в соответствии с ASTM D3039 [14] для определения модуля упругости образцов в их осевом направлении. В статических испытаниях на растяжение был определен эффективный модуль упругости E^* для образцов с различными схемами армирования.

Для проведения динамических испытаний образцы жестко закреплялись металлическим захватом с одного конца, а другой конец оставлялся свободен. Схема и оборудование для проведенных динамических испытаний представлены на рис. 2. Далее наносился удар по свободному концу металлическим ударником либо задавалось начальное отклонение конца балки от положения равновесия. По результатам динамических испытаний определялись амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) образцов, и, в том числе, коэффициенты потерь. Перемещения в зоне свободного конца образцов измерялись лазерным датчиком Laser Triangulation Sensors RF603HS и передавались в программу, которая позволяет регистрировать кривые смещение/время и сохранять их в табличном и графическом

виде. Длина свободного конца балки L (вне захватов) была определена таким образом, чтобы обеспечить заданную собственную частоту колебаний балки ω_0 (20, 30 или 60 Гц). Определенные значения длин, которые были использованы для балок с различной схемой армирования, приведены ниже в таблице 3. Максимальное отклонение балки составляло во всех испытаниях $A_0 = 0,08L$. Собственные частоты и коэффициенты потерь для данной рабочей длины образцов определялись как среднее значение трех повторных испытаний. Схема и оборудование для проведения динамических испытаний представлены на рисунке 2.

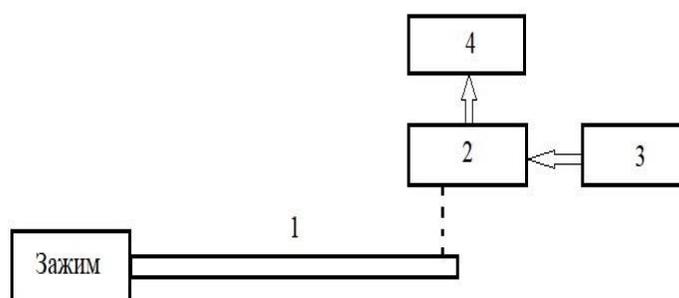


Рисунок. 2. Схема проведения динамического испытания.

1- исследуемый образец; 2 - лазерный датчик перемещения; 3 - регулируемый источник питания; 4 - компьютер для сборки и обработки результатов

Таблица 3- Рабочая длина исследуемых образцов

	Алюмостеклопластик	Длина(мм)	Количество
1	GLARE-[0]	258 - 211 – 148,5	3
2	GLARE-[0/90] _c	254 - 210 - 147	3
3	GLARE-[±45] _c	249 - 202 - 143	3
4	GLARE-[90]	253,5 - 206 - 144	3

Первая собственная частота балки вычислена на основе (АЧХ), полученных методом быстрого преобразования Фурье, коэффициент потерь определялся на основе расчета логарифмического декремента затуханий для четырех диапазонов смещений конца балки, отвечающих соответствующим диапазонам максимальным деформациям материала балки.

Затухающие колебания можно рассматривать как гармонические колебания, амплитуда которых изменяется экспоненциально: $A = A_0 e^{-\beta t}$ (A_0 – начальная амплитуда колебаний, β - коэффициент затухания). Логарифмический декремент затухания вычисляется, как отношение амплитуд двух последовательных колебаний, соответствующих моментам времени, отличающимся на период [15] :

$$\delta = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \beta T$$

где $T = T_0 = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega_0}$ - период колебаний, f – частота колебаний.

Затем коэффициент демпфирования определяется по логарифмическому декременту колебаний на основе соотношения:

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \quad \text{и если } \delta \ll 1, \quad \zeta = \frac{\delta}{2\pi}.$$

Коэффициент потерь определяется по формуле:

$$\eta = 2\zeta = \frac{\delta}{\pi} \quad (1)$$

Максимальная деформация в материале образцов оценивалась на основе решения задачи о колебаниях консольной балки. Максимум деформаций на

закрепленном конце балки для заданной амплитуды перемещений при i -м цикле колебаний была получена с использованием формулы [16]:

$$\varepsilon_{\text{мак}} = \frac{(1,875)^2 h A_i}{2l^2} \frac{\sin \beta l + \sinh \beta l}{\sin \beta l \cosh \beta l - \cos \beta l \sinh \beta l} \quad (2)$$

где $A_i = X(l)$ - амплитуда колебание консольной балки, которая определена в динамических испытаний в данный момент времени.

В результате экспериментов было установлено, что значение коэффициента потерь образцов алюмоплексостеклопластика сильно зависят от амплитуды колебаний. Более высокие амплитуды приводят к более высоким значениям идентифицированных коэффициентов потерь. Для определение зависимости динамических свойств от амплитуды, предложено разделить полный диапазон амплитуд отклонений конца балки, которые реализуются в течение первых ~ 100 циклов колебаний, на 4 поддиапазона, в которых отклонение изменяется в диапазонах $A_0 \dots \frac{1}{3} A_0$, $\frac{1}{2} A_0 \dots \frac{1}{4} A_0$, $\frac{1}{3} A_0 \dots \frac{1}{6} A_0$, и $< \frac{1}{6} A_0$.

Найденные в этих дапазонах смещений коэффициенты потерь были связаны со значением максимальной деформации. Иллюстрация выполненного анализа во временной области приведена на рисунке 3. Приближение экспоненциального затухания в четырех поддиапазонах показано сплошными линиями, и видно, что вне этих диапазонов (пунктирные линии) выбранная скорость затухания (определяемая коэффициентом потерь) становится недействительной, и реальный колебательный процесс протекает с иным коэффициентом потерь.

