

Научная статья

УДК 669.018.95

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-70-80

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ ИЗ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ И АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16ч-АТ

В.И. Постнов¹, М.В. Постнова¹, В.В. Антипов¹, Е.А. Вешкин¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Опыт применения металлополимерных композиционных материалов (МПКМ) показывает, что данные материалы имеют большую выносливость, чем традиционные алюминиевые сплавы. Рассмотрены результаты сравнительных испытаний по определению упругодемпфирующих свойств разных видов МПКМ и сплава Д16. Проведенные исследования показали, что значения модуля упругости и коэффициента Пуассона исследуемых образцов панелей МПКМ практически не зависят от уровня нагружения в исследуемом диапазоне относительных деформаций и близки к значениям для сплава Д16. Демпфирующая способность незначительно зависит от структуры МПКМ и логарифмический декримент колебаний равен 5 %, при этом у сплава Д16 он не превышает 0,6 %.

Ключевые слова: металлополимеры, сплав, прочность, деформация, нагружение, упругость

Для цитирования: Постнов В.И., Постнова М.В., Антипов В.В., Вешкин Е.А. Исследование динамических характеристик образцов из металлополимерных материалов и алюминиевого сплава Д16ч-АТ // Труды ВИАМ. 2025. № 4 (146). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-70-80.

Scientific article

STUDY OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF SAMPLES FROM METAL-POLYMERIC MATERIALS AND ALUMINIUM ALLOY D16ch-AT

V.I. Postnov¹, M.V. Postnova¹, V.V. Antipov¹, E.A. Veshkin¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The experience of metal-polymeric composite materials (MPCM) application shows that these materials have a higher durability than traditional aluminum alloys. The article considers results of comparative tests for determination of the elastically damping properties of different types of MPCM and alloy D16. The studies show that the modulus of elasticity and Poisson's coefficient of the tested MPCM panels are practically independent of the load level in the studied range of relative deformations and close to the values of alloy D16. The damping capacity is slightly dependent on the MPCM structure and logarithmic oscillation dissipation is 5 %, while it does not exceed 0,6 % in the alloy D16.

Keywords: metalpolymers, alloy, strength, deformation, loading, elasticity

For citation: Postnov V.I., Postnova M.V., Antipov V.V., Veshkin E.A. Study of dynamic characteristics of samples from metal-polymeric materials and aluminium alloy D16ch-AT. *Trudy VIAM*, 2025, no. 4 (146), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-4-70-80.

Введение

Важность применения композитов в элементах конструкций летательных аппаратов связана с необходимостью улучшения их тактико-технических характеристик, таких как надежность, ресурс и т. п. [1, 2]. Это объясняется тем, что ряд композитов обладает более высокими по сравнению с традиционно применяемыми металлами (например, алюминиевыми сплавами) удельными механическими свойствами: модулем упругости, демпфирующей способностью, выносливостью и т. д. Именно к таким материалам относятся и металлополимерные композиционные материалы (МПКМ) [3, 4]. Кроме того, часто необходимо осуществить ремонт и модернизацию самолетного парка для продления ресурса эксплуатации воздушных судов. В этом случае применение современных МПКМ взамен алюминиевых сплавов становится единственным выходом в сложившейся ситуации.

Как показывает практика, МПКМ, состоящие из слоев алюминиевых сплавов и полимерных композитов, имеют большую выносливость, чем традиционные алюминиевые сплавы [5, 6]. Это объясняется тем, что трещины в алюминиевых слоях, зародившиеся из-за динамических нагрузок в конструкции, как правило, прекращают свое интенсивное развитие благодаря слоям полимерных композитов. Вместе с тем известно, что ~60 % авиационных аварий, обусловленных техническими причинами, связано именно с вибрационным нагружением в диапазоне относительных деформаций $(50-200) \cdot 10^{-5}$, а значит и с выносливостью применяемых в конструкции летательных аппаратов материалов.

Однако применение новых материалов требует знания их физико-механических характеристик (модуля упругости, демпфирующих свойств, выносливости), которые необходимы конструкторам при создании новой техники. Определение таких характеристик возможно путем испытаний образцов новых материалов, так как их практически невозможно получить при эксплуатации изделия в целом. Причем условия испытаний образцов должны быть максимально приближены к условиям нагружения материала при эксплуатации в составе изделия. Данная работа посвящена экспериментальному исследованию зависимости динамического модуля упругости, логарифмического декремента колебаний и коэффициента Пуассона при изгибном нагружении образцов от уровня относительных деформаций и структуры МПКМ. Диапазон частот нагружения образцов составлял 500–1000 Гц, уровень относительных деформаций изменялся от $50 \cdot 10^{-5}$ до $250 \cdot 10^{-5}$ [7–10]. Именно в этих диапазонах частот и относительных деформаций и работает материал обшивки самолета. Такие испытания позволят выбрать рациональные структуры МПКМ с точки зрения обеспечения необходимой жесткости и демпфирования натуральных обшивок самолета, разработать технологию их изготовления и существенно сократить сроки доводки изделия. Однако методы испытаний образцов из композитов при таких условиях нагружения недостаточно разработаны, чем и определяется актуальность данной тематики.

Поэтому в данной работе представлены: методика определения упругодемпфирующих свойств образцов из МПКМ при высокочастотных изгибных колебаниях и высоких уровнях относительных деформаций; оборудование для осуществления таких испытаний; методика проведения испытаний образцов из натуральных панелей с различной структурой, а также разработка рациональных, с точки зрения использования в реальных конструкциях, структур материала панелей.

