

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА УРОВЕНЬ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МПКМ ОБШИВОК РЕВЕРСА Д18Т

© 2011 О. Ю. Арлашкина<sup>1</sup>, В. И. Постнов<sup>1</sup>, М. В. Постнова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ульяновский научно-технологический центр  
филиал Всероссийского института авиационных материалов, г. Ульяновск  
<sup>2</sup> Институт авиационных технологий и управления УлГТУ, г. Ульяновск

В статье приведены результаты исследований влияния технологических факторов на уровень остаточных напряжений в МПКМ обшивок реверса Д18Т. Установлено, что формование листов Алор Д16/41 с различным усилием натяжения слоев органопластика приводит к изменению уровня остаточных напряжений в алюминиевых и композитных слоях.

*Остаточные напряжения, ресурс, корпус реверса, усталостная прочность.*

Ресурс внутренних обшивок из Д16чАТ подвижного корпуса реверса в 4-5 раз меньше планируемого межремонтного ресурса двигателя Д18Т и в 10-20 раз меньше полного ресурса двигателя, применяемого на самолетах Ан-124, Ан-225. Для повышения ресурса данных обшивок необходимо применение материалов с высокими виброусталостными свойствами типа металлополимерных композиционных материалов (Алор Д16/41 или Сиал). Однако как показали исследования при формовании этих материалов без дополнительных технологических операций, в металлических слоях возникают растягивающие остаточные напряжения, которые приводят к преждевременному 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 необходимого уровня сжимающих, а в слоях органопластика - растягивающих остаточных напряжений.

Задача настоящей работы заключалась в исследовании влияния технологических факторов в процессе изготовления материала и деформирования его в конструкционные элементы на уровень остаточных напряжений в МПКМ (типа Алор) обшивок реверса Д18Т.

Имеется ряд методов оценки уровня остаточных напряжений:

– метод одностороннего травления (метод Летнера) с тензометрированием, предусматривает разрушение образца;

– метод рентгеноструктурного анализа напряжений, основанный на изучении дифракционной стоячей волны большой интенсивности при различных углах падения рентгеновских лучей на поверхность металла.

Данный метод является неразрушающим и служит для оценки напряжений в поверхностном слое металла. Изменение угла дифракции рентгеновских лучей определяется условием Вульфа-Брегга [1]:

$$2 \cdot d \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda, \quad (1)$$

где  $d$  - межплоскостное расстояние в кристалле напряженного образца, мкм;

$\theta$  - угол дифракции, град;

$n$  - порядок отражения, отн.;

$\lambda$  - длина волны падающего излучения, нм.

Изменение параметра кристаллической решетки  $d$  показывает на наличие остаточных напряжений в поверхностном слое металла.

Сумма главных напряжений, действующих на поверхности образца, приводит к возникновению деформации в этой поверхности, которая определяется путём измерения межплоскостного расстояния  $d$  для отражающих плоскостей, нормаль к которым совпадает с нормалью к поверхности. При этом необходимо знать равновесное значение

$d_0$  для ненапряженного образца [2], что неприемлемо для уже отформованных образцов МПКМ. Поэтому был выбран  $\sin^2\psi$  - метод, исключаяющий исследование ненапряженного образца. Метод [1] заключается в изменении угловых положений дифракционного профиля, соответствующих съёмкам при ряде значений угла  $\psi$  между нормалью к отражающим атомным плоскостям. Величина напряжения в данном азимутальном направлении  $\varphi$  на поверхности образца вычисляется по формуле [3]

$$\sigma_\varphi = -\frac{E}{1+\mu} \cdot \text{ctg}\theta_0 \cdot \frac{\Delta\theta}{\Delta(\sin^2\psi)}, \quad (2)$$

где  $E$  - модуль Юнга, МПа;

$\mu$  - коэффициент Пуассона, отн.;

$\theta_0$  - максимальный угол дифракции,

при котором линейная дифракция совпадает с фоном, град;

$\psi$  - угол между нормалью к плоскости образца и нормалью к отражающим плоскостям, град;

$\frac{\Delta\theta}{\Delta(\sin^2\psi)}$  - тангенс угла наклона экспериментально определяемой зависимости

$\theta = f(\sin^2\psi)$ , которая при условии однородности напряжённого состояния является линейной.

Построение вышеприведенной экспериментальной зависимости сводится к определению центра тяжести дифракционной кривой, соответствующей повороту образца на угол  $\psi$ . Последовательность расчета остаточных напряжений рассмотрена на примере расчёта  $\sigma_2$ . На рис. 1 приведены диаграммы дифракционных линий материала Алюр Д16/41.