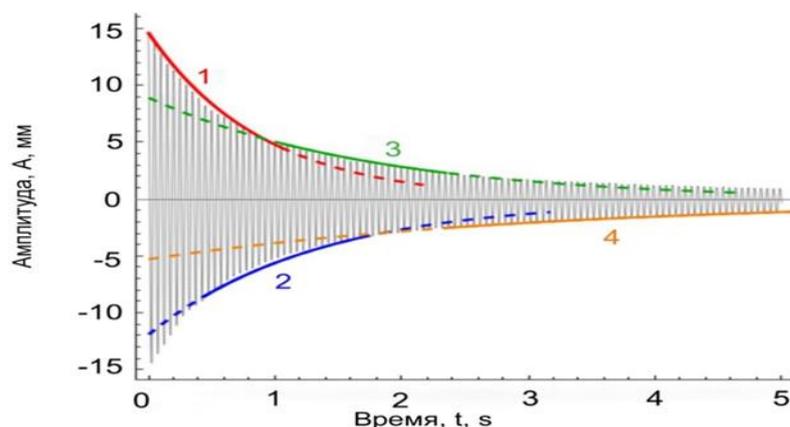


Рисунок 3. Определение коэффициента потерь методом логарифмического декремента затухания колебаний для четырех диапазонов смещений конца балки

3. Результаты экспериментальных исследований

Результаты статических испытаний

Результаты квазистатических испытаний на растяжение алюминиевого сплава и алюмокомпозитов представлены на рисунке 4. На основе диаграмм были найдены статические модули упругости сплава и эффективные продольные модули упругости образцов алюмокомпозитов с различной схемой армирования. Эти характеристики представлены в таблице 4.

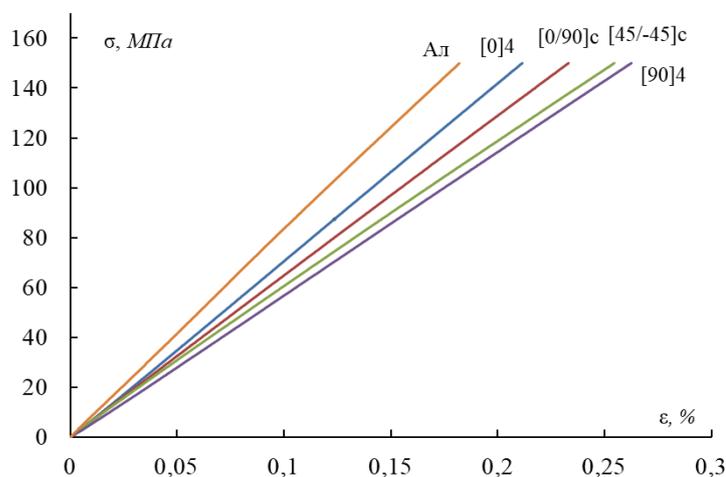


Рисунок 4. Диаграмма напряжение-деформации при статических испытаниях на растяжение образцов алюмокомпозитов

Таблица 4- Статический модуль упругости алюмокомпозитов и сплава

	GLARE-[0]	GLARE- [0/90] _c	GLARE- [±45] _c	GLARE-[90]	Al
Статический модуль упругости (ГПа)	71,5	64,3	59	57,7	82,8

Результаты динамических испытаний

По формуле (2), определялась максимальная деформация балок GLARE с различной схемой армирования. Результаты экспериментального определения эффективного коэффициента потерь слоистых материалов из алюмокомпозитов с различной схемой укладки представлены на рисунке 5.

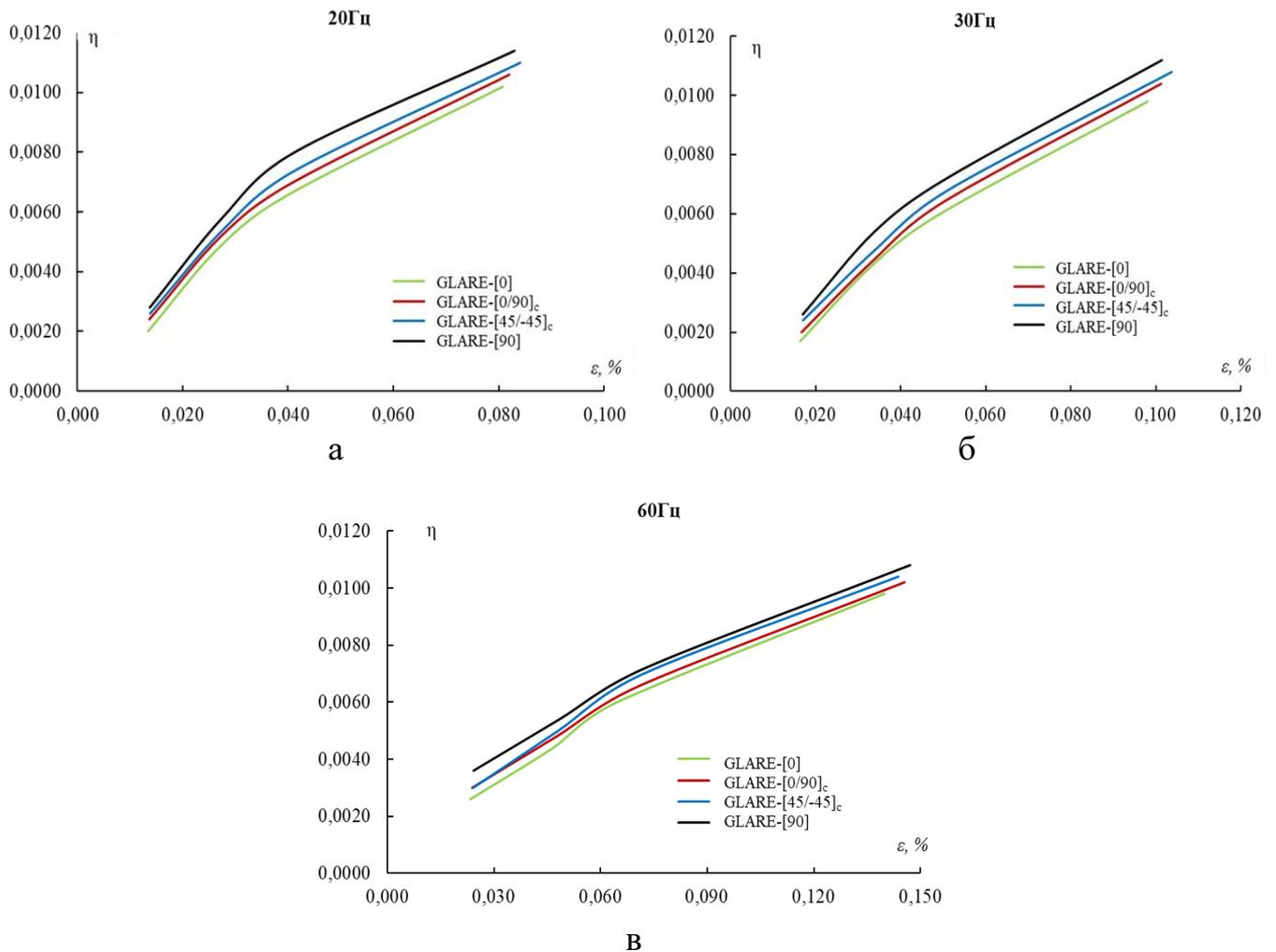


Рисунок 5. Коэффициенты потерь образцов алюмокомпозитов, найденные для различных схем армирования, частот и максимальных амплитуд деформации в экспериментальных испытаниях. а: $\omega_0 = 20$ Гц; б: $\omega_0 = 30$ Гц; в: $\omega_0 = 60$ Гц