Для осуществления данной задачи выбрана методика определения упругодемпфирующих свойств МПКМ при резонансных изгибных колебаниях образцов по основной

форме, подвешенных на струнах в узловых линиях. Для возбуждения резонансных колебаний в образцах, использовали воздушный вибровозбудитель колебаний. С помощью этой методики проведены испытания образцов натуральных панелей из МПКМ. Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Материалы и методы

Методы измерения модулей упругости материалов весьма разнообразны. Они отличаются друг от друга характером механического воздействия на образец, видом возникающего в образце деформированного и напряженного состояния, родом наблюдаемых в эксперименте величин, типом применяемой аппаратуры [11, 12].

В области звуковых частот (10^2 – $3 \cdot 10^4$ Гц) применяют методы, отличительной чертой которых является отсутствие специальной инерционной системы, связанной с образцом. В данном случае (в особенности для материалов с высоким внутренним трением) наиболее удобным и точным оказывается резонансный способ. Он заключается в том, что в образце возбуждают резонансные колебания и по значению собственной частоты колебаний образца определяют динамический модуль упругости.

Используемый в данной работе метод определения динамического модуля упругости основан на замере частоты колебаний образца, которые возбуждаются модулированной струей сжатого воздуха. Блок-схема и внешний вид установки для испытаний приведены на рис. 1. Установка предназначена для испытаний материалов при комнатной температуре на частотах $\sim(10^2$ – $10^4)$ Гц в широком диапазоне амплитуд колебаний.

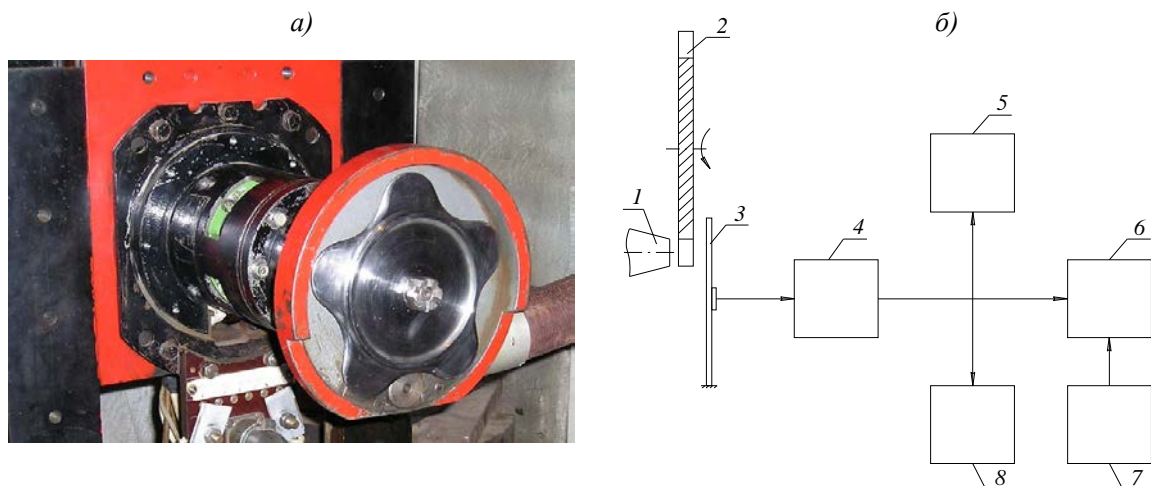


Рис. 1. Внешний вид (а) и блок-схема (б) установки для резонансных испытаний композиционных материалов: 1 – сопло; 2 – модулирующий диск; 3 – объект испытаний; 4 – тензоусилитель; 5 – прибор контроля относительной деформации; 6 – электронный осциллограф; 7 – звуковой генератор; 8 – частотомер

Для испытаний использовали призматические образцы в виде стержней размером $80 \times 20 \times (1 \div 2,5)$ (возможны и другие размеры образцов). Стержень подвешивают на гибких струнах (в специальном приспособлении – рис. 2) в узловых линиях основной формы изгибных колебаний стержня со свободными концами, расположенными на расстоянии $0,224l$ от торцов стержня. Схема крепления образцов и форма их колебаний представлены на рис. 3.

Вычисление динамического модуля упругости (в Па) производят по соотношению

$$E = \frac{48 \cdot \pi^2 \cdot \rho}{k^4} \cdot \frac{l^4}{h^2} \cdot f^2, \quad (1)$$

где l и h – длина и толщина стержня, м; ρ – плотность, кг/м³; $k = 4,73$ – корень характеристического уравнения частот; f – собственная частота колебаний, измеряемая экспериментально, Гц.

Для более точного определения динамического модуля упругости необходимо закреплять образец строго в узловых линиях основной формы изгибных колебаний и точно измерять собственную частоту колебаний стержня, поэтому ее замер производили электронным частотомером, который позволяет измерять частоту с точностью до 0,1 Гц.

Коэффициент Пуассона определяют как отношение продольных и поперечных деформаций при колебаниях стержня, измеряемых тензодатчиками. Для увеличения точности определения коэффициента Пуассона использовали тензодатчики из фольги.

