

УДК 629.7.017+620.22

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРОУСТАЛОСТНЫХ СВОЙСТВ ОТСЕКА НОСОВОЙ ЧАСТИ КРЫЛА ИЗ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2012 В. И. Постнов¹, М. В. Постнова², О. Ю. Мантусова¹

¹Ульяновский научно-технологический центр
Всероссийского института авиационных материалов

²Институт авиационных технологий и управления
Ульяновского государственного технического университета

Рассмотрены результаты статических и акустических исследований авиационных конструкций из металлополимерных материалов марки Амор Д16/41 и сравнение их с серийными конструкциями из алюминиевого сплава.

Металлополимерные композиционные материалы, статические испытания, акустические испытания.

При интенсивной эксплуатации самолетов Ан-124-100 на коммерческих грузоперевозках были выявлены десятки случаев преждевременного разрушения алюминиевых обшивок отсеков носка крыла, находящихся в зонах с высоким уровнем виброакустических нагрузок до 156 дБ и динамическими напряжениями до $31 \div 34$ МПа в резонансных режимах. Разрушения наблюдались при налётах от 204 до 740 часов при гарантированном сроке эксплуатации – 700 часов. В отдельных случаях быстрое распространение и слияние усталостных трещин приводило к вырыву отдельных кусков материала из обшивки (рис.1). На основании проведённого анализа статистики разрушений было установлено, что причинами их являются виброакустические воздействия. Предотвратить образование этих разрушений можно за счёт использования в авиационных конструкциях металлополимерных композиционных материалов (МПКМ).



Рис. 1. Разрушение элементов предкрылка

Опираясь на проведённые исследования по отработке технологических процессов обтяжки, гибки, штамповки листов МПКМ был изготовлен носок носовой части крыла (НЧК) самолёта Ан-124. Схема типового сечения фрагмента носка габаритом $1720 \times 260 \times 320$ мм представлена на рис. 2.

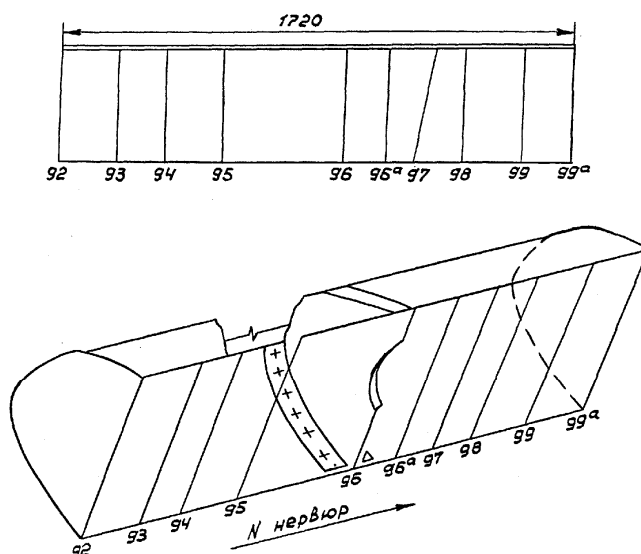


Рис. 2. Общий вид отсека НЧК

Конструкция опытных отсеков из Амор Д16/41 (рис. 3) состоит из конической обшивки одинарной кривизны с радиусом изгиба по передней кромке 25...30 мм с условно плоской нижней частью и верхней частью по аэродинамическому обводу носка. Обшивка 1 выполнена единым листом МПКМ толщиной 1,3 мм со структурой, показанной на рис. 4. На обшивку устанавливается усиливающий пояс 2, который выпол-

нен из МПКМ той же структуры. В перпендикулярном к передней образующей направлении обшивка подкреплена внутренним набором – носками нервюр, состоящими из листовых стенок 4 с отбортовками в отверстиях, и штампованными бортами и поясов 5 из прессованного профиля таврового и треугольного сечений, соединённых со стенками клёпкой. Обшивка и усиливающий пояс соединяются с поясами нервюр через слой клея ВК-27 заклёпочными соединениями. Усиливающий пояс введён для гашения колебаний, передающихся от находящейся в турбулентном потоке обшивки к стенкам носков нервюр. Сзади со стороны кессона крыла носок замыкается балкой, состоящей из листовой стенки 6, имеющей отбортованные отверстия облегчения. Стенка балки имеет с обеих сторон стойки 3 из прессованного профиля, которые спереди соединены со стенками нервюр носка, а сзади – с нервюрами носовой части. К стенке балки заклёпочными швами сверху и снизу крепятся пояса 3 из прессованного профиля таврового сечения, на полках которых стыкуются обшивка носка и обшивка носовой части крыла.