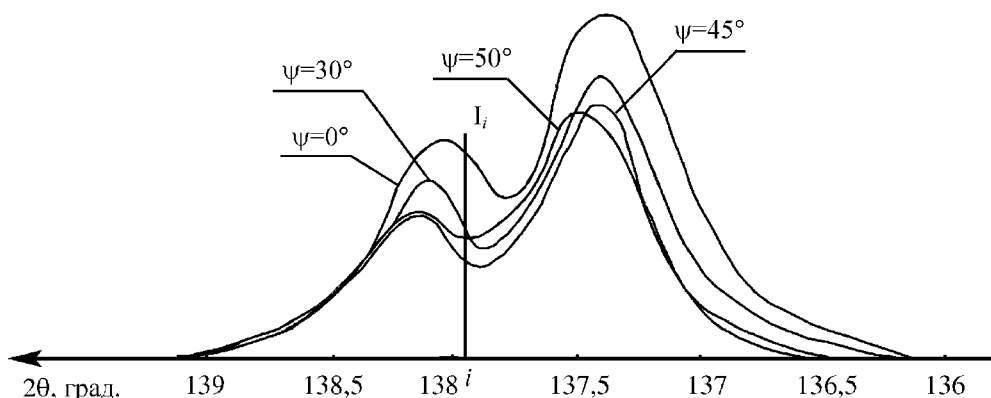


Рис. 1. Диаграммы дифракционных линий при различных значениях угла  $\psi$

Значение угла дифракции принималось равным центру тяжести соответствующей кривой, нахождение которого общеизвестно.

Кривая разбивалась на  $n$  отрезков с шагом  $\Delta\theta=0,2^\circ$ , которым присваивался порядковый номер начиная с угла  $2\theta_0$ , соответствующего точке перехода от фона к дифракционной линии. Измерялись все интенсивности  $I_i$ , соответствующие  $i$ -му отрезку. Тогда координаты центра тяжести кривой равны:

$$2\theta = 2\theta_0 + \frac{\sum_1^n I_i \cdot i}{\sum_1^n I_i} \Delta\theta. \quad (3)$$

На основании полученных данных построена зависимость приращения угла дифракции от  $\sin^2\psi$  (рис. 2).

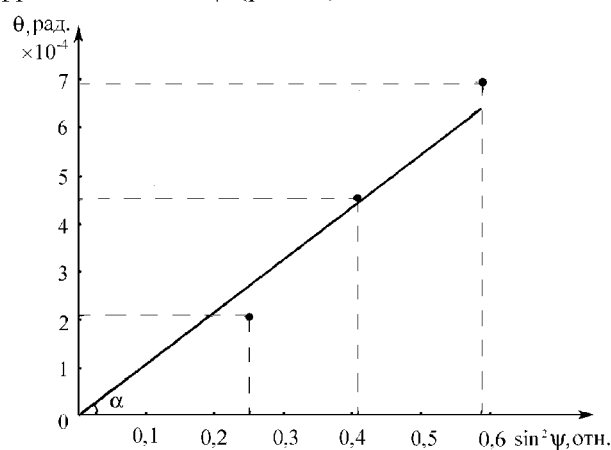


Рис. 2. Зависимость приращения угла дифракции от  $\sin^2\psi$

По тангенсу угла наклона прямой  $\operatorname{tg}\alpha=10,8 \cdot 10^{-4}$  (рис.2) напряжение в образце в направлении поперёк прокатки рассчитывалось по формуле (2):

$$\sigma_2 = -\frac{E}{1+\mu} \cdot \operatorname{ctg}\theta_0 \cdot \operatorname{tg}\alpha = -21,1 \text{ МПа.}$$

Для создания внутренних остаточных напряжений в слоях металлополимера выбрана следующая технологическая схема. Готовый лист МПКМ, отформованный в автоклаве в пакете из 10 листов, растягивается на прессе PQ-3М (рис. 3). Особенностью растяжки отверждённых листов является перераспределение остаточных термических напряжений в готовом листе Алора путем его растяжения до уровня деформаций, превышающих предел текучести алюминиевого листа. Так как при этом слои органопластика деформируются упруго, то после разгрузки в них остаются растягивающие, а в металлических листах сжимающие напряжения. Операция предварительного растяжения может быть самостоятельной, проводимой после формования композита в виде плоского листа, либо совмещаться с процессом обтяжки деталей (например, оболочек) на машиностроительных заводах. Предельная общая деформация при растяжке обычно не превышает 1,5-2,0% и зависит от структуры и свойств слоев металлоорганопластика и конкретного построения технологического процесса изготовления детали. Следует отметить, что технология растяжки является отработанным и обязательным процессом на металлургических заводах для снятия закалочных напряжений в алюминиевых листах и других полуфабрикатах.

