

УДК 669.018.95

М.В. Постнова¹, В.И. Постнов¹**РОЛЬ СТРУКТУР МПКМ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ВИБРОУСТАЛОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГТД**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-1-7-7

В ходе эксплуатации реверса двигателя Д18Т выявлено 32 случая разрушения обшивок из сплава Д16 подвижного корпуса реверсивного устройства РУ-18Т. Для повышения ресурса данного агрегата необходимо в качестве материала обшивки внутреннего тракта (типа «корона») использовать металлополимерный материал Алор Д16/41. Для производственного внедрения металлополимерного материала Алор Д16/41 в состав конструкций самолета проведены технологические исследования его свойств. Исследования показали, что способность слоистых металлополимерных композиционных материалов (МПКМ) к формоизменениям зависит от схемы армирования волокон относительно направления деформирования. Отработаны также все известные технологические процессы формообразования деталей. В связи с тем, что агрегаты реверса в процессе эксплуатации подвергаются виброакустическим нагрузкам, проведены исследования по их звукоизоляции. Использование в качестве материала обшивки мотогондолы Алора Д16/41 позволило снизить массу данной конструкции на 10% и значительно повысить ее виброусталостные характеристики.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: реверс двигателя, усталостное разрушение, Алор Д16/41, обшивка мотогондолы.

During operation of a reverser of D18T engine 32 cases of damaged skin from D16 alloy of RU-18T reverser mobile case are revealed. In order to increase in service life of this unit it has been decided to use metal-polymeric material Alor D16/41 as a skin material of internal path (crown type). For commercial introduction of metal-polymeric material Alor D16/41 into a structure of airplane manufacturing research of its properties has been conducted. The researches have shown that forming ability of layered MPCM depends on the fiber reinforcement lay-out relative to the direction of deformation Besides all known technological processes of parts forming have been developed. Since units of the reverser are subjected to vibroacoustic impact in the process of operation researches on their sound insulation have been conducted. Application of Alor D16/41 as a skin material in engine nacelle allowed reducing in weight of the structure by 10% and considerable improving of its vibration fatigue properties.

Work is performed within implementation of the complex scientific direction 13.2. «Constructional PCM» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keyword: reverser, fatigue failure, Alor D16/41, skin of engine nacelle.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Анализ развития науки и технологий за рубежом показывает, что в мире активно развиваются и продолжают свое развитие в будущем [1–3] различные виды композиционных материалов с улучшенными служебными характеристиками. Одним из видов таких материалов являются металлополимерные композиционные материалы (МПКМ), которые представляют собой промежуточное звено между металлическими сплавами и

полимерными композиционными материалами (ПКМ), успешно сочетающие в себе положительные технологические свойства металлов (деформируемость традиционными способами) и ПКМ (низкая плотность, высокая виброакустическая прочность, низкая скорость роста усталостных трещин (СРТУ) и т. п.) [4–6].

В России и за рубежом исследуются области применения МПКМ, позволяющие реализовать их преимущества в МЦУ, СРТУ, демпфирующей способности, огнестойкости, камне- и птицестойкости, весовой эффективности и взрывозащитных свойствах. Для особо ответственных элементов из МПКМ могут быть использованы встроенные в структуру сенсоры, контролирующие их техническое состояние в процессе эксплуатации. Перспективно также применение МПКМ для ремонта конструктивных элементов двигательных установок и планера с демпфированием внешних нагрузок, действующих на них.

Материалы и методы

В зависимости от используемых в составе МПКМ материалов они могут быть классифицированы (рис. 1). Основные сравнительные характеристики материалов обшивок приведены в табл. 1.