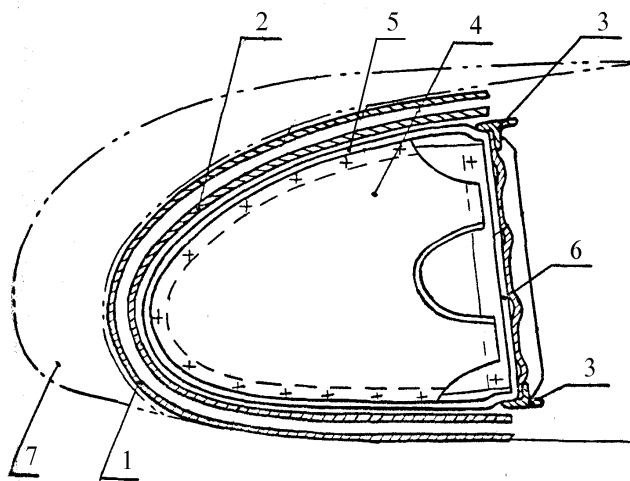


Рис. 3. Сечение отсека носка носовой части крыла из МПКМ:

1 – обшивка; 2 – усиливающий пояс; 3 – пояса;
4 – стенка нервюры; 5 – пояс нервюры; 6 – стенка балки; 7 – расположение предкрылка

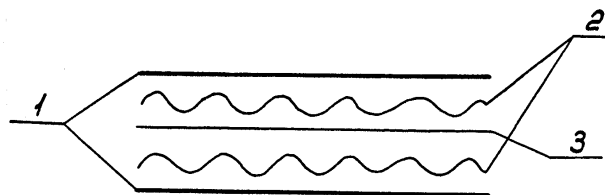


Рис. 4. Структура МПКМ: 1 – лист Д16чАТВ толщиной 0,5 мм, 2 – ткань СВМ арт. 56313; 3 – клеевая пленка ВК-41

Конструкция усиленного носка НЧК из Д16, как и для опытного отсека, состоит из конической обшивки с одинарной кривизной с радиусом изгиба по передней кромке $25 \div 30$ мм с условно плоской нижней частью и верхней частью по аэродинамическому обводу носка. Обшивка из листа Д16чАТ-1,2 подкреплена приклеенными клеем ВК-25 подкладными листами по стыкам с поясами нервюр и балки. В перпендикулярном к передней образующей обшивка подкреплена внутренним набором – носками нервюр, состоящими из листовых стенок с вырезами, окантованными прессованным уголковым профилем, и поясов из прессованного профиля таврового сечения, соединённых со стенками клёпкой. Обшивка и подкладные листы соединяются с поясами носков нервюр заклёпочным соединением. Сзади, со стороны кессона крыла, носок замыкается балкой, состоящей из листовой стенки и стоек из прессованного профиля.

Испытания отсеков НЧК проводились в соответствии с программами, утверждёнными разработчиком самолёта. При статических испытаниях аэродинамическая нагрузка моделировалась с помощью парусиновых лямок и распределялась по верхней поверхности носка.

Нагружение осуществлялось через рычажную систему с помощью силовозбудителя. Нагрузка контролировалась электродинамометром по прибору типа КСМ (рис. 5). Общий вид монтажа отсека показан на рис.6.