4. Идентификация свойств монослоя

Идентификация упругих и демпфирующих свойств монослоя по известным значениям динамических характеристик образцов композитов с разными схемами армирования выполняется на основе теории многослойных балок и метода комплексных модулей [13, 17]. Эффективная плотность определяется по формуле:

$$\rho = \rho_{Al} \frac{3h_{Al}}{h} + \rho_{стекло} \frac{4h_{стекло}}{h} \quad (3)$$

Здесь, ρ - Плотность алюмокомпозитопластика; $\rho_{Al} = 2650 \text{ кг/м}^3$ – плотность сплава; $\rho_{стекло} = 1738 \text{ кг/м}^3$ – плотность стеклопластика.

h_{Al} - толщина одного слоя сплава

$h_{стекло}$ - толщина одного слоя стеклопластика

h – толщина образца.

Первая собственная частота консольной балки была рассчитана на основе соотношения [11]:

$$\omega_0 = \frac{\beta}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{H\rho}} \quad (4)$$

$D = I_2 - \frac{I_1^2}{I_0}$ - жесткость балки при изгибе, I_i – коэффициенты жесткости которые

задаются формулам [11]:

$$I_0 = bh \sum_{k=1}^4 E_x^{(k)}, \quad I_1 = \frac{1}{2} bh \sum_{k=1}^4 E_x^{(k)} (t_{k-1} + t_k), \quad I_2 = \frac{1}{3} bh \sum_{k=1}^4 E_x^{(k)} (t_{k-1}^2 + t_{k-1}t_k + t_k^2) \quad (5)$$

где $E_x^{(k)} = Q_{11}^{(k)} - (Q_{12}^{(k)})^2 / Q_{22}^{(k)}$ представляют собой модуль упругости k -го слоя в

направлении оси балки, рассчитанный в соответствии с классической теорией слоистых композитов через константы жесткости монослоя $Q_{ij}^{(k)}$ с учетом угла ориентации волокон θ_k .

Для слоев стеклопластика матрица констант жесткости в нотации Фойгта определяется по формуле:

$$\mathbf{Q}_k = \mathbf{T}_k^{-1} \mathbf{Q} \mathbf{R} \mathbf{T}_k \mathbf{R}^{-1} \quad (6)$$

$$\mathbf{T}_k = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta_k & \sin^2 \theta_k & 2 \cos \theta_k \sin \theta_k \\ \sin^2 \theta_k & \cos^2 \theta_k & -2 \cos \theta_k \sin \theta_k \\ -\cos \theta_k \sin \theta_k & \cos \theta_k \sin \theta_k & \cos^2 \theta_k - \sin^2 \theta_k \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{Q} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{pmatrix} \quad (8)$$

Здесь, $Q_{ij}^{(k)}$ компоненты матрицы \mathbf{Q}_k , и Q_{ij} компоненты матрицы \mathbf{Q} , которые определяют ортотропные свойства однонаправленного слоя.

$$Q_{11} = E_1 / (1 - \nu_{12}\nu_{21}) \quad Q_{22} = E_2 / (1 - \nu_{12}\nu_{21}) \quad Q_{12} = \nu_{12}E_2 / (1 - \nu_{12}\nu_{21}) \quad (9)$$

$$Q_{66} = G_{12} \quad \nu_{21}E_1 = \nu_{12}E_2 \quad (10)$$

Для слоев сплава приведенные модули упругости вычисляются по формулам:

$$Q_{11}(Al) = E_{Al} / (1 - \nu_{Al}^2); \quad Q_{22}(Al) = E_{Al} / (1 - \nu_{Al}^2); \quad Q_{12}(Al) = \nu_{Al}E_{Al} / (1 - \nu_{Al}^2) \quad (11)$$

$$G_{12}(Al) = \frac{E_{Al}}{2(1 + \nu_{Al})}; \quad Q_{66}(Al) = G_{12}(Al) \quad (12)$$

Свойства монослоя неизвестны и должны быть найдены на основе обратного анализа. Рассматривая затухающие гармонические процессы, мы можем

использовать метод комплексных модулей и определить упругие свойства однослойного материала следующим образом [18, 19]:

$$E_1^* = E_1(1 + i\eta_1); E_2^* = E_2(1 + i\eta_2); G_{12}^* = G_{12}(1 + i\eta_{12}); E_{Al}^* = E_{Al}(1 + i\eta_{Al}) \quad (13)$$

где, знак звездочка (*) обозначает комплексные величины, E_1, E_2, G_{12}, E_{Al} - модули упругости, $\eta_1, \eta_2, \eta_{12}, \eta_{Al}$ - коэффициенты потерь. Коэффициент Пуассона обычно считается действительным в теории демпфирования слоистых материалов.

Подставляя комплексные модули (13) в решение (4)-(12), можем найти комплексную частоту балки, которую затем можно использовать для нахождения собственной частоты и эффективного коэффициента потерь следующим образом:

$$\omega_0 = \sqrt{\text{Re}((\omega_0^*)^2)}, \quad \eta = \frac{\text{Im}((\omega_0^*)^2)}{\text{Re}((\omega_0^*)^2)} \quad (14)$$

На основе представленных соотношений выполнялся обратный анализ, чтобы согласовать рассчитанные собственные частоты и эффективные коэффициенты потерь балок с различной схемой армирования с полученными экспериментальными данными. Решение обратной задачи выполнялась с использованием алгоритма Нелдера-Мида, реализованного в математической программе Wolfram Mathematica.