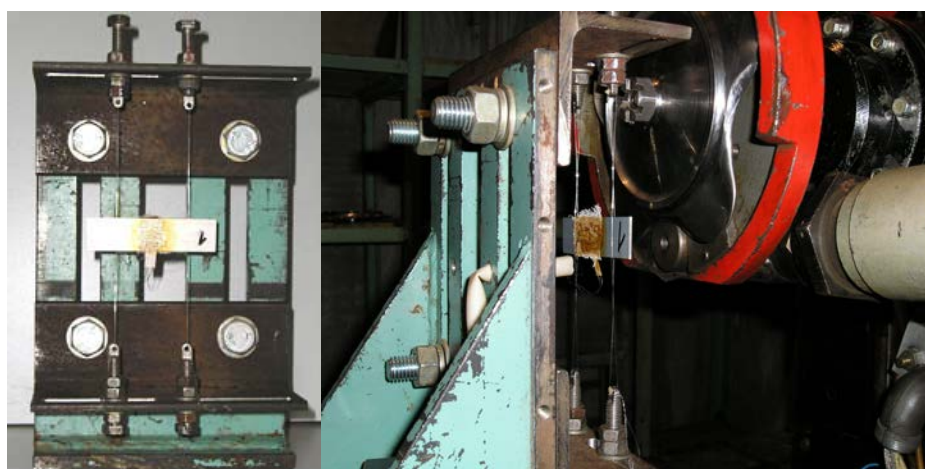


Рис. 2. Крепление образцов в приспособлении

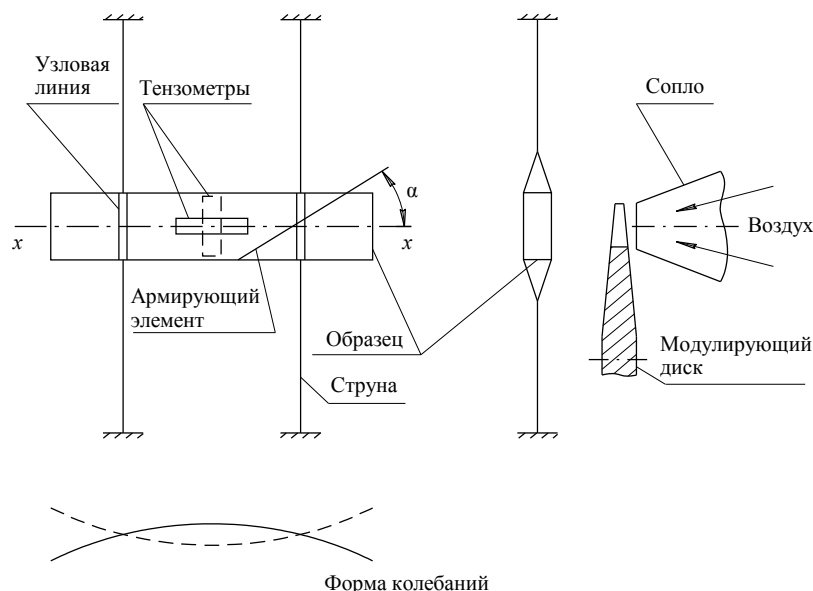


Рис. 3. Схема крепления образцов и форма колебаний

Для определения внутреннего трения в материале в широком диапазоне частот нагружения и амплитуд напряжений наиболее приемлемым является способ оценки

внутреннего трения по относительной ширине резонансной кривой, который и использовали при проведении исследований [13–15].

В качестве параметра, характеризующего рассеяние энергии в материале, принят логарифмический декремент колебаний (δ), который определяют по ширине резонансной кривой при изгибных колебаниях стержня со свободными концами, подвешенного на струнах в узловых линиях. Подвеска на струнах практически полностью исключает влияние условий закрепления на рассеяние энергии при колебаниях стержня и обеспечивает высокую точность и стабильность результатов экспериментов (рис. 1–3).

Расчетное соотношение для определения δ имеет вид

$$\delta = \frac{\pi \cdot \Delta f}{f}, \quad (2)$$

где δ – декремент колебаний; f – резонансная частота; Δf – ширина резонансной кривой, соответствующая относительным деформациям, равным 0,707 от максимальной величины.

Результаты и обсуждение

В табл. 1 представлены геометрические размеры (l_{\max} – максимальная длина; $h_{\text{ср}}$, $b_{\text{ср}}$ – средняя толщина и ширина стержня), масса и структура образцов для определения упругодемпфирующих свойств МПКМ.

