

УПРУГОДЕМПФИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ НАГРУЖЕНИИ

© 2011 А. В. Постнов¹, В. И. Постнов², В. Н. Вякин³

¹Ульяновский филиал ОАО «Туполев» - конструкторское бюро

²Ульяновский научно-технологический центр федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский институт авиационных материалов»

³Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

В работе представлены результаты исследований упругодемпфирующих свойств металлополимерных композиционных материалов типа АЛОР и СИАЛ. Модуль упругости в пределах $5,50 \cdot 10^{10} - 7,2 \cdot 10^{10}$ Па, коэффициент Пуассона 0,24 – 0,35, логарифмический декремент колебаний не превышает 5% и, как показали исследования, практически не зависят от уровня нагружения в исследуемом диапазоне относительных деформаций ($\epsilon = 50 \cdot 10^{-5} - 200 \cdot 10^{-5}$), а для сплава Д16 декремент колебаний не превышает 0,6%.

Металлополимерные композиты, модуль упругости, логарифмический декремент колебаний.

Важность применения композиционных материалов (КМ) в элементах конструкций летательных аппаратов связана с необходимостью улучшения их тактико-технических характеристик, таких как надежность, ресурс и т.п. Это объясняется тем, что большинство КМ обладают более высокими по сравнению с традиционно применяющимися металлами (например, алюминиевыми сплавами) удельными механическими свойствами (модулем упругости, демпфирующей способностью, выносливостью и т.д.) [1]. Именно к таким материалам относятся и металлополимерные КМ (МПКМ). Таким образом, благодаря характеру восприятия разных типов нагружений, МПКМ позволяет снизить массу и при этом значительно увеличить ресурс конструкции [2], например, в обшивках, подверженных виброакустическим нагрузкам, таких как обшивки в зоне монтажа силовой установки или на носке крыла. Мест, которые так или иначе для обеспечения надежности в связи с условиями использования материалов конструкторам приходилось увеличивать по массе, в каркасе самолета большое множество [3, 4], и как минимум в 30% таких конструкций возможно применение МПКМ. Кроме того, необходимо осуществлять ремонт и модернизацию изношенного самолетного парка для продления ресурса его эксплуатации. Здесь применение современных МПКМ взамен чисто алюминиевых сплавов становится просто

необходимым и единственным выходом в сложившейся ситуации.

Как показывает практика, МПКМ, состоящие из слоёв алюминиевых сплавов и полимерных КМ, имеют большую выносливость, чем просто алюминиевые сплавы. Это объясняется тем, что зародившиеся из-за динамических нагрузок в конструкции трещины в алюминиевых слоях, как правило, прекращают свое интенсивное развитие благодаря слоям полимерных КМ. Вместе с тем известно, что около 60% аварий в авиации, обусловленных техническими причинами, связаны именно с вибрационным нагружением, а значит и с выносливостью применяемых материалов в конструкции летательных аппаратов.

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 нельзя получить при эксплуатации изделия в целом. Причем условия испытаний образцов должны быть максимально приближены к условиям нагружения материала при эксплуатации в составе изделия.

Методы измерения модулей упругости материалов весьма разнообразны. Они отличаются друг от друга характером механического воздействия на образец, видом возни-

кающего в образце деформированного и напряженного состояния, родом наблюдаемых в эксперименте величин напряжений, типом применяемой аппаратуры.

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

модуль упругости. Для возбуждения резонансных колебаний в образцах использовался воздушный вибровозбудитель колебаний типа КуАИ-ВВ.

Используемый метод определения динамического модуля также основан на замере частоты колебаний образца, при этом образец возбуждается модулированной струей сжатого воздуха.

Установка (рис. 1) предназначена для испытаний материалов при частотах порядка $10^2 - 10^4$ Гц, в широком диапазоне амплитуд колебаний, в условиях нормальных температур.