Из решения обратной задачи находился оптимальный набор свойств однослойного материала $E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}, E_{Al}, \nu_{Al}, \eta_1, \eta_2, \eta_{12}, \eta_{Al}$ позволяющий минимизировать относительные погрешности между экспериментальными и расчетными данными для динамических характеристик балок из алюмокомпозитов в приближении наименьших квадратов следующим образом:

$$f(E_1, E_2, \nu_{12}, G_{12}, E_{Al}, \nu_{Al}, \eta_1, \eta_2, \eta_{12}, \eta_{Al}) \rightarrow \min$$

$$f = \sqrt{\sum_{i=1}^4 (\Delta \omega_{0,i})^2 + \sum_{i=1}^4 (\Delta \eta_{0,i})^2}, \quad (15)$$

$$\Delta \omega_{0,i} = \frac{\omega_{0,i}^{(\text{экспер})} - \omega_{0,i}^{(\text{расчет})}}{\omega_{0,i}^{(\text{экспер})}}; \quad \Delta \eta_{0,i} = \frac{\eta_{0,i}^{(\text{экспер})} - \eta_{0,i}^{(\text{расчет})}}{\eta_{0,i}^{(\text{экспер})}}$$

Где, $\omega_{0,i}^{(\text{экспер})}$ - экспериментальная частота

$\omega_{0,i}^{(\text{расчет})}$ - расчетная частота

Оптимальные значения упругих и демпфирующих свойств монослоев композита определялись в следующих диапазонах, которые охватывают типичные свойства монослоев алюмоплексигластик:

$$10 \leq E_1 \leq 70 \text{ [ГПа]}; 1 \leq E_2 \leq 18 \text{ [ГПа]}; 1 \leq G_{12} \leq 10 \text{ [ГПа]}; 70 \leq E_2 \leq 85 \text{ [ГПа]};$$

$$0,1 \leq \nu_{12} \leq 0,35; 0,3 \leq \nu_{Al} \leq 0,35; 0 < \eta_1, \eta_2, \eta_{12} \leq 0,05; 0 < \eta_{Al} \leq 0,015 \quad (16)$$

Относительное отклонение наилучшего приближения (отклонение решения обратной задачи от экспериментальных данных) по частоте определялось по

формуле:

$$\Delta \omega = \frac{|\omega_{\text{расчет}} - \omega_{\text{экспер}}|}{\omega_{\text{экспер}}} 100, \% \quad (17)$$

Среднеквадратичная ошибка вычислялась следующим образом:

$$f = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta_i)^2} \quad i=1 \dots n \quad (18)$$

В результате проведенных расчетов были определены упругие и диссипативные характеристики монослоев GLARE методом обратного анализа. При этом рассматривались три метода решения рассматриваемых обратных задач:

1. *Обратный анализ для коэффициентов потерь с заданием известных статических модулей монослоев, определенных предварительно по данным статических испытаний. Результаты идентификации свойств монослоев представлены на рис. 6, а соответствующие ошибки прогноза на рис. 7-8.*

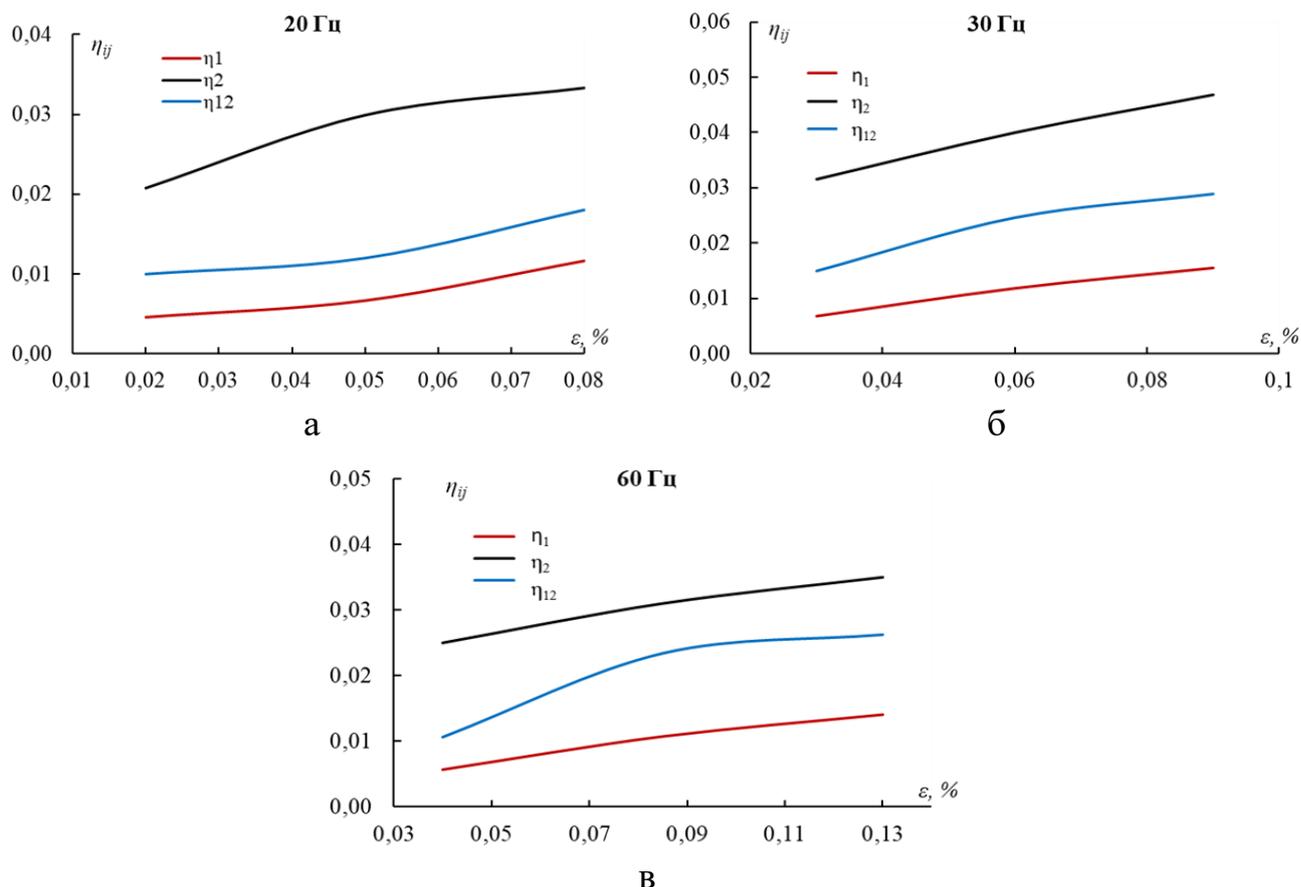


Рисунок 6. Коэффициенты потерь монослоев, найденные на основе обратного анализа. а: $\omega_0 = 20$ Гц; б: $\omega_0 = 30$ Гц; в: $\omega_0 = 60$ Гц