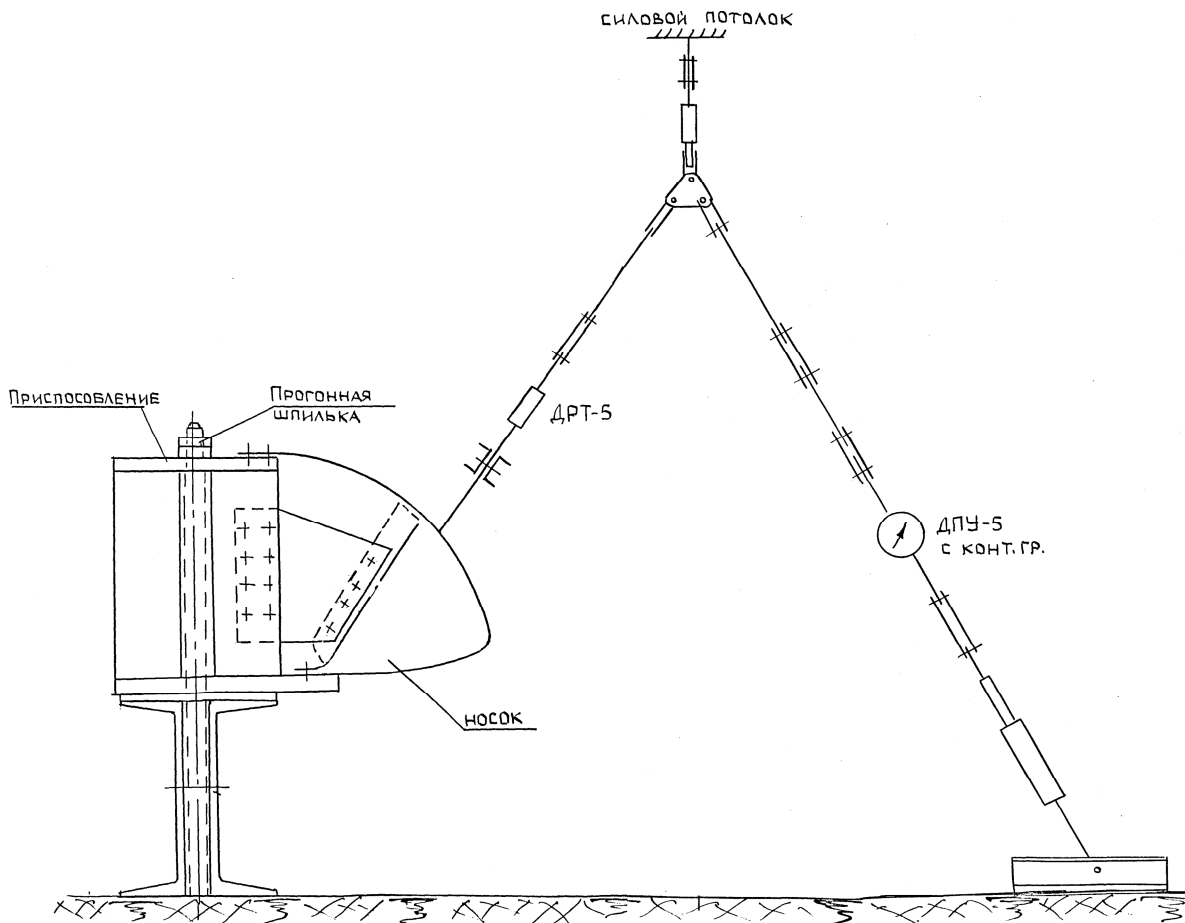


Рис. 5. Схема статических и повторно-статических нагрузжений отсека НЧК

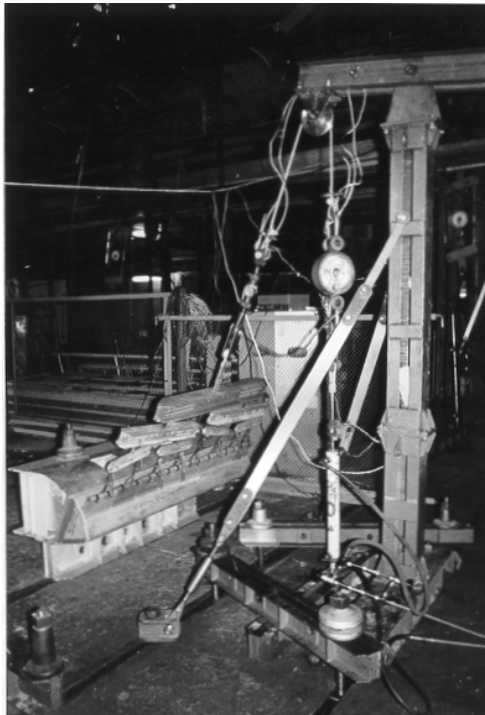


Рис. 6. Статические и повторно-статические испытания отсеков НЧК. Общий вид монтажа

Испытания проводились в два этапа: первый – нагружение до максимальной эксплуатационной нагрузки ($0,67P_p$) с последующим разгрузением и осмотром конструкции, второй – нагружение до расчётной разрушающей нагрузки ($P_p=75,8$ кН). В процессе испытаний осуществлялись замеры напряжений.

