



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 4, 2020

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index>



DOI: 10.15593/perm.mech/2020.4.22

УДК 539.3

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕХСЛОЙНЫХ БАЛОК С НЕСУЩИМИ СЛОЯМИ ИЗ АЛЮМОСТЕКЛОПЛАСТИКА

О.А. Прокудин¹, Ю.О. Соляев^{1, 2}, А.В. Бабайцев¹, А.В. Артемьев¹, М.А. Коробков¹

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

²Институт прикладной механики Российской академии наук, Москва, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 30 июля 2020 г.
Принята: 04 декабря 2020 г.
Опубликована: 30 декабря 2020 г.

Ключевые слова:

алюмокомпозитный пластик, трехслойные балки, динамические испытания, коэффициент демпфирования, вспененный наполнитель.

АННОТАЦИЯ

Алюмокомпозитный пластик является перспективным авиационным материалом, обладающим повышенными характеристиками удельной жесткости и прочности, усталостной прочностью, ударопрочностью, остаточной прочностью после удара. В настоящее время алюмокомпозитный пластик марки GLARE применяется для изготовления элементов обшивки фюзеляжа дальнемагистральных пассажирских самолетов Airbus A380, а также в качестве некоторых отдельных элементов авиационных конструкций. Настоящая работа посвящена определению динамического поведения образцов СИАЛа, работающих в составе трехслойных конструкций со вспененным наполнителем. Представлены результаты экспериментальных исследований собственных частот и коэффициентов демпфирования трехслойных балок, выполненных с несущими слоями из пятислойного алюмокомпозитного пластика СИАЛ и с наполнителем из вспененного полиимиды. Испытания проведены с использованием метода свободных затухающих изгибных колебаний консольно-закрепленных образцов. Динамические параметры трехслойных балок вычислены на основе анализа амплитудно-частотных характеристик, полученных методом быстрого преобразования Фурье. Механические характеристики образцов СИАЛа и наполнителя предварительно определены в статических и динамических испытаниях. Коэффициент демпфирования наполнителя определен методом динамического механического анализа. Модуль сдвига наполнителя определен по результатам измерения изгибной жесткости изготовленных трехслойных балок в квазистатических испытаниях на трехточечный изгиб. На основе сопоставления расчетных данных и результатов экспериментов показано, что в динамических испытаниях происходит снижение изгибной жесткости трехслойных образцов, по сравнению с расчетными значениями, что может быть связано с особенностями изменения характеристик пористого наполнителя при динамическом нагружении. Значение коэффициента демпфирования образцов СИАЛа составило $\sim 0,02$, вспененного наполнителя $\sim 0,08$, а трехслойных балок $\sim 0,067$ в диапазоне частот колебаний до 60 Гц.

© ПНИПУ

© Прокудин Олег Александрович – асп., e-mail: Prokudin_7713@mail.ru, ID: 0000-0002-2929-6728.

Соляев Юрий Олегович – к.ф.-м.н., доц., e-mail: yos@iam.ras.ru, ID: 0000-0001-8258-2726.

Бабайцев Арсений Владимирович – м.н.с., e-mail: Ar77eny@gmail.ru, ID: 0000-0002-8302-1469.

Артемьев Андрей Вячеславович – ст. преп., e-mail: andart61@gmail.com, ID: 0000-0001-5528-2920.

Коробков Максим Андреевич – ассист., e-mail: josef_turok@bk.ru.

Oleg A. Prokudin – PhD Student, e-mail: Prokudin_7713@mail.ru, ID: 0000-0002-2929-6728.

Yury O. Solyaev – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, e-mail: yurysolyaev@yandex.ru,

ID: 0000-0001-8258-2726.

Arseniy V. Babaytsev – Junior Researcher, e-mail: Ar77eny@gmail.ru, ID: 0000-0002-8302-1469.

Andrey V. Artemyev – Senior Lecturer, e-mail: andart61@gmail.com, ID: 0000-0001-5528-2920.

Maxim A. Korobkov – Assistant, e-mail: josef_turok@bk.ru.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THREE-LAYER BEAMS WITH LOAD-BEARING LAYERS MADE OF ALUMINO-GLASS PLASTIC

O.A. Prokudin¹, Y.O. Solyaev^{1,2}, A.V. Babaytsev¹, A.V. Artemyev¹, M.A. Korobkov¹

¹Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

²Institute of Applied Mechanics of the Russian Academy of Sciences (IAM RAS), Moscow, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 30 July 2020
Accepted: 04 December 2020
Published: 30 December 2020

Keywords:

aluminum-fiberglass, GLARE, three-layer beams, dynamic tests, damping coefficient, foam core.

ABSTRACT

Aluminum-fiber-reinforced plastics (GLARE) are promising aviation materials with increased characteristics of specific stiffness and strength, fatigue strength, impact resistance, and residual strength after impact. Nowadays, GLARE are used for making elements of the fuselage of the long-haul passenger aircraft Airbus A380, as well as some other elements of aircraft structures. The results of experimental studies of eigenfrequencies and damping coefficients of three-layer beams made with face sheets of five-layer GLARE and with a core made of polyimide foam are presented. The tests were performed using the method of free bending vibrations of cantilever samples. The dynamic parameters of the three-layer beams were calculated based on the analysis of amplitude-frequency characteristics obtained by the fast Fourier transform method. Mechanical characteristics of GLARE and filler samples are preliminary determined in static and dynamic tests. The damping factor of the core is determined by the dynamic mechanical analysis method. The core shear modulus is determined by measuring the flexural rigidity of manufactured three-layer beams in a quasi-static three-point bending test. Based on a comparison of the design data and the results of the experiments, it is shown that in dynamic tests, the flexural rigidity of three-layer specimens is reduced in comparison with the estimated values, which may be due to the peculiarities of changing the characteristics of the foam core under dynamic loading. The value of the damping factor of GLARE samples was ~ 0.02 , the foamed core was ~ 0.08 and three-layer beams were ~ 0.067 in the range of vibration frequency up to 60 Hz.

© PNRPU

Введение

Алюмостеклопластики являются перспективными авиационными материалами, обладающими повышенными характеристиками удельной жесткости и прочности, усталостной прочности, ударопрочности, остаточной прочности после удара [1–4]. В настоящее время алюмостеклопластики марки GLARE применяются для изготовления элементов обшивки фюзеляжа дальнемагистральных пассажирских самолетов Airbus A380, а также некоторых отдельных элементов авиационных конструкций [4–7]. В России аналогом GLARE являются, в частности, материалы марки СИАЛ, исследованию которых посвящено значительное количество недавних работ [2, 3, 8–10], в том числе связанных с моделированием и испытанием крупногабаритных образцов несущих авиационных конструкций [11, 12].