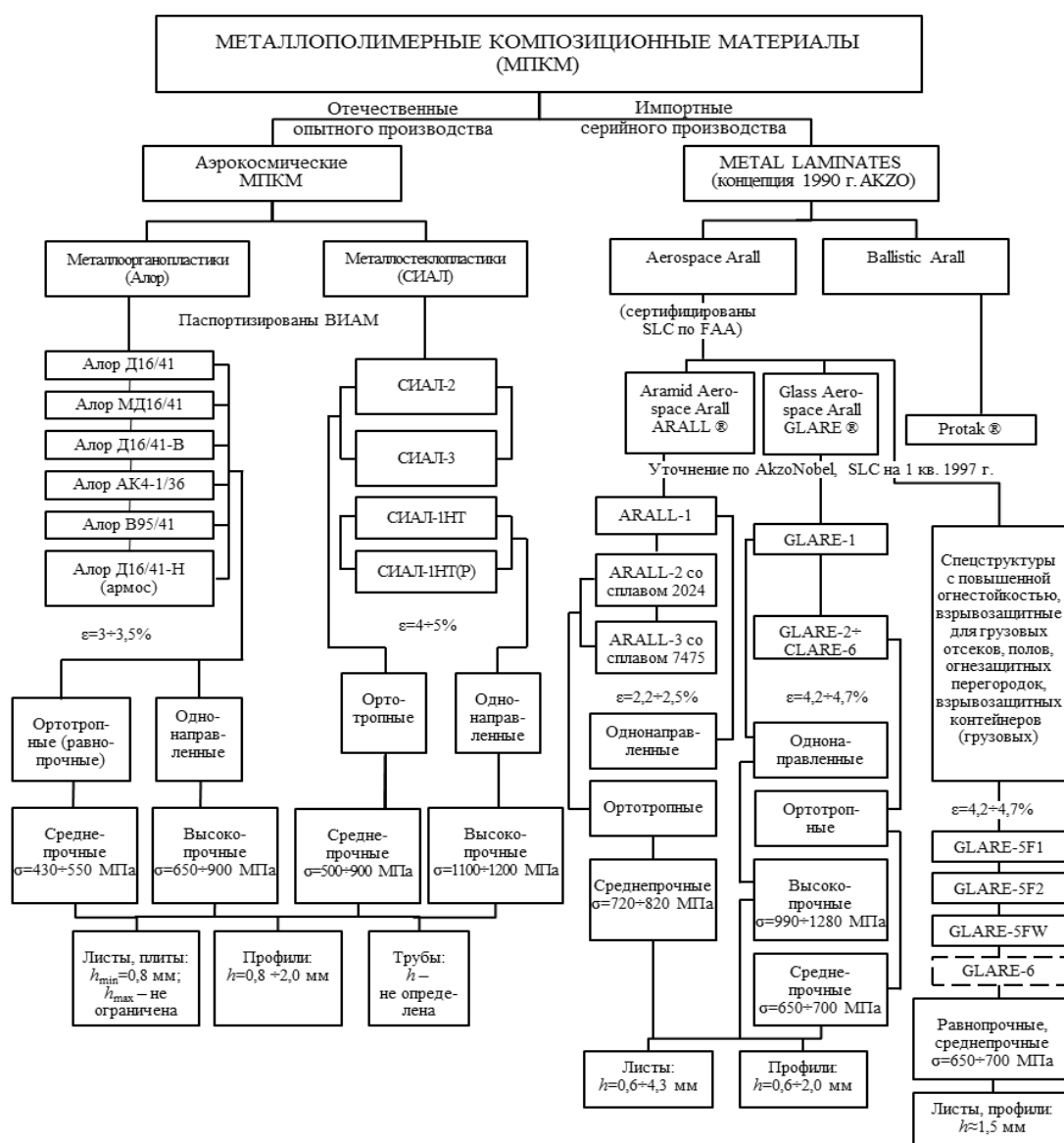


Рис. 1. Классификация металлополимерных композиционных материалов

Таблица 1

Материалы для обшивок, работающих в зонах виброакустических воздействий

Материалы	σ_b	σ_{02}	E , ГПа	ε , %	МЦУ*	СРТУ**	Плотность d , г/см ³	Удельная прочность σ/d , км (усл. ед.)/ снижение массы, %	Относи- тельная стои- мость
	МПа								
Сплав Д16ч.-АТВ1	430–450	270–290	69–70	13	60–80	6	2,78	15,5/0	1
Алюминий-литиевые сплавы	400–430	250–270	68–139	10	40–60	–	2,47	16,2/10	3–5
Дублированная обшивка из сплава Д16ч.-АТВ на клее ВК-25	430–450	270–290	69–70	–	–	–	<2,78	>15,5/0	11,6
Алор Д16/41	430–480	270–320	58–62	3–5	80–100	0,2–0,4	2,3	19,5/14	19,5
ARALL-2	760	590	62	2,2–2,5	До 10 ³	0,0025	2,35	32,3/13	10
СИАЛ-1	650–700	250–300	55–58	4–5	250–300	0,1–0,3	2,45	27,3/11	12–16
GLARE-1	1000–1280	550–800	58–60	4–5	–	–	2,45	46,9/25	7–10
Стеклопластик	670	–	27	3–5	14,5–20	–	1,8	31,6/(10–15)	16
Органит 7Т	700	–	33	3–5	29–37	–	1,4	50/(20–30)	22–25
Углепластик	680–1100	–	120	0,4–0,5	37–53	–	1,35	(50,9–81,5)/(30–40)	20–30

* N , кцикл (при $\sigma_{\max}=160$ МПа).** d/dN , мм/кцикл (при $\Delta K=31$ МПа $\sqrt{м}$).

Сопротивление развитию усталостных трещин у МПКМ выше, чем у металлов. Это объясняется арочным эффектом армирующих волокон, которые сдерживают развитие повреждений и снижают интенсивность напряжений в алюминиевых слоях в зоне вершины микротрещины. Совместное действие высокопрочных армирующих волокон, соединенных с металлическими слоями (через клеевой слой матрицы), и соседних неповрежденных слоев металла приводит к замедлению роста в длину микротрещин и их остановке без ремонта. Разработанные материалы обеспечивают высокую точность и надежность работы систем, длительный ресурс аппаратуры в условиях криогенных и повышенных температур, агрессивных рабочих сред и являются незаменимыми конструкционными материалами для существующих и перспективных изделий авиационной и космической техники [6].