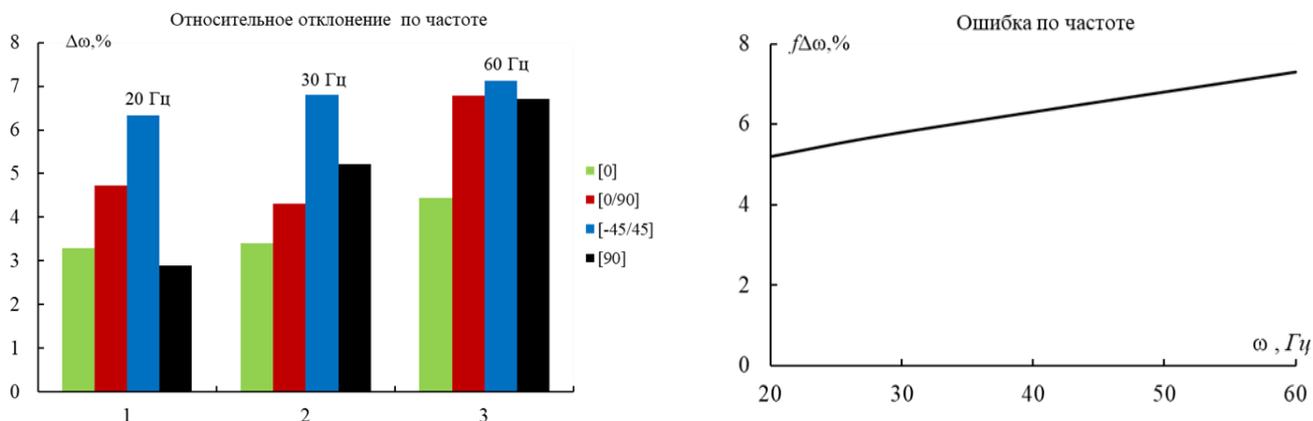


Рисунок 7. Относительное отклонение рассчитанных собственных частот от экспериментальных данных

Рисунок 8. Зависимость ошибки расчета для коэффициента потерь при различной частоте вибраций

2. *Обратный анализ с последовательной идентификацией динамических упругих свойств и коэффициентов потерь на основе данных динамических испытаний.* Решение обратной задачи выполнялось вначале только на основе расчета собственной частоты образцов и, соответственно, проводилась идентификация упругих свойств монослоев. Затем решение обратной задачи выполнялось для определения эффективного коэффициента потерь образцов и идентификации коэффициентов потерь монослоев композита (при этом упругие свойства считались заданными и определенными на предыдущем этапе анализа). Результаты расчета и ошибки расчета представлены на рис. 9-11.

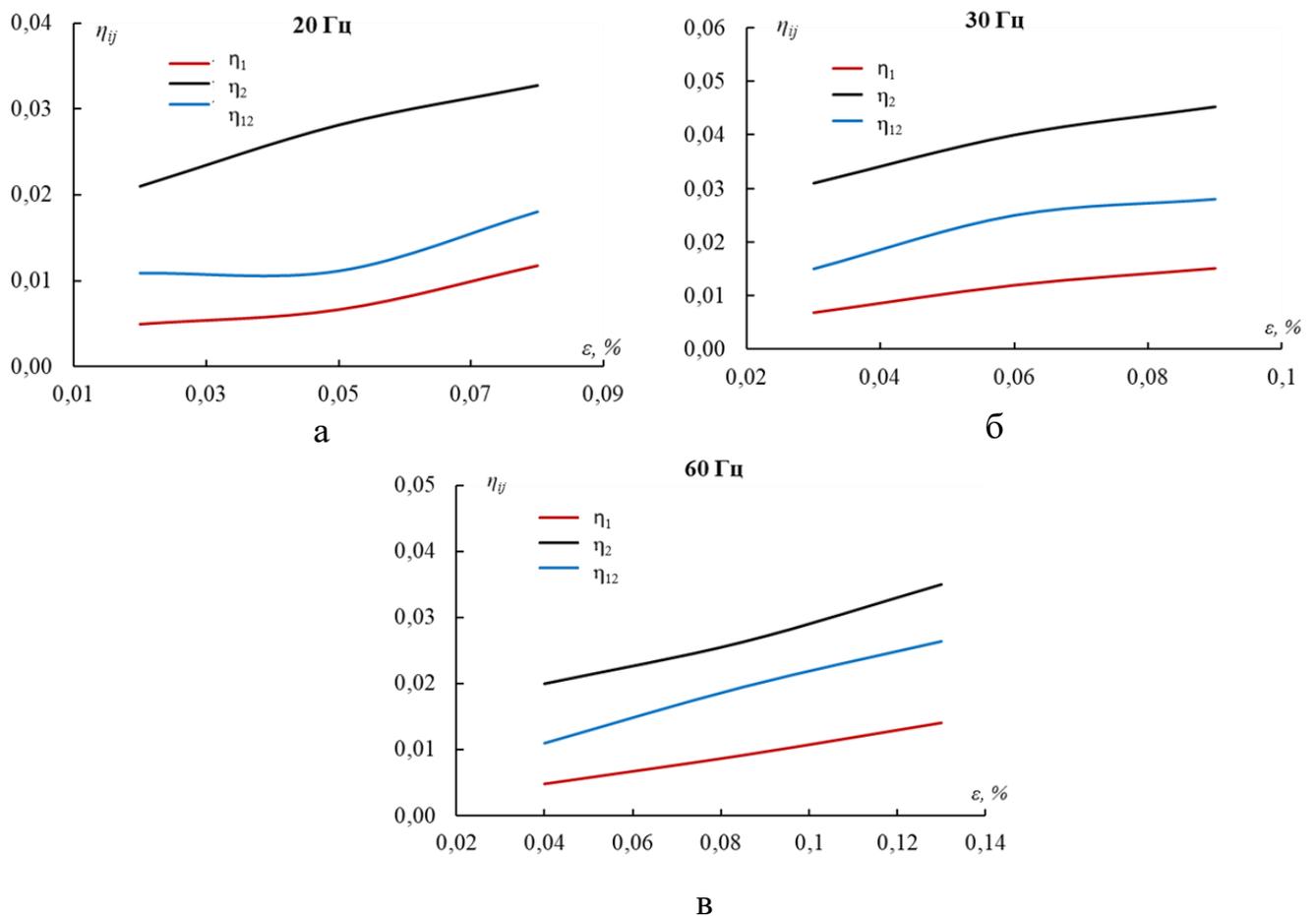


Рисунок 9. Коэффициенты потерь монослоев, найденные на основе обратного анализа. а: $\omega_0 = 20 \text{ Гц}$; б: $\omega_0 = 30 \text{ Гц}$; в: $\omega_0 = 60 \text{ Гц}$