Таблица 1

Характеристики исследуемых образцов

Условный номер образца	Материал (угол α – см. рис. 3)	l_{\max} , мм	$h_{\text{ср}}$, мм	$b_{\text{ср}}$, мм	Масса, г	ρ , кг/м ³
0.1	Д16ч-АТ	79,85	20,10	1,17	5,06	2706,16
0.2	Д16ч-АТ	79,80	20,10	1,17	5,00	2664,31
1.1	СИАЛ-1-2/1-1,25 мм ($\alpha = 0^\circ$)	80,20	20,20	1,30	5,10	2421,59
2.1	СИАЛ-3-2/1-1,25 мм ($\alpha = 0^\circ$)	80,20	20,10	1,29	5,03	2428,26
3.1	АЛОР-2/1-1,5 мм ($\alpha = 0^\circ$)	80,20	20,10	1,48	5,69	2384,95
3.2	АЛОР-2/1-1,5 мм ($\alpha = 0^\circ$)	80,10	20,15	1,53	5,70	2308,21
4.1	АЛОР-2/1-1,5 мм ($\alpha = 15^\circ$)	80,15	20,10	1,48	5,71	2394,83
5.1	АЛОР-2/1-1,5 мм ($\alpha = 30^\circ$)	79,90	20,15	1,48	5,71	2394,83
6.1	АЛОР-2/1-1,5 мм ($\alpha = 45^\circ$)	80,45	20,10	1,45	5,66	2422,29
6.2	АЛОР-2/1-1,5 мм ($\alpha = 45^\circ$)	80,20	20,05	1,47	5,64	2394,16
7.1	АЛОР-2/1-1,8 мм ($\alpha = 0^\circ$, растяжение 0,6 %)	79,90	20,05	1,95	7,23	2314,42
8.1	АЛОР-3/2-2,4 мм ($\alpha = 0^\circ$, покрытие Ан.Окс. серноокислотное)	80,15	20,08	2,45	8,94	2267,27
9.1	СИАЛ-1-3/2-1,4 мм ($\alpha = 0^\circ$)	80,25	20,13	1,41	5,23	2296,69
10.1	СИАЛ-1-3/2-1,4 мм ($\alpha = 90^\circ$)	79,65	20,20	1,38	5,18	2332,99
11.1	АЛОР-2/1-1,25 мм ($\alpha = 90^\circ$, растяжение 2,5 %)	80,40	20,10	1,22	4,64	2353,46
11.2	АЛОР-2/1-1,25 мм ($\alpha = 90^\circ$, растяжение 2,5 %)	80,60	19,80	1,21	4,50	2330,38
12.1	АЛОР-2/1-1,25 мм ($\alpha = 90^\circ$, растяжение 3 %)	80,25	20,38	1,30	4,80	2258,16
13.1	АЛОР-2/1-1,5 мм ($\alpha = 45^\circ$, растяжение 8 %)	80,05	20,20	1,41	5,47	2399,14
14.1	АЛОР-2/1-1,5 мм ($\alpha = 45^\circ$, растяжение 13 %)	80,40	20,15	1,39	5,42	2406,87
15.1	СИАЛ-1-3/2-1,25 мм ($\alpha = 0^\circ$, влага 12 сут)	80,40	20,33	1,24	5,02	2477,40
16.1	АЛОР-2/1-1,5 мм ($\alpha = 0^\circ$, влага 3 сут)	80,25	20,18	1,47	5,64	2377,84
17.1	АЛОР-2/1-1,5 мм ($\alpha = 0^\circ$, влага 12 сут)	80,20	20,25	1,43	5,60	2411,31
18.1	СИАЛ-2-3/2-1,8 мм ($\alpha = 0^\circ$)	82,50	20,60	1,91	7,00	2156,47

Для проведения испытаний на образцы МПКМ наклеивали тензометры с базой 5 мм. Уровень максимальных относительных деформаций измеряли с помощью датчика,

наклеенного вдоль оси образца; коэффициент Пуассона определяли с помощью датчика, наклеенного в ортогональном направлении; логарифмический декремент колебаний определяли по ширине резонансной кривой на уровне $0,707\varepsilon_{\max}$. Характерный вид резонансной кривой для исследуемых образцов представлен на рис. 4.

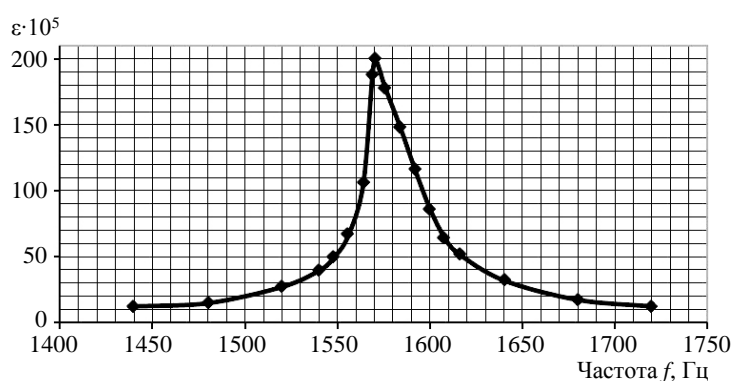


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика образца 7.1 АЛОР-2/1-1,8 мм ($\alpha = 0^\circ$, растяжение 0,6 %)

Результаты исследования упругодемпфирующих характеристик представлены в табл. 2 и проиллюстрированы на рис. 5–7 (где ε – амплитуда относительной деформации; f_p – резонансная частота; f_{\max} – верхняя частота, соответствующая $0,707\varepsilon_{\max}$; f_{\min} – нижняя частота, соответствующая $0,707\varepsilon_{\min}$; E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона; δ – логарифмический декремент колебаний).