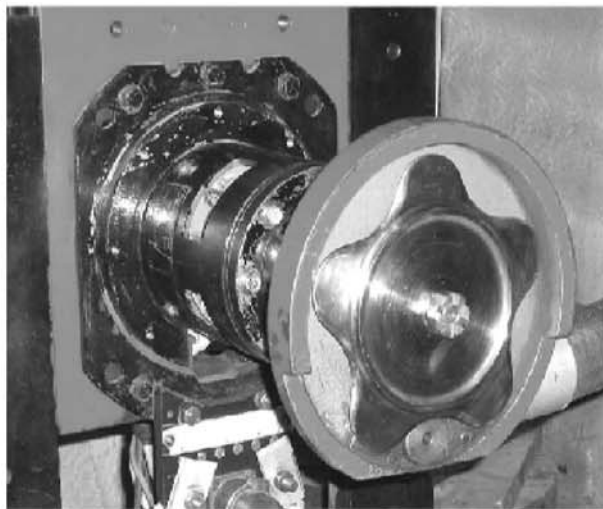
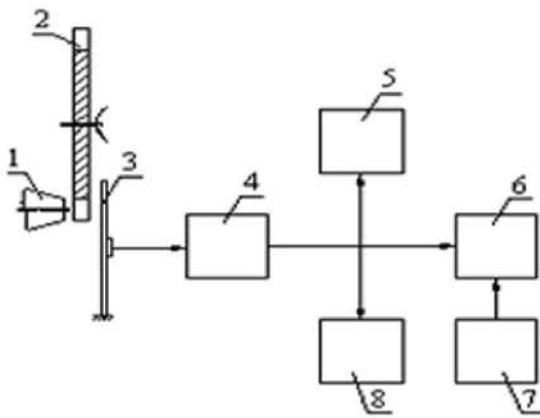


Рис. 1. Блок-схема и внешний вид установки для резонансных испытаний композиционных материалов: 1 - сопло; 2 - модулирующий диск; 3 - объект испытаний; 4 - тензоусилитель; 5 - прибор контроля относительной деформации; 6 - электронный осциллограф; 7 - звуковой генератор; 8 - частотомер

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

Вычисление динамического модуля упругости в Па производится по соотношению

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

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 модуля упругости образец закреплялся строго в узловых линиях основной формы изгибных колебаний. Точный замер собственной частоты колебаний стержня производился электронным частотомером, позволяющим замерять частоту с точностью до 0,1 Гц.

Коэффициент Пуассона определялся как отношение продольных и поперечных деформаций при колебаниях стержня, измеряемых тензодатчиками. Для увеличения точности определения коэффициента Пуассона использовались фольговые тензодатчики.