При испытаниях серийного отсека носка №1 до $P_p=5,8$ кН разрушений конструкции не произошло. В целях доведения конструкции носка до разрушения в 3 раза увеличена расчётная нагрузка. При повторном нагружении отсека носка №1 ($P_p=17,4$ кН) разрушений не произошло.

Опытный отсек носка №7, изготовленный из Алюр Д16/41 нерастянутой структуры, испытывался на $P_p=17,4$ кН. При испытаниях разрушений не произошло. Конструкции испытанных отсеков представлены в табл.1. Результаты испытаний приведены в табл. 2 - 4.

Таблица 1. Распределение образцов по видам испытаний

№ п/п	Конструкция отсека НЧК	Вид испытания
1	Серийный отсек из Д16	Статические испытания
2		Повторно-статические испытания
3		Повторно-статические и акустические испытания
4		Акустические испытания
5		Акустические испытания
6		Акустические испытания
7	Опытный отсек из Амор Д16/41 нерастянутой структуры	Статические испытания
8		Повторно-статические испытания
9		Акустические испытания
10	Опытный отсек из Амор Д16/41 растянутой структуры	Акустические испытания
11		Статические испытания
12		Повторно-статические испытания
13		Акустические испытания
14		Акустические испытания

Таблица 2. Результаты статических испытаний отсеков

№ отсека носка	Наименование расчетного случая	Расчетная нагрузка, P_p , кН	Статическая прочность, $\%P_p$	Основные результаты испытаний
1	Равномерно распределенное нагружение	5,8	340	Без разрушений
		17,4	344	То же
7	То же	17,4	385	То же
11	То же	17,4	378	Разрушение стойки

Таблица 3. Распределение напряжений в отсеках НЧК при статическом нагружении

№ отсека носка	Схема нагружения	№ роз.	Напряжения в отсеках НЧК, МПа		
			$\sigma_{\max}$	$\sigma_{\min}$	$\tau_{\max}$
1	случай 1	1	3,3	1,3	5
		2	1	-0,1	0,6
	случай 2	1	-44,4	22,9	33,7
		2	4,2	0	2,1
	случай 3	1	-58	32,2	45,1
		2	6	-0,5	3,3
7	случай 2	1	-4,2	-19,7	7,8
		2	2,3	0,7	0,8
	случай 3	1	-3,5	-27,7	12,1
		2	2,9	-0,6	1,2
11	случай 2	1	12,3	-1,3	6,8
		2	2,6	-0,5	1,5
	случай 3	1	18,3	-5	11,7
		2	3,9	-1,2	2,6

ПРИМЕЧАНИЕ: случай 1 – нагружение до 67% при $P_p=5,8$ кН,
 случай 2 – нагружение до 67% при $P_p=17,4$ кН,
 случай 3 – нагружение до 100% при $P_p=17,4$ кН

Таблица 4. Распределение напряжений в отсеках НЧК при статическом нагружении

№ отсека носка	Схема нагружения	Напряжения по поверхности отсеков в зонах датчиков, МПа			
		9	10	11	12
1	случай 1	2,3	4	-3,1	-4,3
	случай 2	6,1	14,2	-14,3	-18,9
	случай 3	8,2	20,5	-21,7	-29,1
7	случай 2	4,6	13,9	-15,8	-18,6
	случай 3	7,5	20,6	-24,6	-28,4
11	случай 2	6,3	17,8	-21,7	-22,3
	случай 3	9,6	25,8	-32,5	-33,8

ПРИМЕЧАНИЕ: случай 1 – нагружение до 67% при $P_p=5,8\text{кН}$,
случай 2 – нагружение до 67% при $P_p=17,4\text{кН}$,
случай 3 – нагружение до 100% при $P_p=17,4\text{кН}$

Анализ напряжений показал, что препарированные зоны конструкции серийных и опытных отсеков мало нагружены применительно к нагрузкам испытаний. В поясах балки напряжения не превосходят по абсолютной величине 35 МПа, а по обшивке 60 МПа (для серийного отсека). При этом наблюдается относительно высокий уровень касательных напряжений в обшивке серийного носка – 45 МПа. Для опытных носков из МПКМ касательные напряжения в 3 раза ниже, чем в серийных.