Таблица 2

Упругодемпфирующие характеристики

Условный номер образца	Вид образца	$\varepsilon \cdot 10^5$	f_p , Гц	f_{\max} , Гц	f_{\min} , Гц	E , ГПа	μ	δ , %
0.1	Д16ч-АТ	50	951,00	952,20	949,8	69,38	0,296	0,4
		100	948,50	950,00	945,00	69,02	0,296	0,5
		150	933,25	935,03	931,47	66,81	–	0,6
0.2	Д16ч-АТ	50	956,50	957,41	955,58	68,33	–	0,3
		100	943,25	944,75	941,75	66,45	–	0,5
		150	926,75	928,52	924,98	64,15	–	0,6
1.1	СИАЛ-1-2/1-1,25 мм ($\alpha = 0^\circ$)	50	1100,50	1102,00	1099,00	67,96	–	0,86
		100	1100,25	1101,50	1098,50	67,93	–	0,86
		150	1099,00	1102,00	1096,50	67,78	–	1,57
2.1	СИАЛ-3-2/1-1,25 мм ($\alpha = 0^\circ$)	50	1083,00	1088,00	1081,25	67,53	0,296	1,96
		100	1083,00	1086,50	1079,50	67,53	0,296	2,03
		150	1083,75	1087,75	1082,00	67,62	0,292	1,67
		200	1082,25	–	–	67,44	–	–
3.1	АЛОР-2/1-1,5 мм ($\alpha = 0^\circ$)	50	1245,25	1250,00	1241,50	66,11	0,296	2,14
		100	1246,75	1251,25	1242,75	66,27	–	2,14
		150	1243,25	1250,25	1237,75	65,90	–	3,16
3.2	АЛОР-2/1-1,5 мм ($\alpha = 0^\circ$)	50	1249,25	1251,00	1246,75	59,95	0,296	1,07
		100	1248,50	1251,50	1245,25	59,88	0,296	1,57
		150	1245,75	1251,00	1241,75	59,61	0,312	2,33
4.1	АЛОР-2/1-1,5 мм ($\alpha = 15^\circ$)	50	1235,00	1239,00	1228,00	65,14	0,345	2,80
		100	1228,00	1231,75	1220,00	64,40	0,320	3,01
		150	1225,00	1230,75	1221,00	64,09	–	2,50
5.1	АЛОР-2/1-1,5 мм ($\alpha = 30^\circ$)	50	1240,75	1246,00	1237,25	58,75	0,246	2,22
		100	1239,00	1243,00	1235,25	58,59	0,271	1,97
		150	1232,75	1241,75	1228,75	58,00	0,263	3,31

Условный номер образца	Вид образца	$\varepsilon \cdot 10^5$	f_p , Гц	f_{max} , Гц	f_{min} , Гц	E , ГПа	μ	δ , %
6.1	АЛОП-2/1-1,5 мм ($\alpha = 45^\circ$)	50	1201,50	1207,50	1196,50	66,39	0,286	2,88
		100	1202,50	1209,75	1197,75	66,50	0,296	3,14
		150	1202,25	1211,25	1196,50	66,47	0,263	3,85
		200	1199,00	1210,25	1192,25	66,11	–	4,72
6.2	АЛОП-2/1-1,5 мм ($\alpha = 45^\circ$)	50	1264,50	1268,00	1262,00	69,84	0,345	1,49
		100	1263,50	1267,00	1260,50	69,73	0,345	1,62
		150	1260,25	1268,50	1255,50	69,37	0,345	3,24
		200	1255,50	1268,00	1248,00	68,85	–	5,00
7.1	АЛОП-2/1-1,8 мм ($\alpha = 0^\circ$, растяжение 0,6 %)	50	1585,60	1590,00	1581,60	59,02	0,335	1,66
		100	1584,80	1590,00	1580,80	58,96	0,330	1,82
		150	1581,60	1590,00	1574,40	58,72	0,345	3,10
		200	1570,40	1586,80	1564,80	57,89	0,345	4,40
8.1	АЛОП-3/2-2,4 мм ($\alpha = 0^\circ$, покрытие Ан.Окс. серноокислотное)	50	2021,60	2028,40	2014,80	60,29	0,296	2,11
		100	2018,40	2025,20	2012,40	60,10	0,296	1,99
		150	2012,80	2020,40	2007,20	59,76	0,296	2,06
9.1	СИАЛ-1-3/2-1,4 мм ($\alpha = 0^\circ$)	50	1189,00	1193,00	1185,25	64,09	0,276	2,05
		100	1189,75	1195,00	1186,25	64,17	0,271	2,31
		150	1189,00	1194,00	1185,50	64,09	–	2,25
10.1	СИАЛ-1-3/2-1,4 мм ($\alpha = 90^\circ$)	50	1116,25	1121,25	1111,25	58,15	0,296	2,81
		100	1114,75	1120,50	1110,00	57,99	0,271	2,96
		150	1115,25	1121,75	1111,50	58,04	0,263	2,89
		200	1115,25	1121,00	1108,25	58,04	0,271	3,59
11.1	АЛОП-2/1-1,25 мм ($\alpha = 90^\circ$, растяжение 2,5 %)	50	1069,75	1074,75	1066,50	71,58	0,296	2,42
		100	1069,00	1071,75	1065,75	71,48	0,296	1,76
		150	1067,50	–	–	71,28	–	–
11.2	АЛОП-2/1-1,25 мм ($\alpha = 90^\circ$, растяжение 2,5 %)	50	1055,00	1059,25	1051,75	70,75	0,296	2,23
		100	1055,75	1059,75	1052,00	70,85	0,296	2,31
		150	1056,50	1059,75	1053,50	70,95	–	1,86
		200	1056,00	1060,00	1052,25	70,88	–	2,31
12.1	АЛОП-2/1-1,25 мм ($\alpha = 90^\circ$, растяжение 3 %)	50	1144,75	1148,25	1139,00	68,73	0,276	2,54
		100	1143,25	1148,00	1138,25	68,55	0,271	2,68
		150	1140,75	1148,50	1136,25	68,25	0,273	3,37
		200	1139,50	–	–	68,10	0,271	–
13.1	АЛОП-2/1-1,5 мм ($\alpha = 45^\circ$, растяжение 8 %)	50	1201,50	1204,50	1198,75	67,70	0,296	1,50
		100	1201,75	1205,25	1198,00	67,73	0,296	1,90
		150	1200,50	1205,50	1196,00	67,59	0,279	2,49
		200	1199,00	1203,00	1189,75	67,42	0,296	3,47
14.1	АЛОП-2/1-1,5 мм ($\alpha = 45^\circ$, растяжение 13 %)	50	1186,25	1189,50	1182,75	69,33	0,296	1,79
		100	1185,00	1189,75	1182,50	69,18	0,320	1,92
		150	1185,00	1189,75	1179,50	69,18	0,329	2,72
		200	1180,50	1190,50	1175,25	68,66	0,276	4,06
15.1	СИАЛ-1-3/2-1,25 мм ($\alpha = 0^\circ$, влага 12 сут)	50	1037,50	1040,75	1034,00	68,58	0,296	2,04
		100	1035,75	1040,50	1030,00	68,35	0,296	3,18
		150	1037,00	1042,00	1031,00	68,51	0,296	3,33
		200	1034,75	–	–	68,21	–	–
16.1	АЛОП-2/1-1,5 мм ($\alpha = 0^\circ$, влага 3 сут)	50	1228,50	1234,25	1222,25	65,64	0,296	3,07
		100	1228,00	1233,25	1224,00	65,59	0,296	2,37
		150	1224,50	1233,25	1219,50	65,21	0,279	3,53
		200	1224,75	1236,00	1217,00	65,24	0,271	4,87
17.1	АЛОП-2/1-1,5 мм ($\alpha = 0^\circ$, влага 12 сут)	50	1228,00	1229,75	1225,25	69,62	0,296	1,15
		100	1228,25	1230,25	1225,00	69,65	0,296	1,34
		150	1227,00	1230,75	1223,75	69,50	0,296	1,79
18.1	СИАЛ-2-3/2-1,8 мм ($\alpha = 0^\circ$)	50	1468,80	1471,20	1466,00	55,93	0,296	1,11
		100	1469,20	1471,20	1466,40	55,96	0,271	1,03
		150	1468,40	1470,80	1466,00	55,90	–	1,03
		200	1466,80	1470,40	1464,80	55,77	–	1,20