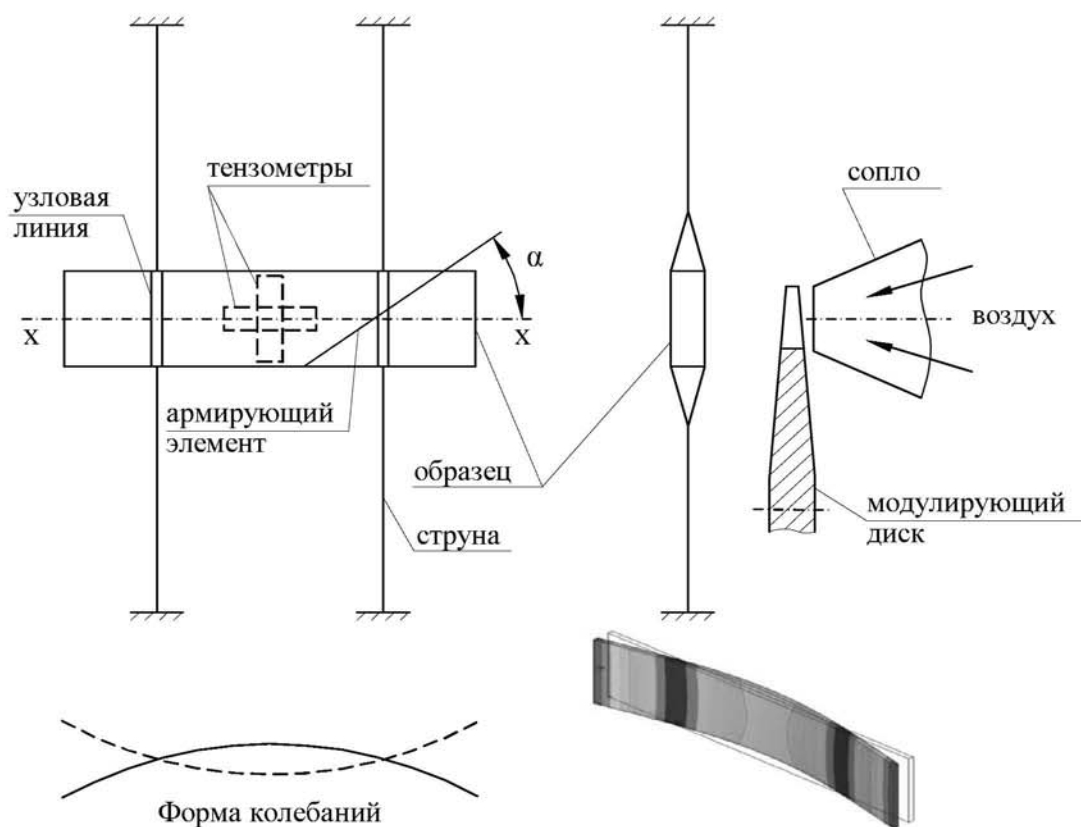


Рис. 2. Схема крепления образцов и форма колебаний

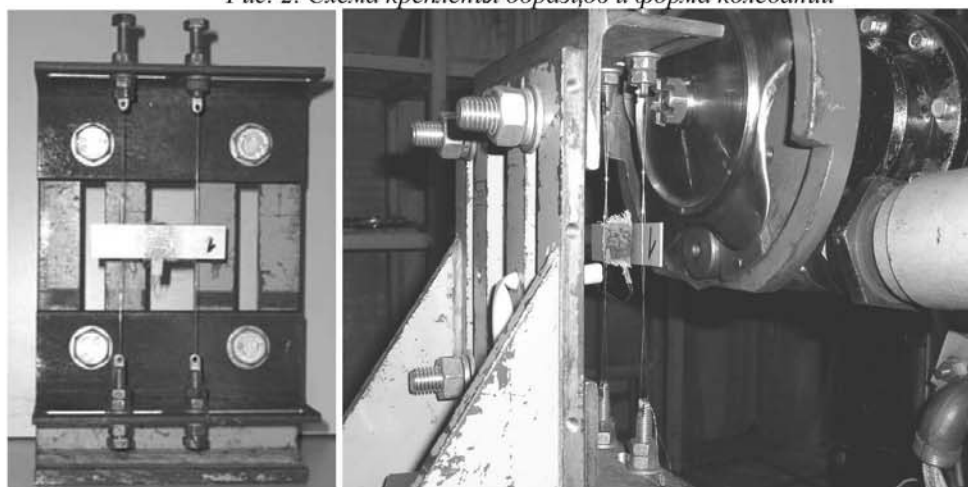


Рис. 3. Крепление образцов в приспособлении

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. В данной работе используется этот способ.

В качестве параметра, характеризующего рассеяние энергии в материале, принят логарифмический декремент колебаний δ , который определяется по ширине резонанс-

ной 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. Схема крепления образцов и применяемое оборудование показаны ранее на рис. 1, 2, 3.

Расчетное соотношение для определения декремента колебаний имеет вид

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

где δ – декремент колебаний,
 f – резонансная частота,
 Δf – ширина резонансной кривой, соответствующая относительным деформаци-

ям, равным 0,707 от максимальной величины.

Вышеописанные методики определения упругих и демпфирующих свойств композиционных материалов стандартизованы и содержатся в ОСТ1 90205-75.

В табл. 1 представлены геометрические размеры, вес и структура образцов для определения упругодемпфирующих свойств МПКМ [5].

Таблица 1. Характеристики образцов

№ обр	Вид материала	l_{max} , мм	$h_{ср}$, мм	$b_{ср}$, мм	Вес, г	Плотность ρ , кг/м ³
1	Д16ЧАТ	79,85	20,10	1,17	5,06	2706,16
1	СИАЛ-1-2/1-1,25мм ($\alpha=0^\circ$)	80,20	20,20	1,30	5,10	2421,59
2	СИАЛ-3-2/1-1,25мм ($\alpha=0^\circ$)	80,20	20,10	1,29	5,03	2428,26
3	АЛОП-2/1-1,5мм ($\alpha=0^\circ$)	80,20	20,10	1,48	5,69	2384,95
4	АЛОП-2/1-1,5мм ($\alpha=45^\circ$)	80,45	20,10	1,45	5,66	2422,29
5	СИАЛ-1-3/2-1,4мм ($\alpha=0^\circ$)	80,25	20,13	1,41	5,23	2296,69
6	СИАЛ-1-3/2-1,4мм ($\alpha=90^\circ$)	79,65	20,20	1,38	5,18	2332,99
7	АЛОП-2/1-1,8мм ($\alpha=0^\circ$, растяжение - 0,6%)	79,90	20,05	1,95	7,23	2314,42
8	АЛОП-2/1-1,25мм ($\alpha=90^\circ$, растяжение - 3%)	80,25	20,38	1,30	4,80	2258,16
9	АЛОП-2/1-1,5мм ($\alpha=45^\circ$, растяжение - 8%)	80,05	20,20	1,41	5,47	2399,14
10	СИАЛ-3-2/1-1,25мм ($\alpha=0^\circ$, влага - 12 суток)	80,40	20,33	1,24	5,02	2477,40
11	АЛОП-2/1-1,5мм ($\alpha=0^\circ$, влага - 12 суток)	80,20	20,25	1,43	5,60	2411,31