Исследования показали, что при формировании материала в металлических слоях возникают растягивающие напряжения, что не всегда целесообразно, особенно в случае применения такого материала в конструкциях, работающих при растягивающих эксплуатационных нагрузках. В связи с этим в процессе формования, при использовании дополнительных растягивающих нагрузок, приложенных ко всему пакету слоев или только к слоям из композиционного материала МПКМ, в слоях металла можно создать необходимый уровень сжимающих напряжений. Знание величины поверхностных напряжений весьма существенно для определения вероятной долговечности материалов и их сопротивляемости коррозии.

Для оценки уровня остаточных напряжений используется метод рентгеноструктурного анализа напряжений, основанный на изучении дифракционной стоячей волны большой интенсивности при различных углах падения рентгеновских лучей на поверхность металла [7, 8].

Результаты и обсуждение

Проведенные исследования показали наличие сжимающих напряжений на поверхности металлического слоя из сплава Д16ч.-АТВ, возникающих на стадии его изготовления, уровень напряжений составляет 30–60 МПа. Использование предварительного

растяжения слоев МПКМ приводит к уменьшению уровня сжимающих напряжений в направлении вытяжки и увеличению уровня растягивающих напряжений (рис. 2) [9].

Исследования внутренних напряжений показывают различия их уровня и распределения по толщине слоев сплава Д16ч.-АТВ с тенденцией сдвига в область растягивающих напряжений – от исходного листа к растянутой структуре.