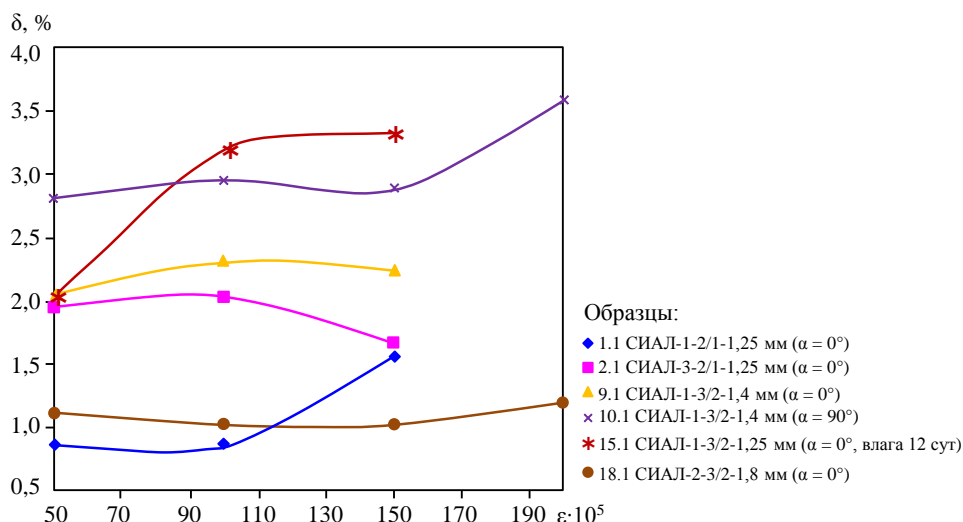


Рис. 5. Изменение логарифмического декремента колебаний для композитов СИАЛ с разной структурой

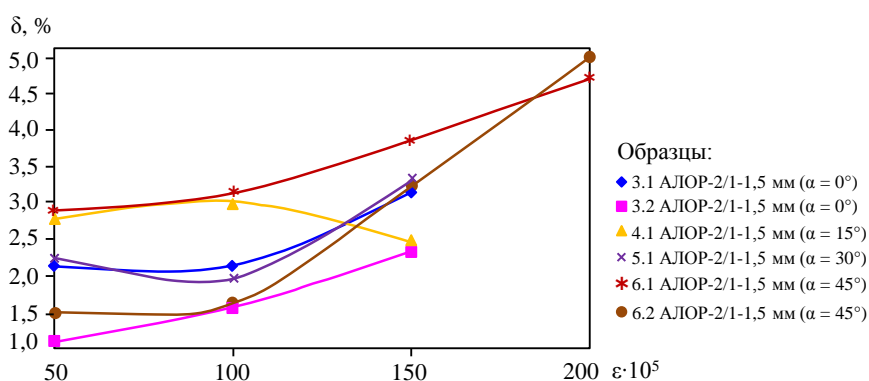


Рис. 6. Изменение логарифмического декремента колебаний для композитов АЛОП-2/1-1,5 с разной укладкой