При повторно-статических испытаниях отсеков носка НЧК было проверено 4 носка. На выносливость испытывались серийные

отсеки носка №2, 3 и опытные отсеки носка №8 из Алор Д16/41 нерастянутой структуры, №12 – растянутой структуры.

После наработки 100 тыс. циклов в конструкции носка №2 разрушения не произошло. С целью доведения конструкции до разрушения, нагрузка была увеличена в 3 раза и все остальные отсеки испытывались при максимальной нагрузке цикла $P=8,7\text{кН}$. После наработки 150 тыс. циклов испытания прекращены. В конструкции отсеков носка №2, 3, 8, 12 разрушений не произошло, микротрещины не отмечены. Результаты испытаний приведены в табл. 5.

Таблица 5. Результаты повторно-статических испытаний отсеков НЧК

№ отсека носка	Наименование расчетного случая	Нагрузка при испытаниях P_y , кН	Число программных циклов до разрушения	Основные результаты испытаний
2	Равномерно распределенное нагружение	2,9	100000	Без разрушений
		8,7	150000	Без разрушений
3		8,7	150000	Без разрушений
8		8,7	150000	Без разрушений
12		8,7	150000	Без разрушений

Из анализа результатов испытаний следует, что запас прочности во всех вариантах отсеков НЧК значительно превышает расчётные параметры и данный вид нагружения не является критичным для конструкций в составе крыла Ан-124-100. Кроме того, из этих испытаний видно, что конструкции отсеков перетяжелены в статическом отношении.

Акустические испытания отсеков проводились с целью сравнительной оценки усталостной долговечности опытных носков крыла из МПКМ с серийными фрагментами. Испытания отсеков проводились в реверберационной камере (РК). Отсек вывешивался на амортизаторах перед рупором модулятора воздушного потока (МВП). Схема установки отсека в РК показана на рис. 7.



а



б

Рис. 7. Установка отсека в реверберационной камере: а – вид спереди, б – вид на стенку балки

Контроль за уровнем и спектром акустической нагрузки проводился в центре отсека носка со стороны обшивки микрофоном типа 4136 фирмы «Брюль и Кьер». Для звукоизоляции внутреннего объема отсеков при акустическом нагружении отверстия в стенке балки закрывались толстыми поролоновыми заглушками. При снятии амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) за отсеком ставилась демфирующая стенка. Для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) отсеки препарировались тензодатчиками (рис. 8).

Испытания показали, что наиболее нагруженной является нижняя поверхность отсека в клетках между нервюрами. Резко отличается форма АЧХ для исходного варианта от отсека, выполненного с применением Алора Д16/41. Так, если для исходного отсека №4 в полёте между нервюрами 95 и 96 шп. максимальные напряжения в датчике №2 достигают 20,7 МПа на частоте 212 Гц, то в отсеках №9 максимальные напряжения возникают при резонансных частотах 232 Гц и 695 Гц, достигая 9,8 и 11,6 МПа, соответственно. В отсеке №13, выполненном из композиционного материала с растянутой при полимеризации структурой, максимальные

резонансные пики наблюдаются на частотах 252 и 760 Гц, причём напряжения на этих частотах достигают значений 6,1 и 17,7 МПа, соответственно. Тензодатчики на панелях №4, 9, 13, расположенные между нервюрами 98-99 и 94-95, показывают более сложную зависимость напряжений от частоты возбуждения. Так, если для исходного отсека максимальные напряжения возбуждаются на частотах 540 и 322 Гц (вторая группа резонансов), то для отсеков, выполненных с использованием Алора Д16/41, максимальные напряжения возникают в первой группе резонансных частот. С ростом частоты возбуждения уровень напряжений снижается. Кроме того, датчики №3, установленные в полёте между шпангоутами 98-9 на отсеках, выполненных с применением Алора Д16/41, показывают более высокие напряжения в первой группе резонансных частот, чем на исходном отсеке.