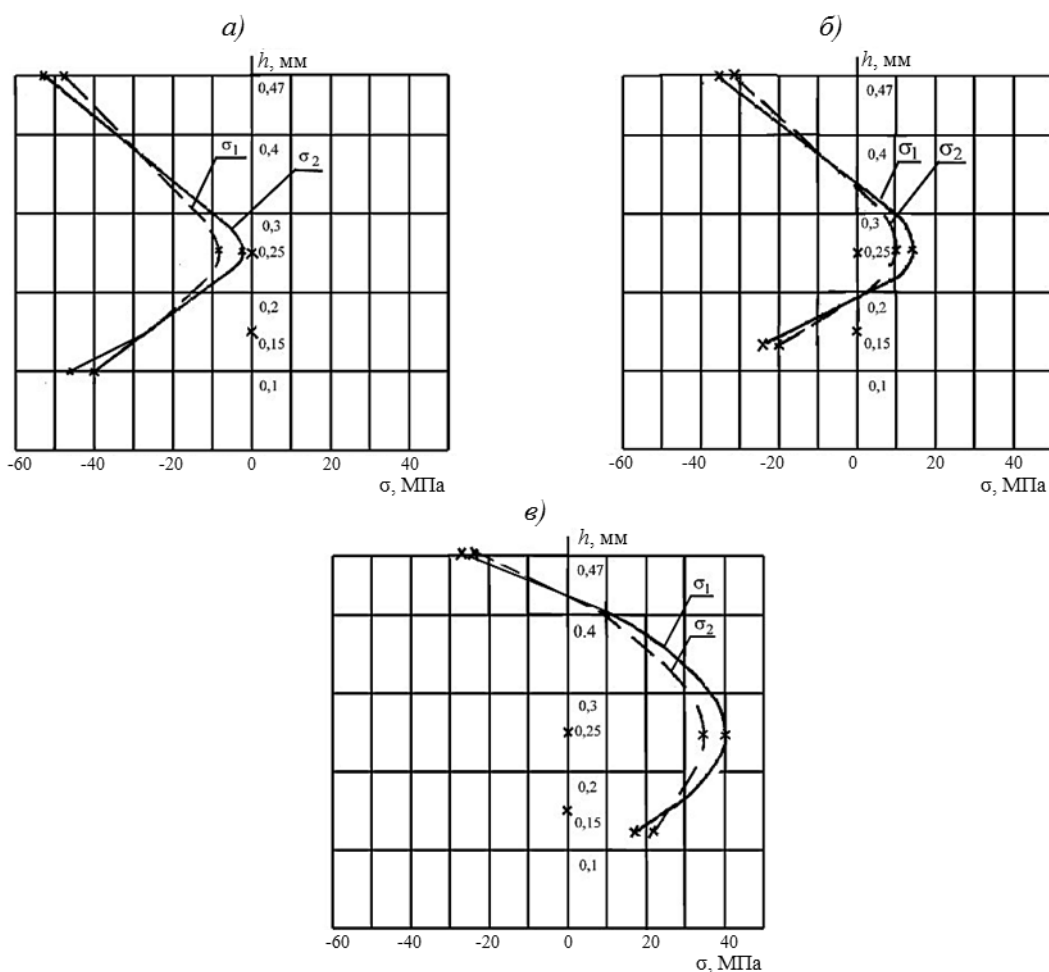


Рис. 2. Распределение внутренних напряжений по толщине листа из сплава Д16ч.-АТВ (а) и в материале Аlor Д16/41 с нерастянутой структурой Органита (б) и растянутой на 25% от разрушающей деформации структурой Органита (в)

Растягивающие остаточные напряжения в поверхностных алюминиевых листах приводят к преждевременному их разрушению при усталостном нагружении, а также к снижению сопротивления композита малым пластическим деформациям при статическом растяжении. Поэтому для увеличения ресурсных характеристик Алора важным вопросом в выборе технологии его изготовления является оптимизация напряженного состояния компонентов, а именно: создание в алюминиевых листах сжимающих, а в слоях органопластика – растягивающих остаточных напряжений [10, 11]. Для этой цели используются следующие технологические способы (рис. 3 и 4):

- растяжение отвержденных листов – этот способ заключается в перераспределении остаточных термических напряжений в готовом листе Алора путем его растяжения до уровня деформаций, превышающих предел текучести алюминиевого листа;

- отверждение в напряженном состоянии – способ состоит в создании требуемого уровня и знака остаточных напряжений в компонентах при отверждении листов Алора, что осуществляется формованием металлоорганопластика в напряженном состоянии,

когда слои органопластика при отверждении подвергаются технологическим растягивающим нагрузкам – практически путем растяжения препрега специальными приспособлениями при подготовке пакета к формованию; величина натяжения выбирается с учетом релаксационных процессов, проходящих в полимерном волокне и связующем в процессе отверждения;

– изготовление плоских листов методом намотки – этот способ состоит в создании требуемого уровня и знака остаточных напряжений путем натяжения армирующего наполнителя при намотке его на плоскую оправку.