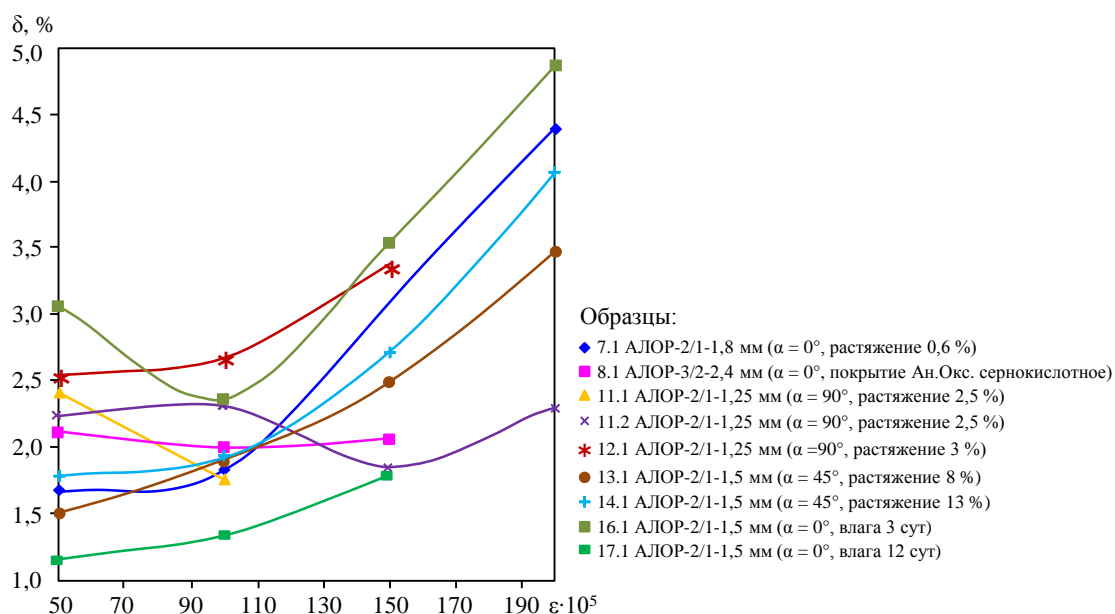


Рис. 7. Изменение логарифмического декремента колебаний для композитов АЛОП с разной структурой

Анализ результатов испытаний показывает, что значения динамического модуля упругости и коэффициента Пуассона для исследуемых образцов панелей МПКМ находятся в диапазонах $E = (5,50-7,2) \cdot 10^{10}$ Па и $\mu = 0,24-0,35$, практически не зависят от уровня нагружения в исследуемом диапазоне относительных деформаций $((50-200) \cdot 10^{-5})$ и близки к значениям модуля упругости и коэффициента Пуассона для деформируемого алюминиевого сплава Д16ч-АТ (табл. 2). Демпфирующая способность (логарифмический декремент колебаний) незначительно зависит от структуры МПКМ и в исследуемом диапазоне изменения относительных деформаций не превышают 5 %. Это объясняется тем, что композит находится вблизи нейтрального слоя и при изгибных колебаниях образцов практически не участвует в рассеянии энергии. В то же время логарифмический декремент колебаний сплава Д16 не превышает 0,6 %.

Заключения

В результате исследований выявлено:

– разброс значений динамического модуля упругости и коэффициента Пуассона обусловлен структурными особенностями образцов, т. е. соотношением доли композита и алюминиевого сплава и содержанием клеевой матрицы в составе композитного слоя;

– в исследуемом диапазоне изменения относительных деформаций логарифмический декремент колебаний в зависимости от структуры МПКМ составил от 1 до 5 %.

Для образцов из МПКМ установлено:

– при изменении угла вырезки образца от 0 до 45 градусов к оси армирования величина декремента увеличивается на 1,5–2 %;

– уровень остаточной деформации (от 0 до 3 %) в предварительно растянутых образцах незначительно влияет на величину декремента;

– термовлажностное воздействие также незначительно влияет на величину декремента.

Логарифмический декремент колебаний образцов из сплава Д16ч-АТ не превышает 0,6 %.

В дальнейшем необходимо провести исследования выносливости МПКМ с целью выявления их преимуществ по сопротивлению усталости по сравнению с алюминиевыми деформируемыми сплавами.

Необходимо продолжить исследования динамической прочности (выносливости и демпфирования) элементов натуральных конструкций планера самолета из МПКМ (фрагментов заклепочных соединений и т. д.) при высокочастотном динамическом нагружении.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект & Технологии. 2016. № 2. С. 41–46.
2. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. № 3. С. 2–14.
3. Дуюнова В.А., Кутырев А.Е., Серебренникова Н.Ю., Вдовин А.И., Сомов А.В. Исследование воздействия агрессивных факторов внешней среды на развитие коррозионных поражений на образцах слоистого металлокстеклопластика класса СИАЛ // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-81-90.
4. Дуюнова В.А., Серебренникова Н.Ю., Нефедова Ю.Н., Сидельников В.В., Сомов А.В. Методы формообразования металлополимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-65-77.