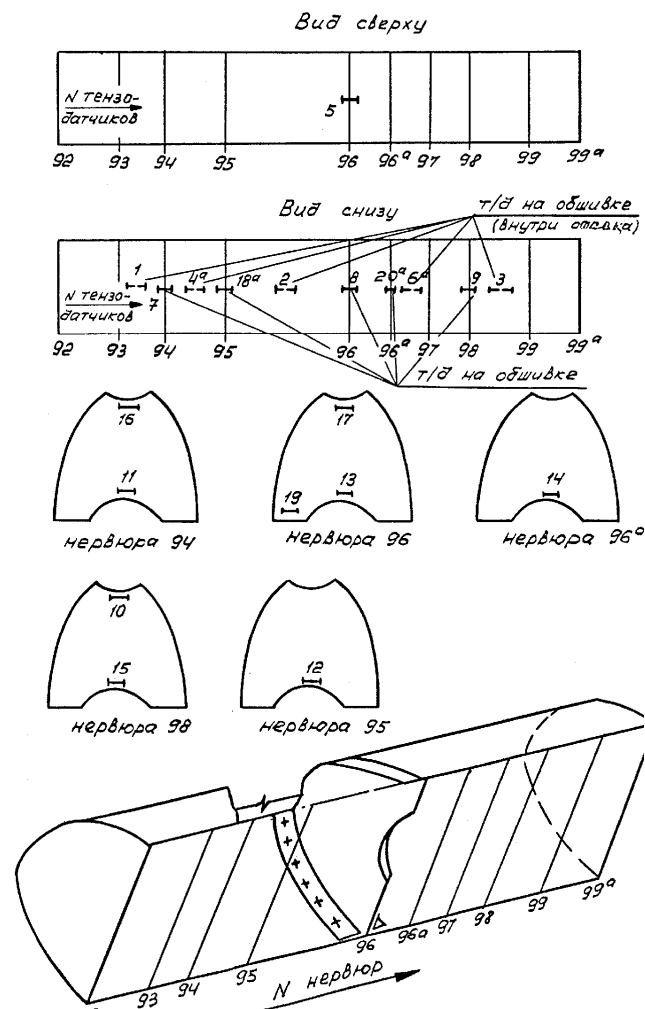


Рис. 8. Схемы установки тензодатчиков

Датчики, установленные на стенках нервюр, на всех вариантах отсеков показывают максимальные напряжения в первой группе резонансных пиков. Напряжения в отсеках, выполненных с применением Алора Д16/41, выше, чем в отсеках исходного варианта.

Акустические испытания серийного фрагмента №4 проводились на широкополосном спектре в полосе 63÷1000 Гц с сум-

марным уровнем 156 дБ. Первоначальная длительность испытания составила 203 часа. С целью форсирования испытаний суммарный уровень нагрузки увеличили на 6дБ при неизменной форме спектра. Ресурсные испытания всех остальных фрагментов, как серийных, так и опытных, проводились при суммарном уровне акустических нагрузок 162 дБ. Результаты по продолжительности испытаний приведены в табл. 6.

Таблица 6. Результаты испытаний отсеков НЧК

Тип и № отсека	Уровень акустических нагрузок, дБ	Максимальные СКЗ напряжений, МПа	Время до появления разрушений, ч.	Характер разрушений	Общая наработка, ч	Примечание
1	2	3	4	5	6	7
4	156дБ в полосе 80÷1000Гц	В обшивке—16,9 В стенке нервюры 5,9	583	Разрушений нет	203	Согласно ТР от 18.12.89 испытания продолжены на режим 162 дБ
	162дБ в полосе 80÷1000Гц	В обшивке—22,6 В стенке нервюры 11,4		Трещины в обшивке и в стенке нервюры №93	757	Время наработки приведено к режиму нагружения 156дБ
5	162дБ в полосе 80÷1000Гц	В обшивке—19	536	Трещина в стенке нервюры №96	882	Время наработки приведено к режиму нагружения 156 дБ
		В стенке нервюры - 15,2	882	Разрушение обшивки и стенки нервюры №95		
6	162дБ в полосе 80÷1000Гц	В обшивке—25,9	410	Трещина в стенке нервюры №93	961	Время наработки приведено к режиму нагружения 156 дБ
		В стенке нервюры—14,9	961	Разрушение стенки нервюр 93, 96, 96а		
3	162дБ в полосе 80÷1000Гц	В обшивке—22,4	63	Трещина в стенке нервюры 93	457	Отсек после повторно-статических испытаний. Время наработки приведено к режиму нагружения 156 дБ
		В стенке нервюры—17,3	457	Разрушение стенки нервюры 93		
		В стенке нервюры—10,5	1781	Критическая трещина в обшивке вдоль нервюр 96а, 97		
8	162дБ в полосе 80÷1000Гц	В обшивке—28,7	1292	Трещина в обшивке	1781	Отсек после повторно-статических испытаний. Время наработки приведено к режиму нагружения 156 дБ