Воздействие повышенной влажности (100%) в климатической камере «Табай» в течение 12 суток показало, что влагосодержание в образцах МПКМ определяется открытой пористостью в торцевых зонах (в большей степени в СИАЛ и пористостью волокон для АЛОП). В этой связи влагопоглощение в обоих типах МПКМ находится в пределах 2,25% (мас) (СИАЛ 3-2/1-1,25) и 1,1% (мас) (АЛОП 2/1-1,5).

Для проведения испытаний на образцы МПКМ наклеивались тензометры с базой 5мм типа 2ФКПА-5-50В. Уровень максимальных относительных деформаций измерялся с помощью датчика, наклеенного вдоль оси образца, коэффициент Пуассона определялся с помощью датчика наклеенного в ортогональном направлении, логарифмический декремент колебаний определялся по ширине резонансной кривой на уровне 0,707 ϵ_{max} . Характерный вид резонансной кривой для исследуемых образцов представлен на рис. 4.

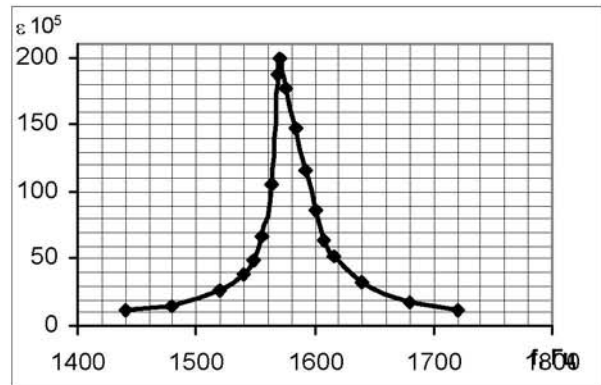


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика образца №7 АЛОП-2/1-1,8мм

Результаты исследования упругодемпфирующих характеристик представлены в табл. 2, а изменение логарифмического декремента проиллюстрировано на рис. 5, где ϵ – амплитуда относительной деформации; f_p – резонансная частота; f_{max} – верхняя частота, соответствующая 0,707 ϵ_{max} ; f_{min} – нижняя частота, соответствующая 0,707 ϵ_{max} ; E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона; δ – логарифмический декремент колебаний.