Настоящая работа посвящена определению динамического поведения образцов СИАЛа, работающих в составе трехслойных конструкций со вспененным наполнителем. Такие материалы могут применяться в качестве элементов обшивки самолетов или других транспортных средств, к которым предъявляются требования по повышенной удельной жесткости и прочности, а также могут предъявляться дополнительные требования по многофункциональности, связанной с обеспечением теплозащиты, теплоизоляции т.п. Испытанные образцы изготовлены из одного из наиболее распространенных типов алюмостеклопластиков, состоящих из

пяти чередующихся слоев: три слоя алюминиевого сплава разделены двумя слоями стеклопластика. В качестве наполнителя выбран термостойкий полиимидный пенопласт с достаточно высоким собственным коэффициентом демпфирования. Основной целью данной работы является экспериментальное определение коэффициента демпфирования изготовленных трехслойных образцов, а также оценка точности простых расчетных методов, примененных для прогноза их изгибной жесткости, собственных частот и коэффициента демпфирования.

Среди известных результатов в данной области можно отметить работы [6, 13], в которых проводилось измерение параметров демпфирования материалов типа GLARE. Обычно коэффициент демпфирования для таких материалов составляет $\sim 0,01$ – $0,02$ и зависит от схемы армирования и схемы проведения испытаний. Результаты статических испытаний трехслойных балок со вспененным наполнителем и с несущими слоями из алюмостеклопластика были представлены в недавней работе [14], где были исследованы особенности деформирования и механизмы разрушения образцов при трехточечном изгибе. Результаты экспериментов и расчетов для различных вариантов динамического нагружения трехслойных конструкций с несущими слоями из материалов типа GLARE были представлены в работах [15–24]. В исследовании [15] была предложена и протестирована аналитическая методика проектирования рассматриваемых конструкций, работающих в условиях низкоскоростного удара. Методика учитывает соотно-

шение прочностных характеристик материала заполнителя и монослоев металлополимерного композита. Аналогичная методика для случая ударно-волнового нагружения рассматривалась в работе [16]. Экспериментальные исследования на высокоскоростной и низкоскоростной удар и верифицированные методики численного расчета для панелей с заполнителем из вспененного алюминия были представлены в работах [17–19]. Различные варианты панелей на основе GLARE с сотовыми заполнителями были исследованы в работах [20–23], где, в том числе, было показано, что одним из основных механизмов разрушения при ударе в таких конструкциях является расслоение несущих слоев на границе металлических и полимерных слоев [20, 21], а повышение ударопрочности (по сравнению с панелями с алюминиевыми несущими слоями) происходит при высокоскоростном нагружении [22]. Методика оптимального выбора структуры сотового заполнителя с градиентом свойств по толщине панели обсуждалась в работе [23]. Стойкость к пробитию у панелей с полимерным вспененным заполнителем была исследована в работе [24]. Здесь было показано, что поглощение энергии происходит преимущественно за счет деформирования и расслоения несущих слоев и незначительно зависит от свойств заполнителя.

Таким образом, в настоящее время достаточно хорошо исследованы особенности поведения материалов типа GLARE в составе трехслойных сэндвич-конструкций, работающих в условиях ударного воздействия. Однако работ, посвященных исследованию особенностей вибрационного воздействия на такие конструкции, авторам данной статьи не известно. Между тем вибрационный тип нагружения является характерным для многих видов авиационных и космических конструкций. Достоверная оценка вибрационных характеристик, собственных частот и параметров демпфирования является важной составляющей при оценке динамической прочности конструкций. Исследованию этих характеристик на образцах в виде трехслойных балок с несущими слоями из алюмокомпозитов посвящена данная работа.

Экспериментальные методы

Материалы

Для проведения испытаний были изготовлены образцы в виде трехслойных балок длиной $L = 270$ мм, шириной $b = 20$ мм и толщиной 23,5 мм. Образцы состоят из заполнителя толщиной $H = 20$ мм, двух несущих слоев толщиной $h = 1,65$ мм каждый и тонких клеевых прослоек толщиной 0,1 мм.

В качестве несущих слоев был использован алюмокомпозит марки СИАЛ-3/2 производства ФГУП ВИАМ. В качестве металлических слоев в образцах СИАЛа использованы листы алюминий-литиевого сплава марки 1441 толщиной $h_{Al} = 0,35$ мм, а компо-

зитные слои выполнены из стеклопластика марки КМКС-2.120.Т60 и имеют схему армирования [0,90]. Толщина h_k каждого из композитных слоев в составе СИАЛа равна 0,3 мм. Свойства материалов, входящих в состав СИАЛа, представлены в табл. 1. Кажущаяся плотность СИАЛа составляет 2300 кг/м³.

В качестве заполнителя в балках использован вспененный полиимидный материал марки Акримид Т-100 (АО «НИИ Полимеров», Нижний Новгород) с плотностью 100 кг/м³. Соединение несущих слоев и заполнителя было выполнено с использованием эпоксидного клея холодного отверждения марки ЭПК-1. Пример изготовленного трехслойного образца показан на рис. 1. Всего для проведения испытаний было изготовлено три однотипных образца трехслойных балок.

Методы проведения испытаний

Механические свойства несущих слоев (СИАЛа) были предварительно определены в квазистатических испытаниях на растяжение, из которых был определен, в частности, эффективный модуль упругости материала E^* , значение которого в дальнейшем использовалось для оценки изгибной жесткости и собственных частот образцов (табл. 1).

Таблица 1

Свойства применяемых материалов

Table 1

Properties of the applied materials

Материал	Ориентация	E , ГПа	ν	ρ , кг/м ³
Лист сплава 1441	–	79	0,33	2600
Стеклопластик	0	50	0,3	1780
	90	12	0,07	

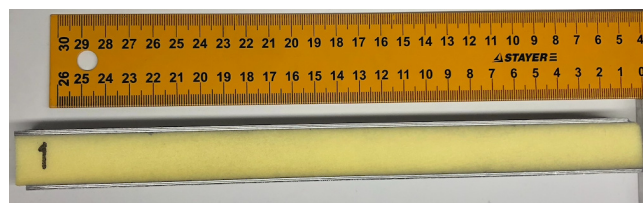


Рис. 1. Образец трехслойной балки с несущими слоями из листов СИАЛа и со вспененным заполнителем марки Акримид Т-100

Fig. 1. A sample of the three-layer beam with carrying GLARE layers and foamed filler of Akrimid T-100

Модуль сдвига заполнителя был определен по результатам испытаний изготовленных трехслойных образцов на трехточечный изгиб (рис. 2). Для этого обработка результатов испытаний проводилась с использованием известного решения для прогибов балки при трехточечном изгибе, учитывающего ее податливость на сдвиг [25]:

$$w = \frac{PL^3}{48D} \left(1 + 12 \frac{D}{SL^2} \right), \quad (1)$$

где w – прогиб по центру образца; P – приложенное усилие; D – изгибная жесткость трехслойной балки, вычисляемая с учетом известного значения модуля упругости несущих слоев в пренебрежении влияния изгибной жесткости заполнителя, $D = \frac{EbH^2h}{2}$; L – расстояние между опорами, которое в испытаниях составляло 200 мм; S – жесткость заполнителя на сдвиг, вычисляемая с учетом искомого модуля сдвига заполнителя G и в пренебрежении податливости на сдвиг несущих слоев, $S = \frac{5}{6}Gb \frac{(H+2h)^2}{H}$.