Окончание табл. 6

1	2	3	4	5	6	7
9	162дБ в полосе 80÷1000Гц	В обшивке—26,8	489	Разрушение 2-х заклепок в районе крепления обшивки к нервюрам №94, 95	1261	Время наработки приведено к режиму нагружения 156 дБ
		В стенке нервюры—16,1	1261	Критические трещины в обшивке в районе нервюр 94, 95, 99		
10	162дБ в полосе 80÷1000Гц	В обшивке—25,5	2330	Трещина в обшивке вдоль нервюры 96а	2853	Время наработки приведено к режиму нагружения 156 дБ
		В стенке нервюры—9,3	2712	Критические трещины в обшивке вдоль нервюр 96а, 95, 94, 93		
13	162дБ в полосе 80÷1000Гц	В обшивке—22,1 В стенке нервюры—14,1	2550	Трещины в уголке крепления обшивки к нервюре 94	3860	Время наработки приведено к режиму нагружения 156 дБ
14	162дБ в полосе 80÷1000Гц	В обшивке—27,9	1420	Разрушение заклепки в районе крепления обшивки к нервюре	1720	
		В стенке нервюры—16,6	1720	Разрушение заклепок и трещина в районе крепления обшивки к нервюре 97		

Контроль целостности конструкции отсеков проводился через каждый час наработки, а также перед началом и в конце испытаний.

Характерные разрушения элементов отсеков представлены на рис. 9 - 11.

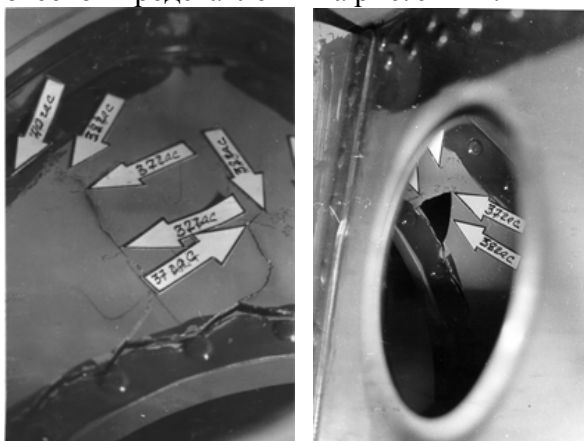


Рис 9. Характер разрушения от акустических нагрузок стенки нервюры из алюминиевого сплава Д16чАТ 1,2.

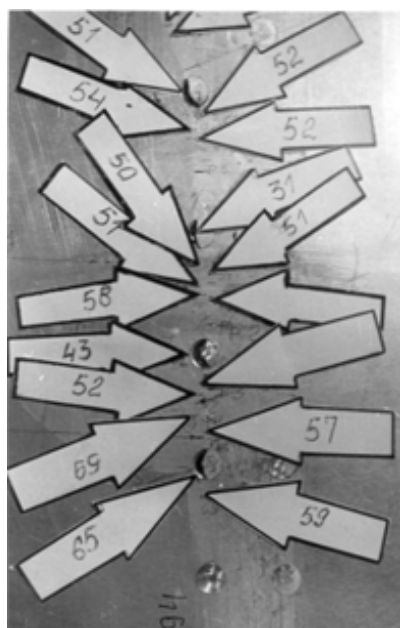


Рис.10. Разрушение клеезаклепочного шва обшивки из Алюр Д16/41 толщиной 1,3мм нерастянутой структуры по низу нервюры при акустических испытаниях

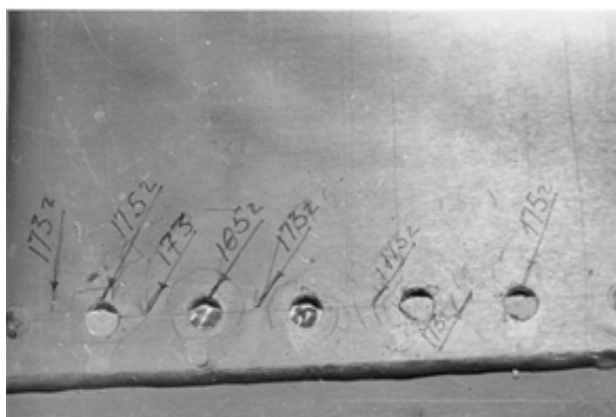


Рис. 11. Разрушение заклёпок и микротрещины обшивки из Алюр Д16/41 толщиной 1,3мм растянутой структуры