Таблица 2. Упруго-демпфирующие характеристики материалов

Образец	$\varepsilon \cdot 10^5$	f_p , Гц	f_{max} , Гц	f_{min} , Гц	E, Па	μ	δ
0. Д16ЧАТ	50	951,00	952,2	949,8	6,938E+10	0,296	0,4%
	100	948,50	950,0	946,0	6,902E+10	0,296	0,5%
	150	933,25	935,03	931,47	6,681E+10	-	0,6%
	200	-	-	-	-	-	-
1. СИАЛ-1-2/1-1,25мм ($\alpha=0^\circ$)	50	1100,50	1102,00	1099,00	6,796E+10	-	0,86%
	100	1100,25	1101,50	1098,50	6,793E+10	-	0,86%
	150	1099,00	1102,00	1096,50	6,778E+10	-	1,57%
	200	-	-	-	-	-	-
2. СИАЛ-3-2/1-1,25мм ($\alpha=0^\circ$)	50	1083,00	1088,00	1081,25	6,753E+10	0,296	1,96%
	100	1083,00	1086,50	1079,50	6,753E+10	0,296	2,03%
	150	1083,75	1087,75	1082,00	6,762E+10	0,292	1,67%
	200	1082,25	-	-	6,744E+10	-	-
3. АЛОР-2/1-1,5мм ($\alpha=0^\circ$)	50	1245,25	1250,00	1241,50	6,611E+10	0,296	2,14%
	100	1246,75	1251,25	1242,75	6,627E+10	-	2,14%
	150	1243,25	1250,25	1237,75	6,590E+10	-	3,16%
	200	-	-	-	-	-	-
4. АЛОР-2/1-1,5мм ($\alpha=45^\circ$)	50	1201,50	1207,50	1196,50	6,639E+10	0,286	2,88%
	100	1202,50	1209,75	1197,75	6,650E+10	0,296	3,14%
	150	1202,25	1211,25	1196,50	6,647E+10	0,263	3,85%
	200	1199,00	1210,25	1192,25	6,611E+10	-	4,72%
5. СИАЛ-1-3/2-1,4мм ($\alpha=0^\circ$)	50	1189,00	1193,00	1185,25	6,409E+10	0,276	2,05%
	100	1189,75	1195,00	1186,25	6,417E+10	0,271	2,31%
	150	1189,00	1194,00	1185,50	6,409E+10	-	2,25%
	200	-	-	-	-	-	-
6. СИАЛ-1-3/2-1,4мм ($\alpha=90^\circ$)	50	1116,25	1121,25	1111,25	5,815E+10	0,296	2,81%
	100	1114,75	1120,50	1110,00	5,799E+10	0,271	2,96%
	150	1115,25	1121,75	1111,50	5,804E+10	0,263	2,89%
	200	1115,25	1121,00	1108,25	5,804E+10	0,271	3,59%
7. АЛОР-2/1-1,8мм ($\alpha=0^\circ$, растяжение - 0,6%)	50	1585,60	1590,00	1581,60	5,902E+10	0,335	1,66%
	100	1584,80	1590,00	1580,80	5,896E+10	0,330	1,82%
	150	1581,60	1590,00	1574,40	5,872E+10	0,345	3,10%
	200	1570,40	1586,80	1564,80	5,789E+10	0,345	4,40%
8. АЛОР-2/1-1,25мм ($\alpha=90^\circ$, растяжение - 3%)	50	1144,75	1148,25	1139,00	6,873E+10	0,276	2,54%
	100	1143,25	1148,00	1138,25	6,855E+10	0,271	2,68%
	150	1140,75	1148,50	1136,25	6,825E+10	0,273	3,37%
	200	1139,50	-	-	6,810E+10	0,271	-
9. АЛОР-2/1-1,5мм ($\alpha=45^\circ$, растяжение - 8%)	50	1201,50	1204,50	1198,75	6,770E+10	0,296	1,50%
	100	1201,75	1205,25	1198,00	6,773E+10	0,296	1,90%
	150	1200,50	1205,50	1196,00	6,759E+10	0,279	2,49%
	200	1199,00	1203,00	1189,75	6,742E+10	0,296	3,47%
10. СИАЛ-3-2/1-1,25мм ($\alpha=0^\circ$, влага - 12 суток)	50	1037,50	1040,75	1034,00	6,858E+10	0,296	2,04%
	100	1035,75	1040,50	1030,00	6,835E+10	0,296	3,18%
	150	1037,00	1042,00	1031,00	6,851E+10	0,296	3,33%
	200	1034,75	-	-	6,821E+10	-	-
11. АЛОР-2/1-1,5мм ($\alpha=0^\circ$, влага - 12 суток)	50	1228,00	1229,75	1225,25	6,962E+10	0,296	1,15%
	100	1228,25	1230,25	1225,00	6,965E+10	0,296	1,34%
	150	1227,00	1230,75	1223,75	6,950E+10	0,296	1,79%
	200	-	-	-	-	-	-

Из данных табл. 2 видно, что модуль упругости и коэффициент Пуассона исследуемых образцов панелей МПКМ находятся в диапазонах $E = 5,50 \cdot 10^{10} - 7,2 \cdot 10^{10}$ Па, $\mu = 0,24 - 0,35$, практически не зависят от уровня нагружения в исследуемом диапазоне относительных деформаций ($50 \cdot 10^{-5} - 200 \cdot 10^{-5}$) и близки к модулю упругости и коэффициенту Пуассона деформируемого алюминии-

вого сплава Д16. Необходимо отметить, что влагосодержание в образцах СИАЛ 1-2/1-1,25 приводит к повышению логарифмического декремента колебаний в $1,5 \div 2$ раза вследствие увеличения пластичности полимерной матрицы из-за присутствия воды. В то же время в АЛОР 2/1-1,5 присутствие незначительного количества влаги не привело к повышению значения δ .