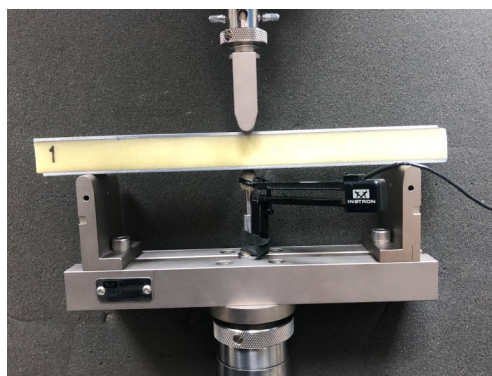


Рис. 2. Испытания на изгиб трехслойных образцов

Fig. 2. Bending tests of the three-layered samples

Все квазистатические испытания проводились на универсальной электромеханической машине Instron 5969. Скорость движения траверсы в испытаниях на растяжение составляла 0,5 мм/мин, на изгиб – 1 мм/мин. Деформации в испытаниях на растяжение измерялись с использованием видеоэкстензогра. Перемещения образцов при изгибе измерялись с использованием дефлектометра и экстензогра. Использовался контактный экстензомер Instron 2620-602 SN:3301, отвечающий требованиям ISO 9513, BS 3846 и ASTM E 83, с погрешностью измерений не более 0,15 %. Отметим, что использованные в испытаниях размер образцов сэндвич-балок, скорость нагружения и методика измерения перемещений при трехточечном изгибе соответствуют стандарту ASTM C393.

Динамические испытания образцов СИАЛа и трехслойных балок проводились по методу свободных затухающих колебаний. В испытаниях образцы жестко закреплялись струбциной с одного конца, а на другом конце задавались условия нагружения, приводящие к возникновению затухающих изгибных колебаний, преимущественно по первой собственной форме. Отдельно были испытаны образцы несущих слоев (СИАЛа) с длиной рабочей части 255, 205, 177, 157 и 77 мм и образцы трехслойных балок с длиной рабочей части 240 мм. Ширина всех образцов составляла 20 мм. Длина рабочей зоны трехслойных балок была выбрана с учетом необходимой жесткой фиксации закрепленного конца образца, соответствующей условию заделки.

Длина закрепленной части более тонких и податливых образцов СИАЛа составляла 15 мм. В образцах трехслойных балок длина зафиксированной зоны составляла 30 мм. Выбор длины образцов СИАЛа (157–255 мм) обоснован прогнозируемыми значениями собственных частот порядка 20, 30, 40 и 50 Гц для свободно колеблющихся образцов, перемещения которых регистрировались с использованием видеофиксации. Образец СИАЛа длиной 77 мм был испытан с установленным контактным акселерометром, и его прогнозируемая собственная частота составляла ~50 Гц.

Для возбуждения колебаний по свободному концу закрепленного образца либо ударяли металлическим ударником, либо задавалось его начальное отклонение от положения равновесия с максимальным прогибом 5–15 мм для образцов СИАЛа и с прогибом 2–3 мм для более жестких трехслойных образцов. Оба варианта нагружения (статический – ударом и кинематический – отведением конца образца) приводили к одинаковым результатам измерений, с различием, не превышающим погрешности измерительного оборудования, поэтому в представленных ниже результатах разделение по типу нагружения образцов не приводится.

Свободные затухающие колебания образцов регистрировались акселерометром, закрепленным на свободном конце образца, либо проводилась видеозапись с непосредственной регистрацией амплитуды колебаний. Достоинством метода с анализом видеоизображений является отсутствие дополнительной массы и демпфирующих элементов, прикрепленных к образцу. Преимуществом контактного акселерометра является более высокая точность непосредственных измерений, однако при этом на образце приходится устанавливать дополнительный массивный элемент (акселерометр), а идущий от него провод может оказывать влияние на измеряемые параметры демпфирования.

В испытаниях использовался акселерометр BC111 (ZETLab, диапазон частот 0,5...15 000 Гц, амплитудный диапазон $\pm 510g$, масса 30 г, собственные шумы $< 0,005g$) и видеокамера ВидеоСпринт-G4 с частотой съемки 800 кад/с.

Обработка результатов испытаний проводилась с использованием метода быстрого преобразования Фурье для получения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) реализующихся колебаний [26]. На получаемых АЧХ определялся пик, соответствующий первой резонансной частоте. Ширина найденного пика позволяет определить коэффициент демпфирования образца ζ на основании соотношения (ГОСТ 30630.1.8–2002, ASTM E756)

$$\zeta = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega_0}, \quad (2)$$

где ω_0 – частота резонанса; $\omega_1 < \omega_2$ – частоты вблизи резонанса, при которых значение амплитуды уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с амплитудой резонанса.

Коэффициент демпфирования заполнителя при сдвиге был отдельно определен методом динамического механического анализа (ДМА) на установке DMA/SDTA861e (производитель MettlerToledo, диапазон сил 1–40 мН, диапазон частот 0,001–1000 Гц, точность 0,2 %). Все испытания проводились при комнатной температуре. В динамических испытаниях каждый образец испытывался повторно не менее 5 раз. По результатам такой серии испытаний определялось среднее значение и стандартное отклонение искомой характеристики.

Таким образом, реализованная программа испытаний следующая. Вначале были определены механические свойства несущих слоев и заполнителя, по отдельности. Для обоих типов материалов проводились как статические (на растяжение для несущих слоев и на изгиб в составе сэндвич балки для заполнителя), так и динамические испытания (по методу свободных колебаний для несущих слоев и ДМА для заполнителя). В испытаниях на растяжение было испытано 5 образцов СИАЛа. На трехточечный изгиб были испытаны 3 изготовленных образца трехслойных балок. По методу свободных колебаний было испытано 5 образцов СИАЛа, по пять раз каждый. В ДМА был испытан один образец размером 10×10×10 мм, вырезанный из центральной части плиты используемого вспененного полиимида. По результатам этих испытаний определялись упругие характеристики материалов и коэффициенты демпфирования. Далее были проведены динамические испытания трехслойных образцов. Проводили по 5 повторных испытаний с каждым образцом. Полученные таким образом экспериментальные данные были использованы для тестирования численных расчетов, в которые в качестве исходных данных закладывались идентифицированные свойства несущих слоев и заполнителя, а сопоставление расчета и эксперимента проводилось для прогнозируемых динамических характеристик трехслойных образцов. Кроме этого, оценивалось соответствие собственных статических и динамических характеристик СИАЛов расчетным значениям.