5. Каблов Е.Н., Кулагина Г.С., Железина Г.Ф., Лонский С.Л., Куршев Е.В. Исследование микроструктуры однонаправленного органопластика на основе арамидных волокон Русар-НТ и эпоксидно-полисульфонового связующего // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 19–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-19-26.
6. Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Коновалов А.Н., Нефедова Ю.Н. Перспективы применения в авиационных конструкциях слоистых металлополимерных материалов на основе алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 45–53. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-45-53.
7. Гриневиц А.В., Румянцев Ю.С., Морозова Л.В., Терехин А.Л. Исследование усталостной долговечности алюминиевых сплавов 1163-Т и В950.ч.-Т2 после поверхностного упрочнения // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № S4. С. 93–102. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-93-102.
8. Железина Г.Ф. Трещиностойкие металлоорганопластики для авиационных конструкций: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИАМ, 1996. 32 с.
9. Лавро Н.А., Барабаш В.Н., Ефимов В.А. Прогнозирование срока службы и ресурса самолетных крупногабаритных обтекателей РЛС из полимерных композиционных материалов // Сб. докл. VII Междунар. науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон–2008»: в 2 ч. Геленджик, 2008. Ч. 1. С. 353–360.
10. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Аниховская Л.И. Клеевые препреги для слоистых алюмокомпозитов класса СИАЛ // *Труды ВИАМ*. 2014. № 1. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-1-5-5.
11. Постнов А.В., Постнов В.И., Вякин В.Н. Упругодемпфирующие свойства металлополимерных композитов при высокочастотном нагружении // *Вестник СГАУ им. С.П. Королева*. 2011. № 3. С. 80–87.
12. Загребалов А.А., Кишкина С.И. Остаточные напряжения и выносливость композиционных материалов // *Вопросы авиационной науки и техники*. Сер.: *Авиационные материалы*. М.: ВИАМ, 1990. С. 87–93.
13. Грабильников А.С., Машинская Г.П., Железина Г.Ф., Зиневич О.М., Деев И.С. Межслойная трещиностойкость гибридного композиционного материала алоп // *Механика композиционных материалов*. 1990. Т. 30. № 2. С. 196–206.
14. Нестеренко Г.И. Остаточная прочность подкрепленных конструкций с обширными и многоочаговыми усталостными повреждениями // *Прочность, колебания и ресурс авиационных конструкций и сооружений*. М.: ЦАГИ, 2002. С. 112–117.
15. Сенаторова О.Г., Аниховская Л.И., Сидельников В.В. и др. Сопротивление усталости и особенности разрушения листовых алюмокомпозитов // Тез. докл. Междунар. конф. «Слоистые композиционные материалы – 98». Волгоград: ВГТУ, 1998. С. 86–88.

References

1. Kablov E.N. New generation materials – the basis of innovations, technological leadership and national security of Russia. *Intellekt & Tekhnologii*, 2016, no. 2, pp. 41–46.
2. Kablov E.N. Aerospace materials science. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2008, no. 3, pp. 2–14.
3. Duyunova V.A., Kuttyrev A.E., Serebrennikova N.Yu., Vdovin A.I., Somov A.V. Examination of the impact of aggressive environmental factors on the development of corrosion damage on samples of laminated glass-reinforced plastic of SIAL class. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 16, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-81-90.
4. Duyunova V.A., Serebrennikova N.Yu., Nefedova Yu.N., Sidelnikov V.V., Somov A.V. Methods of forming metal-polymer composite materials (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 16, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-65-77.
5. Kablov E.N., Kulagina G.S., Zhelezina G.F., Lonskii S.L., Kurshev E.V. Microstructure research of the unidirectional organoplastic based on Rusar-NT aramid fibers and epoxy-polysulfone binder. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 19–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-19-26.

6. Antipov V.V., Serebrennikova N.Yu., Konovalov A.N., Nefedova Yu.N. Perspectives of application of fiber metal laminate materials based on aluminum alloys in aircraft design. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 45–53. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-45-53.
7. Grinevich A.V., Romyancev Yu.S., Morozova L.V., Terehin A.L. Study of fatigue life of 1163-T and V95o.ch.-T2 aluminum alloys after surface hardening. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. S4, pp. 93–102. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-93-102.
8. Zhelezina G.F. *Crack-resistant metal-organoplastics for aircraft structures*: thesis abstract, Cand. Sc. (Tech.). Moscow: VIAM, 1996, 32 p.
9. Lavro N.A., Barabash V.N., Efimov V.A. Forecasting the service life and resource of large-sized aircraft radar radomes made of polymer composite materials. *VII Int. Scientific Conf. on Hydroaviation «Gidroaviasalon-2008»: in 2 parts*. Gelendzhik, 2008, part 1, pp. 353–360.
10. Lukina N.F., Dementeva L.A., Anikhovskaya L.I. Adhesive prepregs for laminated aluminum glass plastics (SIAL). *Trudy VIAM*, 2014, no. 1, paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 16, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-1-5-5.
11. Postnov A.V., Postnov V.I., Vyakin V.N. Elastic-damping properties of metal-polymer composites under high-frequency loading. *Vestnik SGAU im. S.P. Koroleva*, 2011, no. 3, pp. 80–87.
12. Zagrebalo A.A., Kishkina S.I. Residual stresses and fatigue of composite materials. *Issues of aviation science and technology. Ser.: Aviation materials*. Moscow: VIAM, 1990, pp. 87–93.
13. Grabilnikov A.S., Mashinskaya G.P., Zhelezina G.F., Zinevich O.M., Deev I.S. Interlayer crack resistance of the hybrid composite material Alor. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov*, 1990, vol. 30, no. 2, pp. 196–206.
14. Nesterenko G.I. Residual strength of reinforced structures with extensive and multi-focal fatigue damage. *Strength, vibrations and resource of aircraft structures and constructions*. Moscow: TsAGI, 2002, pp. 112–117.
15. Senatorova O.G., Anikhovskaya L.I., Sidelnikov V.V. et al. Fatigue resistance and fracture features of sheet aluminum-glass plastics. *Reports Int. Conf. «Layered Composite Materials – 98»*. Volgograd: VSTU, 1998, pp. 86–88.

Информация об авторах

Постнов Вячеслав Иванович, доктор технических наук, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Постнова Мария Вячеславовна, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Антипов Владислав Валерьевич, заместитель генерального директора по науке, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Вешкин Евгений Алексеевич, начальник УНТЦ, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Vyacheslav I. Postnov, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Maria V. Postnova, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vyacheslav V. Antipov, Deputy Director for Science, Doctor of Sciences (Tech.) Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Evgeny A. Veshkin, Head of UNTC, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 21.10.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 29.10.2024.
The article was submitted 21.10.2024; approved and accepted for publication after reviewing 29.10.2024.