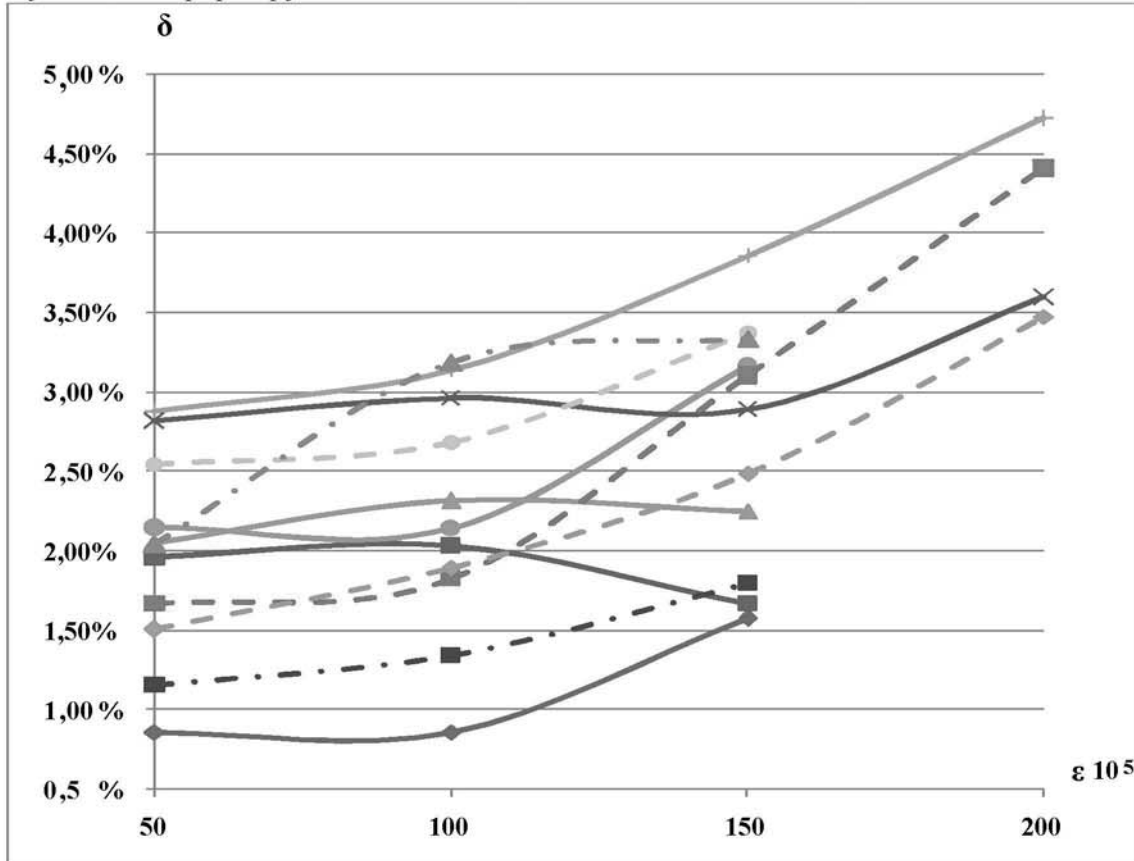


Рис. 5. Изменение логарифмического декремента колебаний МПКМ в зависимости от уровня относительной деформации:

- ◆— 1. СИАЛ-1-2/1-1,25мм ($\alpha=0^\circ$)
- 2. СИАЛ-3-2/1-1,25мм ($\alpha=0^\circ$)
- 3. АЛОР-2/1-1,5мм ($\alpha=0^\circ$)
- +— 4. АЛОР-2/1-1,5мм ($\alpha=45^\circ$)
- ▲— 5. СИАЛ-1-3/2-1,4мм ($\alpha=0^\circ$)
- ×— 6. СИАЛ-1-3/2-1,4мм ($\alpha=90^\circ$)
- 7. АЛОР-2/1-1,8мм ($\alpha=0^\circ$, растяжение - 0,6%)
- 8. АЛОР-2/1-1,25мм ($\alpha=90^\circ$, растяжение - 3%)
- ◆— 9. АЛОР-2/1-1,5мм ($\alpha=45^\circ$, растяжение - 8%)
- ▲— 10. СИАЛ-3-2/1-1,25мм ($\alpha=0^\circ$, влага - 12 суток)
- 11. АЛОР-2/1-1,5мм ($\alpha=0^\circ$, влага - 12 суток)

Демпфирующая способность (логарифмический декремент колебаний) слабо зависит от структуры МПКМ и в исследуемом диапазоне изменения относительных деформаций не превышает 5% (рис. 5). Это объяс-

няется тем, что композитный материал 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%.