Результаты

Пример диаграммы напряжения – деформации, определенной в испытаниях на растяжение для образца СИАЛа, представлен на рис. 3, а. Эффективный модуль упругости образцов составил $E^* = 60 (\pm 1)$ ГПа. Это значение хорошо согласуется с теоретической оценкой, которая в пренебрежении эффектом Пуассона записывается следующим образом:

$$E_{\text{теор}}^* = \frac{3E_{\text{Al}}h_{\text{Al}} + E_0h_k + E_{90}h_k}{h} = 61 \text{ ГПа.}$$

Расчетное значение наклона диаграммы СИАЛа показано пунктиром на рис. 3, а. Предел текучести СИАЛа, связанный с возникновением пластических деформаций в слоях алюминия, составляет не менее

270 МПа, что необходимо учитывать в процессе динамических испытаний, проводимых в зоне упругого поведения материала.

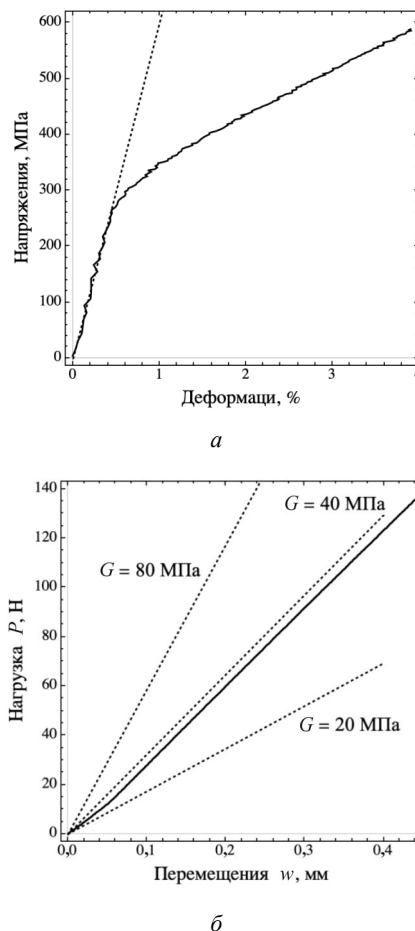


Рис. 3. Примеры диаграмм, определенных в испытаниях на растяжение образцов СИАЛа (а) и в испытаниях на изгиб трехслойных образцов (б). Пунктиром показаны результаты, получаемые на основе теоретических оценок

Fig. 3. Examples of diagrams determined in tensile tests of GLARE samples (a) and in bending tests of three-layer samples (b). The dotted line shows the results obtained on the basis of theoretical estimates

Пример диаграммы нагрузка – перемещения, полученной в статических испытаниях трехслойных балок на изгиб, показан на рис. 3, б. Испытания образцов проводились в упругой области. Пунктиром на этом рисунке показаны расчетные диаграммы для данного типа испытаний, получаемые на основе решения (1), в котором значение модуля сдвига G заполнителя задавалось равным 20, 40 и 80 МПа. Видно, что несмотря на малые абсолютные значения этой величины, ее изменение существенным образом сказывается на прогибах трехслойного образца. Наилучшую точность описания экспериментальных данные удается получить при использовании значения модуля сдвига $G = 40$ МПа. Незначительное отклонение, которое в этом случае возникает между экспериментом и расчетом (рис. 3, б), связано с наличием собственной податливости элементов испы-

тательной машины, проявляющейся в начале нагружения образца в виде небольшой нелинейности диаграммы нагрузка – перемещения. При увеличении нагрузки эти эффекты становятся незначительными и расчетная и экспериментальная диаграммы идут параллельно, т.е. определяются одинаковыми параметрами жесткости.

В предположении изотропии заполнителя, для его описания необходимы две характеристики упругости. Поэтому из литературных источников была взята значение второй необходимой характеристики – коэффициента Пуассона, который для аналогичных полиимидных пористых заполнителей марки Rohacell обычно имеет нулевые значения [27]. Таким образом, модуль Юнга рассматриваемого материала может быть пересчитан и составляет ориентировочно 80 МПа.

Зависимость тангенса угла потерь $\tan(\delta)$ заполнителя от частоты сдвиговых колебаний, определенная по результатам динамического механического анализа, представлена на рис. 4. Здесь видно, что для частот менее 100 Гц тангенс угла потерь практически линейно растет от значения 0,12 до 0,2 и затем снижается, достигая значений не более 0,02 при частотах порядка 1000 Гц. Резкое снижение в районе 600 Гц, по-видимому, связано с резонансными эффектами в экспериментальном образце или в испытательном оборудовании. Эти эффекты в рассматриваемом случае не существенны, так как трехслойные балки были испытаны при частотах колебаний ниже 100 Гц. Для этого диапазона в дальнейших расчетах использовалось значение коэффициента демпфирования заполнителя $\zeta = \frac{\tan(\delta)}{2} = 0,08$.

Пример результатов динамических испытаний образцов СИАЛа показана на рис. 5, а. Здесь показан отклик образца длиной 77 мм, зарегистрированный с использованием акселерометра (см. рис. 5, а), и соответствующая ему АЧХ, построенная с использованием обработки полученных данных по алгоритму быстрого преобразования Фурье (рис. 5, б, здесь представлены значения амплитуды колебаний, нормированные относительно максимального значения при резонансе). В начальный момент времени по образцу был нанесен удар, который проявляется в виде шумов в начале графика на рис. 5, а. Далее спустя ~0,05 с устанавливаются свободные затухающие колебания, фактически по пер-

вой собственной форме – соответствующий единственный выраженный пик присутствует на АЧХ образца на рис. 5, б. Расположение этого пика на АЧХ определяет собственную частоту, а его ширина определяет коэффициент демпфирования, который вычислялся по формуле (2). Значения собственных частот образцов СИАЛа разной длины и соответствующие коэффициенты демпфирования представлены в табл. 2.

Аналогично образцам СИАЛа были испытаны и трехслойные образцы. Для них примеры результатов измерений показаны на рис. 5, б, а сводка всех результатов представлена в табл. 2. Коэффициенты демпфирования трехслойных балок оказываются выше, чем у СИАЛа (это видно и на затухающей кривой на рис. 5, б), что ожидаемо, так как их заполнитель обладает повышенным коэффициентом демпфирования, и он интенсивно нагружается при изгибе, работая по механизму сдвиговых деформаций. Однако необычным является достаточно низкое реализующееся значение частоты колебаний трехслойных балок, которое требует дополнительного объяснения. Для этого, во-первых, получим оценки для собственных частот образцов СИАЛа на основе простых моделей, справедливых для тонких балок. Для частоты первой собственной формы колебаний ω консольно-закрепленного образца справедливо решение:

$$\omega = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1,875}{L} \right)^2 \sqrt{\left(\frac{D_1}{\mu} \right)}, \quad (3)$$

где L – длина балки; D_1 – изгибная жесткость балки, $D_1 = \frac{Ebh^3}{12}$; μ – погонная масса балки, $\mu = bhr$.