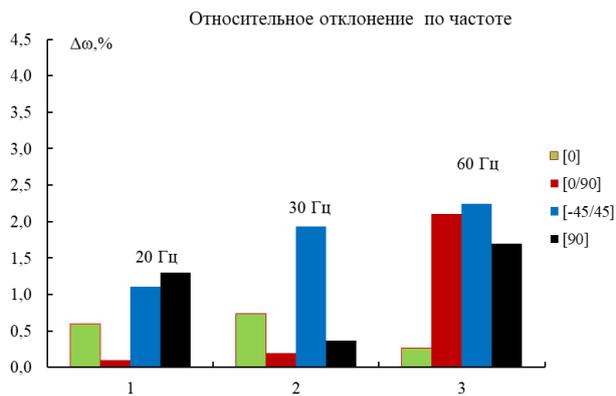


Рисунок 10. Относительное отклонение рассчитанных собственных частот от экспериментальных данных

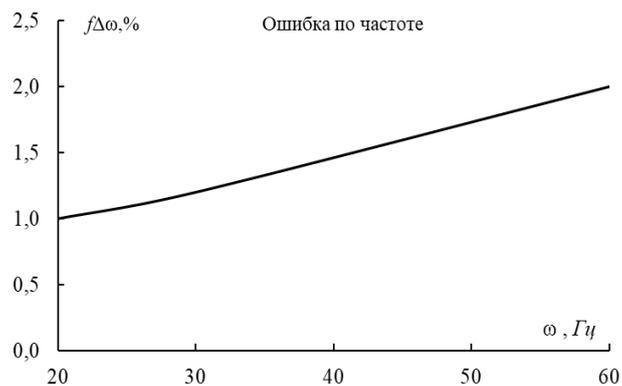
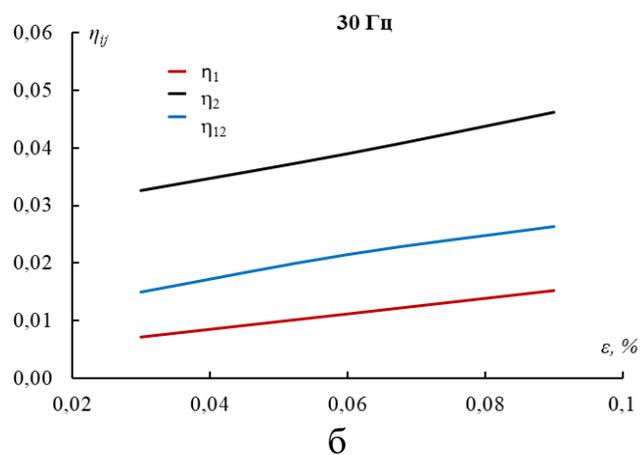
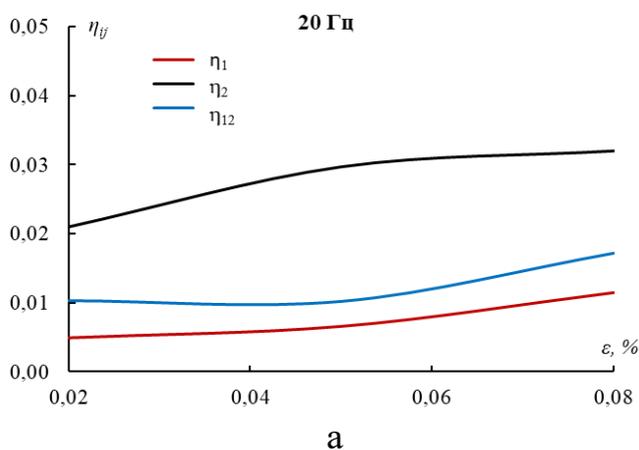


Рисунок 11. Зависимость ошибки расчета для коэффициента потерь при различной частоте вибраций

3. *Обратный анализ с одновременной идентификацией упругих динамических модулей и коэффициентов потерь на основе данных динамических испытаний. В этом подходе решалась одновременная задача по поиску упругих и диссипативных свойств с минимизацией функции ошибки в виде (15). Результаты и ошибки такого подхода к идентификации представлены на рис. 12-14.*



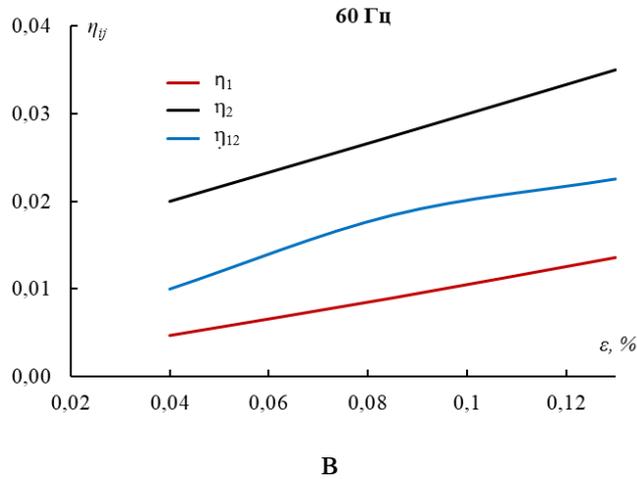


Рисунок 12. Коэффициенты потерь монослоев, найденные на основе обратного анализа. а: $\omega_0 = 20$ Гц, б: $\omega_0 = 30$ Гц, в: $\omega_0 = 60$ Гц