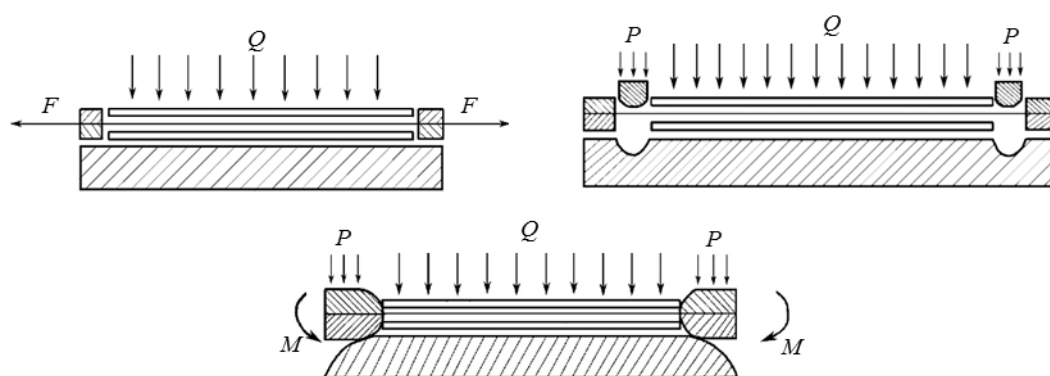


Рис. 3. Схемы отверждения Алора в напряженном состоянии

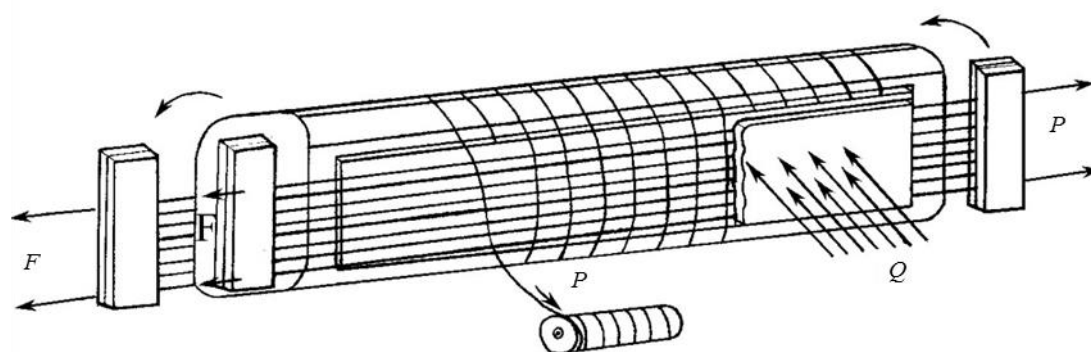


Рис. 4. Схема изготовления Алора методом намотки

Приведенные схемы позволили подтвердить ранее сделанный вывод, что увеличение напряжений в слоях Органита при формовании МПКМ позволяет снизить уровень сжимающих остаточных напряжений в слоях алюминия с 25 до 9 МПа.

Проведенные технологические исследования показали, что способность слоистых МПКМ к формоизменению зависит от схемы армирования волокон относительно направления деформирования. Так, у однонаправленных МПКМ при гибке вдоль оси армирования получают минимальные радиусы изгиба и углы пружинения. Необходимо отметить, что на производимых листовых заготовках МПКМ отработаны все общеизвестные технологические процессы формообразования деталей: гибка, гибка-прокатка, стесненный изгиб, штамповка на прессе, штамповка эластичной средой, обтяжка деталей одинарной и двойной кривизны и т. д. При этом получены следующие параметры: допустимый относительный радиус изгиба $\bar{R} \geq 5$ (при стесненном изгибе – $R \geq 1$, коэффициентах выдавки $K_{\text{выд}} \leq 8\%$ и обтяжки $K_{\text{обт}} \leq 1,02-1,025$). В связи с ограниченными возможностями обтяжки Алоров разработаны специальные методы и приемы с учетом пружинения детали в обтяжной оснастке. Если деталь имеет сложную геометрическую

форму и не может быть изготовлена по традиционным технологиям для металлов, то для этого случая разработана новая технология «раздельного» формования, когда из отдельных слоев изготавливают элементы детали, а затем они формируются в специальной оснастке в прессе или автоклаве.