Для образцов, на конце которых был закреплен акселерометр, необходимо учитывать его массу. Это можно сделать на основе приближенного решения для собственных частот балки с закрепленной на конце сосредоточенной массой [28]:

$$\omega = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{3D_1}{m^*L^3} \right)}, \quad (4)$$

где $m^* = m + \left(\frac{33}{140} \right) \mu L$ – эквивалентная масса образца, учитывающая собственную погонную массу балки и массу акселерометра $m = 30$ г.

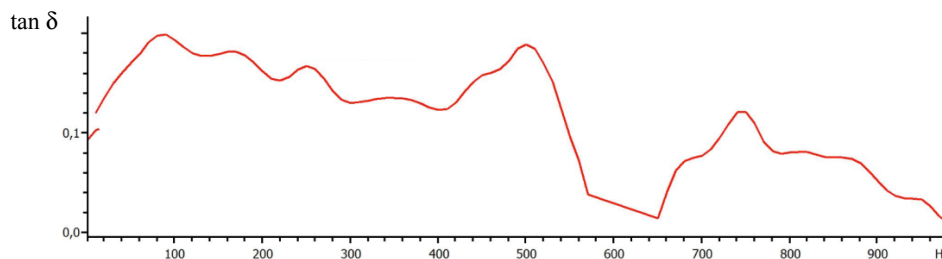


Рис. 4. Зависимость тангенса угла потерь заполнителя от частоты сдвиговых колебаний

Fig. 4. Dependence of the tangent of the loss angle of the filler on the frequency of shear vibrations

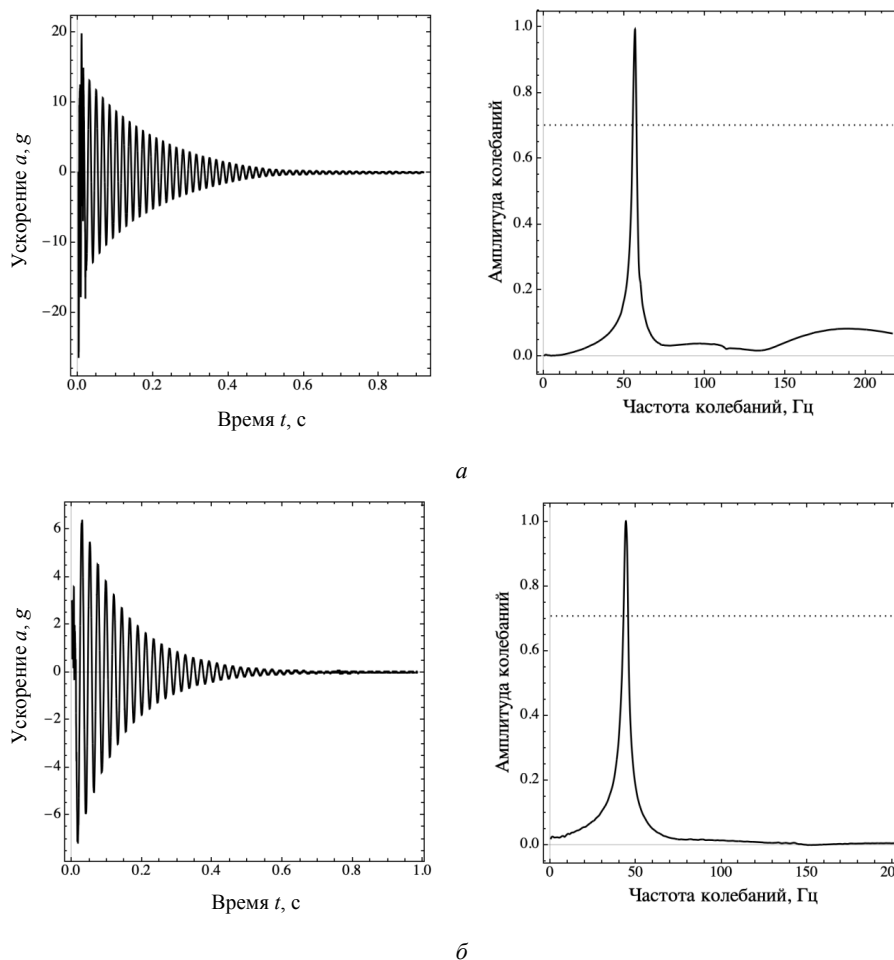


Рис. 5. Примеры результатов испытаний по методу затухающих колебаний для образцов СИАЛа длиной 77 мм (а) и трехслойных балок длиной 240 мм (б). Слева: измеренная зависимость ускорения конца образца от времени, справа: соответствующая амплитудно-частотная характеристика. Пунктиром показано значение амплитуды в $\sqrt{2}$ меньше резонансного значения

Fig. 5. Examples of the test results by the damped vibration method for GLARE samples with a length of 77 mm (a) and three-layer beams with a length of 240 mm (b). On the left: the measured time dependence of the acceleration of the end of the sample. On the right: the corresponding amplitude-frequency characteristic. The dotted line shows the amplitude value at a lower resonance value

Таблица 2

Динамические характеристики СИАЛа и трехслойных балок
(в скобках указаны значения стандартных отклонений)

Table 2

Dynamic characteristics of GLARE and three-layer beams
(the values of standard deviations are indicated in brackets)

Тип образца	Длина, мм	Тип измерений	Собственная частота (расчет), Гц	Собственная частота (эксперимент), Гц	Коэффициент демпфирования
СИАЛ	255	Видео	20,6	21,5 (±0,9)	0,026 (±0,002)
	205	Видео	31,9	31,1 (±0,8)	0,02 (±0,001)
	177	Видео	43,7	41 (±1,1)	0,021 (±0,001)
	157	Видео	54,3	51 (±0,9)	0,02 (±0,0015)
	77	Акселерометр	48/52,4*	54,5 (±0,4)	0,023 (±0,001)
Трехслойные балки	240	Акселерометр	163/50,5**	50,6 (±0,5)	0,067 (±0,002)

*Через дробь указаны результаты расчетов, полученные аналитически и методом конечных элементов.

**Через дробь указаны результаты расчетов, полученные численно с заданными значениями модуля сдвига заполнителя $G = 40$ МПа и $G = 2$ МПа.

Расчетные значения собственных частот образцов на основе формул (3) и (4) показаны в табл. 2. Здесь видно, что для частот ниже 30 Гц имеет место хорошая согласованность расчета по формуле (3) и эксперимента (погрешность <1 %), однако при повышении частот реализуется некоторое расхождение (с погрешностью до 7 %), что связано, по-видимому, с недостаточной точностью измерений с видеозаписью процесса более высокочастотных колебаний. Результаты измерений с акселерометром и соответствующий аналитический расчет по формуле (4) для частоты ~55 Гц дают значения собственной частоты, отличающиеся на ~12 %, однако при использовании более аккуратного численного моделирования методом конечных элементов этот результат может быть улучшен, и различие расчета и эксперимента не превышает 4 %. Это расхождение результатов, в свою очередь, может быть связано с наличием дополнительной присоединенной массы провода, отходящего от акселерометра, влияние которого в расчете не учитывалось.