Таким образом, проведённые испытания показали, что ресурс отсеков из Алюр Д16/41 по сравнению с отсеком из Д16 выше примерно в 4 раза. В процессе акустических испытаний в отсеках серийного варианта наблюдались разрушения стенок нервюр и обшивки на нижней поверхности, а в отсеках из МПКМ проходило разрушение заклёпок и обшивки, было установлено преимущество отсеков из МПКМ в 20-27 раз по сравнению с алюминиевыми при комплексной нагрузке (повторная статика и последующая акустика).

Таблица 7. Сравнительные результаты испытаний отсеков НЧК

Материал отсека	Условия испытания	Время, ч	
		До появления разрушения	До конца разрушения
Д16чАТ	Акустические нагрузки 162 дБ в полосе частот 80÷1000 Гц	510	867
Алюр Д16/41		2550	3350
Д16чАТ	Повторная статика трехкратной расчетной нагрузки 150000 циклов с последующей акустической нагрузкой 162 дБ в полосе частот 80-1000Гц	63	457
Алюр Д16/41		1580	1843

Акустические испытания (табл. 7) показали, что по ресурсу преимущество отсеков из МПКМ для нерастянутой структуры и отсеков из МПКМ растянутой структуры по сравнению с отсеками из Д16 составляет соответственно в 1,5 и 4 раза. Это подтверждает вывод о целесообразности применения МПКМ обеих структур в зависимости от требуемого для данной конструкции агрегата общего ресурса с целью обеспечения ресурсности всех сборочных единиц, входящих в агрегат.

Библиографический список

1. Постнова, М.В. Металлополимерные композиционные материалы в авиастроении [Текст] / М.В. Постнова, И.А. Казаков // Прогрессивные технологии, материалы и кон-

струкции: Сб. научн. тр. – Ульяновск: 1999. – С. 119-124.

2. Постнова, М.В. МПКМ - новый класс материалов для виброакустически нагруженных конструкций [Текст] / М.В. Постнова // Прогрессивные методы и технологии получения и обработки конструкционных материалов и покрытий: сб. междунар. традиционной науч.-техн. конф. – Волгоград: 1999. – С. 142-143.

3. Постнов, В.И. Исследование влияния напряженно-деформированного состояния на усталостные характеристики МПКМ [Текст] / В.И. Постнов, О.Ю. Арлашкина // Новые перспективные материалы и технологии их получения: сб. научн. тр. – Волгоград: 2010. – С. 183-185.

RESEARCH VIBRATIONAL FATIGUE PROPERTIES OF FORWARD WINGS BAY MPKM

© 2012 V. I. Postnov¹, M. V. Postnova², O. Yu. Mantusova¹

¹Ulyanovsk Science & Technology Center VIAM

²Institute of Aviation Technology and Management of Ulyanovsk State Technical University

The results of static and acoustic investigations of aircraft structures made of metal-grade materials Alor D16/41 and their comparison with serial structures of aluminum alloy.

Metal-polymer composite materials, static tests, acoustic tests.

Информация об авторах

Постнов Вячеслав Иванович, доктор технических наук, заместитель начальника, Ульяновский научно-технологический центр Всероссийского института авиационных материалов. E-mail: untcviam@viam.ru. Область научных интересов: композиционные материалы.

Постнова Мария Вячеславовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Самолетостроение» Института авиационных технологий и управления, Ульяновский государственный технический университет. Область научных интересов: композиционные материалы.

Мантусова Ольга Юрьевна, инженер-технолог, Ульяновский научно-технологический центр Всероссийского института авиационных материалов. E-mail: untcviam@viam.ru. Область научных интересов: композиционные материалы.

Postnov Vyacheslav Ivanovich, doctor of technical sciences, deputy chief of the Ulyanovsk Science & Technology Center VIAM. E-mail: untcviam@viam.ru. Area of research: Polymer composites.

Postnova Maria Vyacheslavovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of "Aircraft", Institute of Aviation Technology and Management of Ulyanovsk State Technical University. Area of research: Polymer composites.

Mantusova Olga Yurievna, a graduate student, engineer of Ulyanovsk Science & Technology Center VIAM. E-mail: untcviam@viam.ru. Area of research: Polymer composites.