При эксплуатации агрегата реверса двигателя Д18Т на самолетах Ан-124 установлено 32 случая разрушения внутренних обшивок подвижного корпуса реверсивного устройства РУ-18Т. Разрушения происходили при налете с начала эксплуатации агрегата от 22 до 615 ч. Характер разрушений – усталостный. Трещины обшивок и подкрепляющих их окантовок в районе вырезов под створки имеют длину от 8 до 100 мм, в отдельных случаях имеются вырывы заклепок и кусков обшивки, характерные для акустического разрушения конструкций. Разрушения концентрируются в районе расположения на мотогондоле воздухозаборника СПВ. Для изучения характера нагружения проведены исследования агрегата в комплекте с мотогондолой на стенде с определением интенсивности звукового нагружения и динамических напряжений в зонах разрушения [12]. Установлено, что при уровне шума до 160 дБ создаются напряжения до 56 МПа (в отдельных случаях – до 90 МПа) в диапазоне частот 220–380 Гц, что и обуславливает низкую долговечность обшивок и других элементов из алюминиевых сплавов. По результатам опыта эксплуатации и исследований приняты меры по уменьшению шума с помощью введения перфорированной перегородки воздухозаборника СПВ и снижению рабочих напряжений путем увеличения толщины материала обшивок и окантовок до 1,5 мм.

Для увеличения жесткости внутреннего набора введены проставки между полками окантовок. Заклепочные соединения с потайными головками заменены на соединения с полукруглыми головками. В результате этих изменений уровень шума снижен до 156 дБ, а напряжения – до 40–45 МПа. Повышение ресурса агрегата и разработка модификаций двигателя Д18Т с увеличенной тягой связаны с применением обшивок из Алор Д16/41 с учетом опыта эксплуатации конструкций из МПКМ [13, 14].

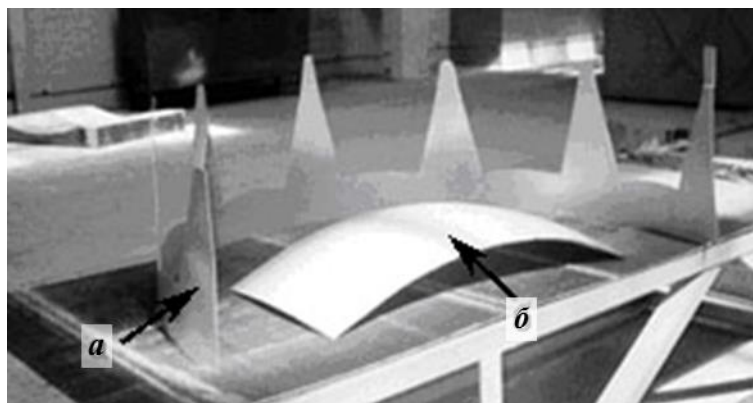


Рис. 5. Обшивки внутреннего тракта (а) и мотогондолы (б) из материала Алор Д16/41

Для подвижного корпуса реверса двигателя предусматривается введение только обшивок внутреннего тракта (типа «корона») (рис. 5) из Алор Д16/41 с расчетной толщиной 1,5 мм. Одновременно учитываются возможности по повышению надежности, обеспечению ремонтпригодности и увеличению ресурса реверсивного устройства РУ-18Т двигателя Д18Т на самолетах Ан-124. Ожидаемое снижение массы обшивок 8–10%, увеличение трудоемкости – на величину изготовления заготовок МПКМ (~50 нормо-час/изд.), прогнозируемый ресурс может быть установлен только после наземных испытаний с определением звуковых нагрузок и тензометрированием.