Для трехслойных балок применение решений по классическим балочным моделям недопустимо, так как их податливость на сдвиг очень высока. Для этих образцов был произведен конечно-элементный расчет в системе Comsol с использованием решателя Eigenfrequency, применяемого для расчета собственных частот и коэффициента демпфирования на основе метода комплексных модулей. В качестве моделей демпфирования несущих слоев и заполнителя задавалась модель с изотропным демпфированием (в пренебрежении эффектами анизотропии в несущих слоях) с коэффициентами демпфирования, найденными в предварительных экспериментах: 0,02 – для несущих слоев и 0,08 – для заполнителя. Упругие свойства материалов также были заданы с учетом полученных экспериментальных данных. Несущие слои считались квазиизотропными (или, точнее, кубической симметрии) с модулем упругости 58 ГПа, модулем сдвига 12 ГПа и коэффициентом Пуассона 0,3. Аналогичная гипотеза об упругих свойствах использовалась для заполнителя, и его модуль упругости задавался равным 80 МПа, коэффициент Пуассона 0, а модуль сдвига 40 МПа. Расчет проводился в плоской постановке с использованием гипотезы об обобщенном плоском деформированном состоянии, которая позволяет получить приемлемые оценки напряженно-деформированного состояния образцов относительно большой ширины [29]. Акселерометр моделировался присоединенным жестким элементом с размерами 15×15 мм в плоскости расчета. В результате расчетов было установлено, что прогнозируемая собственная частота образца в 3 раза превышает установленную в эксперименте (~160 Гц по сравнению с ~50 Гц). При этом коэффициент демпфирования также отличался от экспериментального значения ~0,07 и имел значение 0,05.

Для объяснения полученного отличия экспериментальных и расчетных данных было сделано предположение об особенностях деформирования пористого заполнителя в составе балки и об изменении его упругих

характеристик при высокочастотном нагружении. На основе расчетов было установлено, что при значениях модуля сдвига заполнителя $G = 2$ МПа (наиболее существенной характеристики заполнителя с точки зрения влияния на собственные частоты балки) удастся получить хорошую согласованность расчета и эксперимента: первая собственная частота в этом случае прогнозируется на уровне 50 Гц, а коэффициент демпфирования – 0,071, что хорошо согласуется с экспериментом. Реализующиеся низкие значения модуля сдвига заполнителя в динамических испытаниях были подтверждены и динамическим механическим анализом, который показал значение этой характеристики на уровне 10 МПа, однако требуется дополнительная экспериментальная проверка на большем количестве образцов. Отметим, что в этом случае материал заполнителя должен быть ортотропным, возможность чего отмечалась, например, в работе [30].

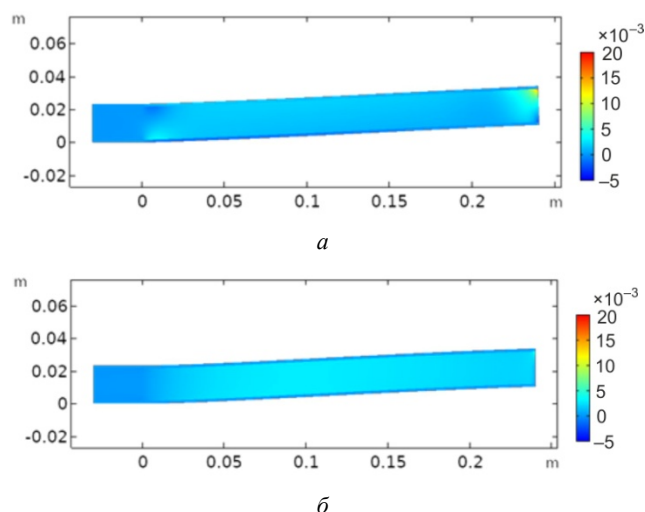


Рис. 6. Результаты расчета первых собственных форм и деформаций в трехслойных образцах при заданном значении модуля сдвига заполнителя 40 МПа (а) и 2 МПа (б). Деформированное состояние показано при перемещениях конца балки 10 мм. Цветом показаны значения деформаций межслоевого сдвига

Fig. 6. The results of calculating the first natural shapes and deformations in three-layer specimens at a given value of the shear modulus of the filler 40 MPa (a) and 2 MPa (b). The deformed state is shown when the end of the beam is displaced by 10 mm. The color shows the values of the interlayer shear strains

Результаты численных расчетов проиллюстрированы на рис. 6, где показаны первые собственные формы и распределение деформаций сдвига в образцах с заданными значениями модуля сдвига заполнителя 40 МПа и 2 МПа. Из этих результатов видно, что для низких значений модуля сдвига заполнителя деформации балки по первой собственной форме идут преимущественно по механизму поперечного сдвига (рис. 6, б), а при использовании значения $G = 40$ МПа, определенного в статических испытаниях, деформации балки соответствуют некоторому промежуточному варианту, в котором сочетается изгиб несущих слоев и сдвиг

в заполнителе. При этом в случае меньшей жесткости заполнителя в нем возникают в среднем более высокие значения деформаций сдвига, что и является причиной повышения рассчитываемого коэффициента демпфирования балки.

Выводы

Представлены результаты измерения динамических характеристик трехслойных балок со вспененным заполнителем и с несущими слоями из алюмокомпозитного пластика. Установлено снижение жесткости и повышение коэффициента демпфирования трехслойных балок в динамических испытаниях, по сравнению с ожидаемыми значениями, полученными на основе численных расчетов. Объяснение этому эффекту может быть связано с изменением свойств пористого заполнителя, работающего в составе трехслойных балок. Для уточнения полученных результатов требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований для исключения влияния таких факторов, как неоднородность (переменность) и анизотропия структуры и свойств заполнителя, а также влияние собственной мас-

сы акселерометра на результаты измерений. В частности, оптимальным является проведение измерений с бесконтактным лазерным акселерометром. Для проверки сделанного предположения о снижении модуля сдвига заполнителя возможно проведение дополнительного анализа собственных форм колебаний балки (первой и более высоких), например, с использованием обработки изображений процесса колебаний, получаемых с высокоскоростной видеокамеры. Такой анализ в сопоставлении с расчетными данными (см. рис. 6) позволит дополнительно уточнить правильность задания параметров заполнителя.

Благодарность

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-20105) в МАИ.

Acknowledgement

This work was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 17-79-20105) at the Moscow Aviation Institute.