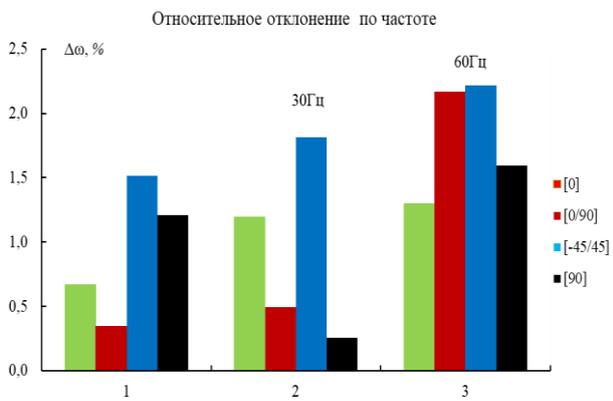


Рисунок 13. Относительное отклонение рассчитанных собственных частот от экспериментальных данных

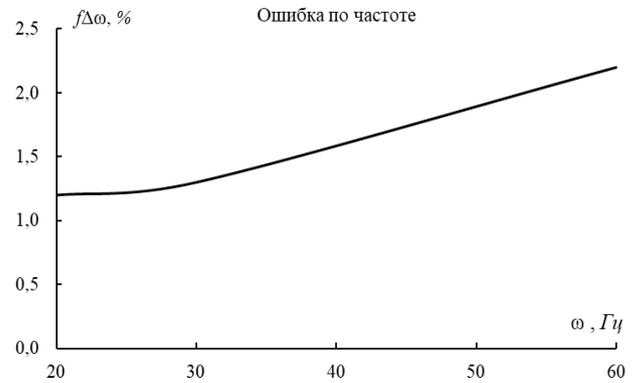


Рисунок 14. Зависимость ошибки расчета для коэффициента потерь при различной частоте вибраций

5. Выводы

1. На основе проведенных исследований было выявлено, что коэффициент потерь алюмокомпозитного материала возрастает с увеличением амплитуды вибрации и незначительно снижается при увеличении частоты колебаний (в рассмотренных диапазонах амплитуд и частот). Среди всех исследованных структур, максимальное значение коэффициента потерь было характерно для монослоев алюмокомпозитного материала со структурой GLARE-[90]. Наименьший коэффициент

потерь реализуется для образцов алюмопестклопластика со структурой GLARE-[0], однако, соответствующие коэффициенты потерь не являются пренебрежимо малыми (что иногда полагается в расчетах) и должны учитываться наряду с остальными коэффициентами потерь. Структура GLARE-[±45]_c обладала средним уровнем демпфирующих свойств.

2. Были определены коэффициенты потерь монослоев и рассчитаны показатели, такие как относительное отклонение и ошибки по частоте при использовании идентифицированных параметров монослоев для образцов GLARE с различными схемами армирования. Исследование показало, что наиболее достоверные результаты и наименьшие погрешности демонстрирует метод идентификации, представленный под номером 2, в котором проводится последовательная оценка упругих и диссипативных свойств монослоев алюмопестклопластика. Применение статических свойств дает погрешности в анализе динамического поведения образцов, а одновременная идентификация упругих и диссипативных свойств монослоев приводит к усложнению решения обратной задачи и повышению численных ошибок.

Список источников

1. Серебренникова Н.Ю., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ерасов В.С., Каширин В.В. Гибридные слоистые материалы на базе алюминий-литиевых сплавов применительно к панелям крыла самолета // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № 3 (42). С. 3-8. DOI: [10.18577/2071-9140-2016-0-3-3-8](https://doi.org/10.18577/2071-9140-2016-0-3-3-8)
2. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3-33. DOI: [10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33](https://doi.org/10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33)
3. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Т., Лукина Н.Ф. Новый класс слоистых алюмокомпозитов на основе алюминий-литиевого сплава 1441 с пониженной плотностью // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия машиностроение*. 2011. № 52. С. 174-183.
4. Антипов В.В. и др. Перспективы применения в авиационных конструкциях слоистых металлополимерных материалов на основе алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1. С. 45–53. DOI: [10.18577/2071-9140-2020-0-1-45-53](https://doi.org/10.18577/2071-9140-2020-0-1-45-53)
5. Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Сенаторова О.Г., Морозова Л.В., Лукина Н.Ф., Нефедова Ю.Н. Гибридные слоистые материалы с небольшой скоростью развития усталостной трещины // *Вестник машиностроения*. 2016. № 12. С. 45-49.
6. Wu Guocai, Yang J M. The mechanical behaviour of GLARE laminates of aircraft structures // *Journal of the Minerals, Metals, Materials Society*, 2005, vol. 57, issue 1, pp. 72-79. DOI: [10.1007/s11837-005-0067-4](https://doi.org/10.1007/s11837-005-0067-4)

7. Шестов В.В., Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Нефедова Ю.Н. Высокопрочный слоистый материал на основе листов из алюминий-литиевого сплава // Технология легких сплавов. 2016. № 1. С. 119–123.
8. Васильев В.В., Протасов В.Д., Болотин В.В. и др. Композиционные материалы: Справочник. - М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
9. Ganapathi M., Patel B.P., Touratier M. Influence of amplitude of vibrations on loss factors of laminated composite beams and plates // Journal of Sound and Vibration, 1999, no. 219 (4), pp. 730-738.
10. Hui Li, Yi Niu, Chao Mu, and Bangchun Wen. Identification of Loss Factor of Fiber-Reinforced Composite Based on Complex Modulus Method // Shock and Vibration, 2017. DOI: [10.3390/ma15165559](https://doi.org/10.3390/ma15165559)
11. Vasiliev V.V., Morozov E.V. Advanced mechanics of composite materials and structures, Elsevier, 2018, 864 p.
12. Robert M. Jones. Mechanics of Composite Materials, CRC Press, 1998, 538 p.
13. Tran Quyet Thang, Rabinskiy L.N., Yury Solyaev, Fedor Nasonov. Inverse analysis for the amplitude-dependent damping properties of epoxy/glass fiber laminates // Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal, 2024, no. 15 (2). DOI: [10.1615/CompMechComputApplIntJ.2023049468](https://doi.org/10.1615/CompMechComputApplIntJ.2023049468)
14. ASTM D3039/D3039M-08. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, 2014. URL: https://www.astm.org/d3039_d3039m-08.html
15. Fu Z.F., He J. Modal analysis, Elsevier, 2001, 304 p.