Поскольку агрегаты реверса нагружены виброакустически, то проведены дополнительные исследования по оценке их звукоизоляции для случая применения МПКМ. Испытания проводили на установке «Шум-1М30» при исходном уровне звукового давления 105 дБ. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Звукоизоляционные свойства металлополимерного композиционного материала

Материал, толщина	Снижение шума, дБ, при частоте октавных полос, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Алор Д16/41 (3 слоя), $h=1,5$ мм	1	2,5	1	5	10	3	32	29
Алор Д16/41 (3 слоя), деформированный на 2%, $h=1,3$ мм	6,5	4	4,5	2,5	6,5	6,8	22	32
СИАЛ-1н однонаправленный (5 слоев), $h=1,4$ мм	2	3	1	1	9	5,7	31	28,5

Кроме того, анализ эксплуатации двигателя Д18Т показывает, что на реверсивном устройстве и носках воздухозаборника отмечаются частые повреждения не только вследствие виброакустических воздействий. Имеются случаи разрушения листовых элементов мотогондолы от газовой коррозии в зоне выхлопа и усталостно-коррозионные повреждения элементов планера в зоне установки ВСУ [15]. Поэтому проведенные виброакустические усталостные испытания МПКМ после коррозионных испытаний показали их более высокую надежность по сравнению с обычными алюминиевыми сплавами.

Заключения

В результате исследований МПКМ разработана технология изготовления обшивок внутреннего тракта реверсивного устройства РУ-18Т и обшивок мотогондолы самолета Ан-124-100 из готового листа Алор Д16/41. Кроме того, преимущества МПКМ убедительно доказаны опытом шестилетней эксплуатации носовой части крыла самолета АН-124-100, работающей в зонах высоких виброакустических воздействий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002: юбилейный науч.-технич. сб. М.: МИСИС–ВИАМ, 2002. С. 23–47.
3. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2001. №1. С. 3–8.
4. Постнова М.В., Казаков И.А. Металлополимерные композиционные материалы – свойства, технология формования, области применения // Слоистые композиционные материалы. 2001. С. 187–188.
5. Антипов В.В. Металлические материалы нового поколения для планера перспективных изделий авиационно-космической техники // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №4. Ст. 02. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 08.06.2016).
6. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В., Шестов В.В. Конструкционные слоистые материалы СИАЛ // Клеи. Герметики. Технологии. 2012. №6. С. 41–49.
7. Деев И.С., Каблов Е.Н., Кобец Л.П., Чурсова Л.В. Исследование методом сканирующей электронной микроскопии деформации микрофазовой структуры полимерных матриц при механическом нагружении // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №7. Ст. 06.

- URL:<http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.06.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-6-6.
8. Уманский Я.С. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. М.: Металлургия, 1982. 289 с.
 9. Мясников Ю.Г. Рентгеновские дифрактометры для исследования и контроля напряженно-деформированных материалов // Заводская лаборатория. 1985. №7. С. 21–26.
 10. Постнов В.И., Постнова М.В., Арлашкина О.Ю. Исследование влияния напряженно-деформированного состояния на усталостные характеристики МПКМ // Сб. матер. Междунар. науч. конф. «Новые перспективные материалы и технологии их получения–2010». Волгоград: ВолГТУ, 2010. С. 183–185.
 11. Постнов В.И., Постнова М.В., Арлашкина О.Ю. Исследование влияния технологических факторов на уровень остаточных напряжений в МПКМ обшивок реверса Д18Т // Вестник СГАУ им. С.П. Королева. 2011. Т. 3. Ч. 3. С. 65–73.
 12. Постнов В.И., Сенаторова О.Г., Каримова С.А. и др. Особенности формирования крупногабаритных листов металлополимерных КМ, их структура и свойства // Авиационные материалы и технологии. 2009. №4. С. 23–32.
 13. Лавро Н.А., Барабаш В.Н., Ефимов В.А. Прогнозирование срока службы и ресурса самолетных крупногабаритных обтекателей РЛС из полимерных композиционных материалов // Сб. докл. 7-й науч. конф. по гидроавиации «Гидросалон–2008». 2008. Ч. 1. С. 353–360.
 14. Постнов А.В., Постнов В.И., Вякин В.Н. Упругодемпфирующие свойства металлополимерных композитов при высокочастотном нагружении // Вестник СГАУ им. С.П. Королева. 2011. №3. Ч. 3. С. 80–87.
 15. Постнов В.И., Постнова М.В., Мантусова О.Ю. Исследование виброусталостных свойств отсека носовой части крыла из МПКМ // Вестник СГАУ им. С.П. Королева. 2012. №3. Ч. 1. С. 281–290.