Библиографический список

1. Wu G., Yang J.M. The mechanical behavior of GLARE laminates for aircraft structures // *Jom.* – 2005. – Vol. 57, № 1. – P. 72–79.
2. Vogeslang L.B., Volt A. Development of Fibre Metal Laminates for Advanced Aerospace Materials // *J. of Mater. Processing Technol.* – 2000. – Vol. 103. – P. 1–5.
3. Гибридные слоистые материалы с небольшой скоростью развития усталостной трещины / В.В. Антипов, Н.Ю. Серебренникова, О.Г. Сенаторова, Л.В. Морозова, Н.Ф. Лукина, Ю.Н. Нефедова // *Вестник машиностроения.* – 2016. – № 12. – С. 45–49.
4. Высокопрочный слоистый материал на основе листов из алюминий-литиевого сплава / В.В. Шестов, В.В. Антипов, Н.Ю. Серебренникова, Ю.Н. Нефедова // *Технология легких сплавов.* – 2016. – № 1. – С. 119–123.
5. Sinmaz celik T., Avcu E., Bora M.O. A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods. // *Materials and Design.* – 2011. – Vol. 32 (7). – P. 3671–3685.
6. A review on the development and properties of continuous fiber/epoxy/aluminum hybrid composites for aircraft structures / E.C. Botelho [et al.] // *Materials Research.* – 2006. – Vol. 9, № 3. – P. 247–256.
7. Слоистые металлополимерные материалы в элементах конструкции воздушных судов / Н.Ю. Подживотов, Е.Н. Каблов, В.В. Антипов, В.С. Ерасов, Н.Ю. Серебренникова, М.Р. Абдуллин, М.В. Лимонин // *Перспективные материалы.* – 2016. – № 10. – С. 5–19.
8. Оценка эффективных механических характеристик слоистого алюмокомпозитного пластика в условиях одноосного растяжения / В.В. Антипов, В.Н. Добрянский, В.А. Короленко, С.А. Лурье, Н.Ю. Серебренникова, Ю.О. Соляев // *Вестник Московского авиационного института.* – 2018. – Т. 25, № 2.
9. Оценка межслоевой прочности алюмокомпозитного пластика по результатам испытаний образцов на трехточечный изгиб / В.В. Антипов, О.А. Прокудин, С.А. Лурье, Н.Ю. Серебренни-

- кова, Ю.О. Соляев, А.Н. Коновалов // *Вестник Московского авиационного института.* – 2019. – Т. 26, № 2. – С. 229–237.
10. Elasto-plastic behavior and failure of thick GLARE laminates under bending loading / Y. Solyaev, S. Lurie, O. Prokudin, V. Antipov, L. Rabiniski, N.Serebrennikova, V. Dobryanskiy // *Composites Part B: Engineering.* – 2020. – Vol. 200. – 108302.
11. Перспективы применения в авиационных конструкциях слоистых металлополимерных материалов на основе алюминиевых сплавов / В.В. Антипов [и др.] // *Авиационные материалы и технологии.* – 2020. – № 1. – С. 45–53.
12. Мазаев А.В. Прочностной анализ экспериментальных панелей из композита СИАЛ-3-1 и сплава Д16ч.-ат методом конечных элементов // *Авиационные материалы и технологии.* – 2018. – № 1 (50).
13. Iriundo J., Aretxabaleta L., Aizpuru A. Characterisation of the elastic and damping properties of traditional FML and FML based on a self-reinforced polypropylene // *Composite Structures.* – 2015. – Vol. 131. – P. 47–54. doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.04.047
14. Dariushi S., Sadighi M. A study on flexural properties of sandwich structures with fiber/metal laminate face sheets // *Applied Composite Materials.* – 2013. – Vol. 20(5). – P. 839–855. doi.org/10.1007/s10443-012-9307-2
15. Low-velocity impact of sandwich beams with fibre-metal laminate face-sheets / J. Zhang, Y. Ye, Q. Qin, T. Wang // *Composites Science and Technology,* 168(June). – 2018. – P. 152–159. doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.09.018
16. Zhang J., Ye Y., Qin Q. On dynamic response of rectangular sandwich plates with fibre-metal laminate face-sheets under blast loading // *Thin-Walled Structures,* 144(July). – 2019. doi.org/10.1016/j.tws.2019.106288
17. Liu C., Zhang Y.X., Ye L. High velocity impact responses of sandwich panels with metal fibre laminate skins and aluminium foam core // *International Journal of Impact Engineering,* 100. – 2017. – P. 139–153. doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.09.004

18. Liu C., Zhang Y.X., Li J. Impact responses of sandwich panels with fibre metal laminate skins and aluminium foam core // *Composite Structures*. 182 (April 2016). – 2017. – P. 183–190. doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.09.015

19. Kiratisaev H., Cantwell W.J. The impact response of aluminum foam sandwich structures based on a glass fiber-reinforced polypropylene fiber-metal laminate // *Polymer composites*. – 2004. – Vol. 25, № 5. – C. 499–509.

20. Tan C.Y., Akil H.M. Impact response of fiber metal laminate sandwich composite structure with polypropylene honeycomb core // *Composites Part B: Engineering*. – 2012. – Vol. 43, № 3. – C. 1433–1438.

21. Design and testing of a fiber-metal-laminate bird-strike-resistant leading edge / M. Guida [et al.] // *Journal of Aircraft*. – 2009. – Vol. 46, № 6. – C. 2121–2129.

22. Hazizan M.A., Tan C.Y. Comparative Study of Fiber Metal Laminates (FMLs) and Aluminum Skins for Polypropylene (PP) Honeycomb Core Sandwich Structure under Low Velocity Impact Loads // *Key Engineering Materials*. – Trans Tech Publications Ltd. – 2011. – Vol. 471. – P. 524–529.

23. Blast response of gradient honeycomb sandwich panels with basalt fiber metal laminates as skins / X. Ma, X. Li, S. Li, R. Li, Z. Wang, G. Wu // *International Journal of Impact*

Engineering, 123 (July 2018). – 2019. – P. 126–139. doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.10.003

24. Ghalami-Choobar M., Sadighi M. Investigation of high velocity impact of cylindrical projectile on sandwich panels with fiber-metal laminates skins and polyurethane core // *Aerospace Science and Technology*. – 2014. – Vol. 32, № 1. – P. 142–152.

25. Vasiliev V.V., Morozov E.V. *Advanced mechanics of composite materials and structures* // Elsevier. – 2018.

26. Rao S.S. *Mechanical Vibrations* // Addison-Wesley, MA. – 2019.

27. The mechanical response of Rohacell foams at different length scales / S. Arezoo [et al.] // *Journal of materials science*. – 2011. – Vol. 46, № 21. – P. 6863–6870.

28. Weaver Jr.W., Timoshenko S.P., Young D.H. *Vibration problems in engineering*. – John Wiley & Sons. – 1990.

29. Bending problems in the theory of elastic materials with voids and surface effects / S. Lurie, Y. Solyaev, A. Volkov, D. Volkov-Bogorodskiy // *Mathematics and Mechanics of Solids*. – 2018. – Vol. 23(5). – P. 787–804.

30. Tita V., Caliri Júnior M.F. Numerical simulation of anisotropic polymeric foams // *Latin American Journal of Solids and Structures*. – 2012. – T. 9, Vol. 2. – P. 1–21.

References

1. Wu G., Yang J. M. The mechanical behavior of GLARE laminates for aircraft structures // *Jom*. – 2005. – T. 57. – №. 1. – pp. 72–79.