16. Gere J.M., Timoshenko S.P. Mechanics of Materials, Boston, PWS Publishing Company, 1997, 912 p.
17. Рабинский Л.Н., Соляев Ю.О., Чан К.Т., Нгуен Т.Л. Идентификация свойств монослоя стеклопластика на основе динамических испытаний консольных балок // Материалы XXIX международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механика конструкции и оплошных сред» имени А.Г. Горшкова (Кремёнки, 15-19 мая 2023). - М.: ООО ТРП, 2023. С. 180.
18. Jones R.M. Mechanics of composite materials, CRC press, 2018, 538 p.
19. Chandra R., Singh S.P., Gupta K. Micromechanical damping models for fiber-reinforced composites: A comparative study // Composites - Part A: Applied Science and Manufacturing, 2002, no. 33 (6), pp 787-796. URL: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(02\)00019-2](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(02)00019-2)
20. Прокудин О.А., Рабинский Л.Н., Чан Куэт Тханг. Определение динамических характеристик металлополимерного слоистого стержня // Труды МАИ. 2021. № 120. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=161419>. DOI: [10.34759/trd-2021-120-06](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-06)
21. Поляков П.О., Шестеркин П.С. Численное моделирование демпфирующих покрытий // Труды МАИ. 2022. № 126. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168998>. DOI: [10.34759/trd-2022-126-12](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-12)
22. Кривень Г.И. Оценка демпфирующих свойств композитов // Труды МАИ. 2022. № 127. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=170333>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-05](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-05)
23. Рабинский Л.Н., Бабайцев А.В., Шестеркин П.С. Исследование влияния проката в слоях алюмопластика на статические и динамические свойства //

Труды МАИ. 2022. № 124. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=166911>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-05](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-05)

Referens

1. Serebrennikova N.Yu., Antipov V.V., Senatorova O.G., Erasov V.S., Kashirin V.V. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2016, no. 3 (42), pp. 3-8. DOI: [10.18577/2071-9140-2016-0-3-3-8](https://doi.org/10.18577/2071-9140-2016-0-3-3-8)
2. Kablov E.N. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3-33. DOI: [10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33](https://doi.org/10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33)
3. Kablov E.N., Antipov V.V., Senatorova O.T., Lukina N.F. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya mashinostroenie*, 2011, no. 52, pp. 174-183.
4. Antipov V.V. et al. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2020, no. 1, pp. 45–53. DOI: [10.18577/2071-9140-2020-0-1-45-53](https://doi.org/10.18577/2071-9140-2020-0-1-45-53)
5. Antipov V.V., Serebrennikova N.Yu., Senatorova O.G., Morozova L.V., Lukina N.F., Nefedova Yu.N. *Vestnik mashinostroeniya*, 2016, no. 12, pp. 45-49.
6. Wu Guocai, Yang J M. The mechanical behaviour of GLARE laminates of aircraft structures, *Journal of the Minerals, Metals, Materials Society*, 2005, vol. 57, issue 1, pp. 72-79. DOI: [10.1007/s11837-005-0067-4](https://doi.org/10.1007/s11837-005-0067-4)
7. Shestov V.V., Antipov V.V., Serebrennikova N.Yu., Nefedova Yu.N. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2016, no. 1, pp. 119–123.
8. Vasil'ev V.V., Protasov V.D., Bolotin V.V. et al. *Kompoztsionnye materialy* (Composite materials), Moscow, Mashinostroenie, 1990, 512 p.

9. Ganapathi M., Patel B.P., Touratier M. Influence of amplitude of vibrations on loss factors of laminated composite beams and plates, *Journal of Sound and Vibration*, 1999, no. 219 (4), pp. 730-738.
10. Hui Li, Yi Niu, Chao Mu, and Bangchun Wen. Identification of Loss Factor of Fiber-Reinforced Composite Based on Complex Modulus Method, *Shock and Vibration*, 2017. DOI: [10.3390/ma15165559](https://doi.org/10.3390/ma15165559)
11. Vasiliev V.V., Morozov E.V. *Advanced mechanics of composite materials and structures*, Elsevier, 2018, 864 p.
12. Robert M. Jones. *Mechanics of Composite Materials*, CRC Press, 1998, 538 p.
13. Tran Quyet Thang, Rabinskiy L.N., Yury Solyaev, Fedor Nasonov. Inverse analysis for the amplitude-dependent damping properties of epoxy/glass fiber laminates, *Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal*, 2024, no. 15 (2). DOI: [10.1615/CompMechComputApplIntJ.2023049468](https://doi.org/10.1615/CompMechComputApplIntJ.2023049468)
14. ASTM D3039/D3039M-08. *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, 2014. URL: https://www.astm.org/d3039_d3039m-08.html
15. Fu Z.F., He J. *Modal analysis*, Elsevier, 2001, 304 p.
16. Gere J.M., Timoshenko S.P. *Mechanics of Materials*, Boston, PWS Publishing Company, 1997, 912 p.
17. Rabinskii L.N., Solyaev Yu.O., Chan K.T., Nguen T.L. *Materialy XXIX mezhdunarodnogo simpoziuma «Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhanika konstruksii i oploshnykh sred» imeni A.G. Gorshkova*, Moscow, OOO TRP, 2023, pp. 180.
18. Jones R.M. *Mechanics of composite materials*, CRC press, 2018, 538 p.

19. Chandra R., Singh S.P., Gupta K. Micromechanical damping models for fiber-reinforced composites: A comparative study, *Composites - Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2002, no. 33 (6), pp. 787-796. URL: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(02\)00019-2](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(02)00019-2)
20. Prokudin O.A., Rabinskii L.N., Chan Kuet Tkhang. *Trudy MAI*, 2021, no. 120. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=161419>. DOI: [10.34759/trd-2021-120-06](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-06)
21. Polyakov P.O., Shesterkin P.S. *Trudy MAI*, 2022, no. 126. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=168998>. DOI: [10.34759/trd-2022-126-12](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-12)
22. Kriven' G.I. *Trudy MAI*, 2022, no. 127. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=170333>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-05](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-05)
23. Rabinskii L.N., Babaitsev A.V., Shesterkin P.S. *Trudy MAI*, 2022, no. 124. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=166911>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-05](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-05)

Статья поступила в редакцию 15.01.2024

Одобрена после рецензирования 17.01.2024

Принята к публикации 27.02.2024

The article was submitted on 15.01.2024.; approved after reviewing on 17.01.2024;
accepted for publication on 27.02.2024