Таким образом, показано, что в исследуемом диапазоне относительных деформаций преимущество МПКМ в вибронгруженных условиях определяется присутствием армирующих наполнителей в слое композита, являющихся стопперами трещин и создающих условия перераспределения уровня и знака напряжений в слоях алюминиевого сплава Д16чАТВ.

Библиографический список

1. T.W. Long. E/ Kroon and J. Sinke. Formability. Edited by A. Vlot and J.Gunnink (из сборника докладов на международной конференции по FML) "GLARE", Нидерланды, Делфт, Делфтский технологический университет, 24-26.09.2001. - С. 336-349.

2. Structural Laminates Company. Слоистые волокнисто-металлопласты. Второе издание

Новые конструкционные материалы для аэрокосмической промышленности [Текст] / США, Пенсильвания, Нью-Кенсингтон., 1997. - 576 с.

3. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке, (шестое издание) [Текст] / В.П. Романовский - Л.: Машиностроение, 1979. - 253 с.

4. Марковцев, В.А. Выбор конструктивных параметров правильного устройства на основе анализа динамического режима [Текст] / В.А. Марковцев, Г.В. Проскуряков, В.И. Филимонов // Авиационная промышленность. - №9. - 1988. - С.32-35.

5. Технологическая рекомендация ТР 1.2.1637-99. Изготовление алюмополимерных композиционных слоистых материалов марки СИАЛ. - М.: ВИАМ, 1999. - 15с.

UPRUGODEMPFIRUYUSCHIE PROPERTIES METAL COMPOSITES AT HIGH LOADING

© 2011 A. V. Postnov¹, V. I. Postnov², V. N. Vyakin³

¹JSC "Tupolev" Design Bureau, Ulyanovsk Affiliate

²Ulyanovsk Science & Technology Center VIAM

³ Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)

The article presents the results of studies elastic-fluid properties of metal-composite materials such as ALOR and SIAL. Modulus of elasticity in the range $55,50 \cdot 10^{10} - 7,2 \cdot 10^{10}$ Pa, Poisson's ratio of 0.24 - 0.35, the logarithmic decrement of oscillations does not exceed 5%, and studies have shown that practically do not depend on the level of loading in the investigated range of relative strain ($\varepsilon = 50 \cdot 10^{-5} - 200 \cdot 10^{-5}$), while for alloy D16 decrement does not exceed 0.6%.

Metal-polymer composites, elastic modulus, logarithmic decrement.

Информация об авторах

Постнов Вячеслав Иванович, доктор технических наук, доцент, заместитель начальника Ульяновского научно-технологического центра федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский институт авиационных материалов». Тел.: 8(8422) 52-45-22. E-mail: untcviam@gmail.com. Область научных интересов: конструкции из композиционных материалов.

Постнов Алексей Владимирович, инженер-конструктор Ульяновского филиала конструкторского бюро ОАО «Туполев». Область научных интересов: Проектирование конструкций из композиционных материалов.

Вякин Вениамин Николаевич, кандидат технических наук, доцент, директор научно-технологического центра композиционных материалов Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национальный исследователь-

ский университет). Тел.: 8-(846) 267-47-69. E-mail: vyakin@ssau.ru. Область научных интересов: конструкции из композиционных материалов.

Postnov Vyacheslav Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, deputy chief of the Ulyanovsk centre of science-technological Center VIAM. Phone: 8(8422) 52-45-22. E-mail untcviam@gmail.com. Area of research: Designing of structures from composite materials.

Postnov Alexey Vladimirovich, the engineer-designer of the Ulyanovsk branch of design office of Open Society " Tupolev ". Area of research: Designing of structures from composite materials.

Vyakin Veniamin Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, head of the composite materials research centre, Samara State Aerospace University. Phone: (+7-846) 267-47-69. E-mail: vyakin@ssau.ru. Area of research: Composite and Structures.