2. L.B. Vogeslang and A. Volt, “Development of Fibre Metal Laminates for Advanced Aerospace Materials,” // *J. of Mater. Processing Technol.*, 103 (2000), pp. 1–5.

3. Antipov VV, Serebrennikova N.Yu., Senatorova OG, Morozova LV, Lukina NF, Nefedova Yu.N. Hybrid layered materials with a low rate of fatigue crack development // *Vestnik mashinostroeniya*. – 2016. – No. 12. – pp. 45–49.

4. Shestov VV, Antipov VV, Serebrennikova N.Yu., Nefedova Yu.N. High-strength layered material based on aluminum-lithium alloy sheets // *Technology of light alloys*. – 2016. – №. 1. – pp. 119–123.

5. T. Sinmazçelik, E. Avcu, M. O. Bora, O. Çoban // A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods. – *Materials and Design* 32 (7). – 2011. – pp. 3671–3685.

6. Botelho E. C. et al. A review on the development and properties of continuous fiber/epoxy/aluminum hybrid composites for aircraft structures // *Materials Research*. – 2006. – T. 9. – №. 3. – pp. 247–256.

7. Podzhivotov N.Yu., Kablov E.N., Antipov V.V., Erasov V.S., Serebrennikova N.Yu., Abdullin M.R., Limonin M.V. Layered metalpolymer materials in aircraft structural elements // *Perspective materials*. – 2016. – №. 10. – pp. 5–19.

8. Antipov VV, Dobryanskiy VN, Korolenko VA, Lur'e SA, Serebrennikova N.Yu., Solyaev Yu.O. Evaluation of effective mechanical characteristics of laminated alumina-fiberglass in uniaxial tension. // *Bulletin of the Moscow Aviation Institute*. – 2018. – T.25. – №. 2

9. Antipov, V.V., Prokudin, O.A., Lurie, S.A., Serebrennikova, N.Yu., Solyaev, Yu.O., Kononov, A.N. Assessment of interlayer strength of alumina-fiberglass according to test results samples for three-point bending // *Bulletin of the Moscow Aviation Institute*. – 2019. – T. 26. – №. 2. – pp. 229–237.

10. Solyaev, Y., Lurie, S., Prokudin, O., Antipov, V., Rabinskiy, L., Serebrennikova, N., & Dobryanskiy, V. (2020). Elastoplastic behavior and failure of thick GLARE laminates under bending loading. *Composites Part B: Engineering*, 200, 108302.

11. Antipov VV et al. Prospects for the use of layered metalpolymer materials based on aluminum alloys in aircraft structures // *Aviation materials and technologies*. – 2020. – №. 1. – pp. 45–53.

12. Mazaev A. V. Strength analysis of experimental panels made of sial-3-1 composite and alloy D16ch.-at by the finite element method // *Aviation materials and technologies*. – 2018. – №. 1 (50).

13. Iriondo, J., Aretxabaleta, L., Aizpuru, A. Characterisation of the elastic and damping properties of traditional FML and FML based on a self-reinforced polypropylene // *Composite Structures*, 131.– 2015. – pp. 47–54. doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.04.047

14. Dariushi, S., Sadighi, M. A study on flexural properties of sandwich structures with fiber/metal laminate face sheets. // *Applied Composite Materials*, 20(5). – 2013. – pp. 839–855. doi.org/10.1007/s10443-012-9307-2

15. Zhang, J., Ye, Y., Qin, Q., & Wang, T. Low-velocity impact of sandwich beams with fibre-metal laminate face-sheets. // *Composites Science and Technology*, 168(June). – 2018. – pp. 152–159. doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.09.018

16. Zhang, J., Ye, Y., & Qin, Q. On dynamic response of rectangular sandwich plates with fibre-metal laminate face-sheets under blast loading. // *Thin-Walled Structures*, 144(July). – 2019. doi.org/10.1016/j.tws.2019.106288

17. Liu, C., Zhang, Y. X., & Ye, L. High velocity impact responses of sandwich panels with metal fibre laminate skins and aluminium foam core. // *International Journal of Impact Engineering*, 100. – 2017. – pp. 139–153. doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.09.004

18. Liu, C., Zhang, Y. X., & Li, J. – 2017. Impact responses of sandwich panels with fibre metal laminate skins and aluminium foam core. // *Composite Structures*. 182 (April 2016). – pp. 183–190. doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.09.015

19. Kiratisaev H., Cantwell W. J. The impact response of aluminum foam sandwich structures based on a glass fiber-reinforced polypropylene fiber-metal laminate // Polymer composites. – 2004. – T. 25. – №. 5. – C. 499-509.
20. Tan C. Y., Akil H. M. Impact response of fiber metal laminate sandwich composite structure with polypropylene honeycomb core // Composites Part B: Engineering. – 2012. – T. 43. – №. 3. – C. 1433-1438.
21. Guida M. et al. Design and testing of a fiber-metal-laminate bird-strike-resistant leading edge // Journal of Aircraft. – 2009. – T. 46. – №. 6. – C. 2121-2129.
22. Hazizan M. A., Tan C. Y. Comparative Study of Fiber Metal Laminates (FMLs) and Aluminum Skins for Polypropylene (PP) Honeycomb Core Sandwich Structure under Low Velocity Impact Loads // Key Engineering Materials. – Trans Tech Publications Ltd, 2011. – T. 471. – C. 524-529.
23. Ma, X., Li, X., Li, S., Li, R., Wang, Z., & Wu, G. Blast response of gradient honeycomb sandwich panels with basalt fiber metal laminates as skins. // International Journal of Impact Engineering, 123(July 2018). – 2019. – pp. 126–139. doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.10.003
24. Ghalami-Chooabar M., Sadighi M. Investigation of high velocity impact of cylindrical projectile on sandwich panels with fiber–metal laminates skins and polyurethane core // Aerospace Science and Technology. – 2014. – T. 32. – №. 1. – C. 142-152.
25. V.V. Vasiliev, E.V. Morozov, Advanced mechanics of composite materials and structures. // Elsevier. – 2018.
26. Rao S. S. Mechanical Vibrations.//Addison-Wesley, MA. – 2019.
27. Arezoo S. et al. The mechanical response of Rohacell foams at different length scales // Journal of materials science. – 2011. – T. 46. – №. 21. – pp. 6863-6870.
28. Weaver Jr W., Timoshenko S. P., Young D. H. Vibration problems in engineering. – John Wiley & Sons. – 1990.
29. Lurie, S., Solyaev, Y., Volkov, A., Volkov-Bogorodskiy, D. Bending problems in the theory of elastic materials with voids and surface effects. // Mathematics and Mechanics of Solids 23(5). – 2018. – pp. 787-804.
30. Tita V., Caliri Júnior M. F. Numerical simulation of anisotropic polymeric foams // Latin American Journal of Solids and Structures. – 2012. – T. 9. – №. 2. – pp. 1-21.