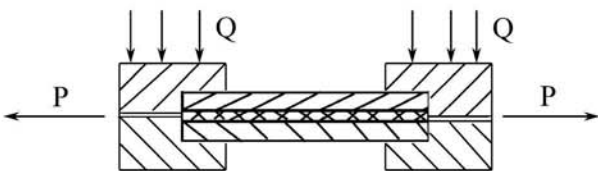


Рис. 3. Схема растяжения отвержденных листов Алора

К достоинствам этой схемы следует отнести:

–достаточную простоту, так как не требуется создание дополнительного оборудования или оснастки;

–возможность визуально контролировать задаваемую деформацию;

–необходимую точность (0,1÷0,15%) относительной деформации.

Недостатки данной схемы:

–задание деформации и напряжений только в одном направлении;

–необходимость создания специальных зажимов при растяжении металлополимерного листа с пятью и более слоями;

–обрезка той части листа, которая находилась в зажимах, и зоны выравнивания деформаций (250÷300 мм с каждого торца листа);

–ограничение габаритов листа по длине и ширине, вызванное возможностями растяжно-обтяжного оборудования.

При заданном уровне внутренних напряжений по приведенной схеме следует учитывать следующее:

–металл Д16чАТ, который входит в состав Алор Д16/41, находится в естественно состаренном состоянии и не может быть подвержен деформации свыше 2%, кроме отдельно оговоренных случаев;

–анодное покрытие имеет также ограничение по деформациям не более 1,5÷2%;

–клеевую матрицу не следует деформировать свыше 2% из-за снижения сдвиговых характеристик на границе металл-клей;

–нагружение нитей органоткани усилием 500÷750 МПа (соответствует около 1% деформации ткани) при температуре  $T=125^{\circ}\text{C}$  положительно сказывается на долговечности пластика.

Учитывая вышесказанное, принято решение, что первоначальная деформация листа МПКМ не должна превышать 1%.

Геометрические формы обшивок определяют расчетный коэффициент обтяжки 1,04 (удлинение при обтяжке в среднем 4%), что около двух раз превышает допустимый коэффициент обтяжки для материала Алор Д16/41. При изготовлении обшивок обтяжкой деформации снижаются за счет следующего:

–уменьшения неравномерности деформаций от действия сил трения, нарастающих от торца пуансона к его верхней точке;

–уменьшения калибрующей деформации для фиксации формы после обтяжки на максимальный угол;

–уменьшения суммарных деформаций за счет применения доводки лепестков детали ударным нагружением эластичным инструментом после обрезки по контуру.

Дополнительно фактор неравномерности деформации уменьшался за счет придания заготовке специальной формы в плане, где каждое поперечное сечение уменьшалось соответственно накопленному на данном угле изгиба усилию трения по формуле

$$B_i = B_0 / e^{\mu \alpha_i}, \quad (4)$$

где  $B_i$  – ширина заготовки на угле  $\alpha_i$ , считая от нижней точки пуансона, где заготовка контактирует с ним,  $\alpha_0=0^\circ$ ;

$B_0$  – ширина заготовки у зажимов обтяжного пресса, мм;

$e$  – основание натурального логарифма;

$\alpha_i$  – текущий угол охвата пуансона заготовкой от вершины до торцов, радиан.

Для упрощения расчетов ему придавались значения по табл. 1, в которой даны соответствующие значения ширины заготовки.

Таблица 1. Значения параметров заготовки

Угол $\alpha$ охвата пуансона, рад.	Ширина заготовки $B$ , мм	Эскиз детали в конце обтяжки. Форма симметрична для правой и левой ветви.
0	$\pi/3$	
750	695	
$\pi/6$	$\pi/2$	
720	670	

Перед обтяжкой делалась развёртка детали по шаблону обрезки детали с припуском на сборку, размечались сечения, соответствующие указанным в таблице углам, точки соединялись плавной кривой. С этого контура снимался шаблон заготовки.

Для контроля локальных деформаций на заготовку наносились в долевом направлении по наибольшему сечению базовые риски с базой 400 мм. Погрешность измерения базы соответствует точности изменения относительной деформации  $\Delta = 0,125\%$ .

Процесс обтяжки обшивки реверса производился на прессе PQ-3М. Изготовлено по 3 образца разных типоразмеров. Заготовки полимеризованного Алора имели габариты 2000×200 и 2000×150 мм, что при радиусах обтяжного пуансона – продольном около 1000 мм и поперечном около 800 мм из замеров длин между зажимами пресса  $l_{min}$  и  $l_{max}$  рулеткой – соответствовало расчетным коэффициентам обтяжки 1,025 и 1,02 (относительное среднее удлинение 2,5% и 2%).

Гибка-прокатка с последующей доводкой предварительно обрезанной детали с припусками 20 мм кругом по контуру вырезов под створки реверса показала, что ввиду малой жесткости лепестков обшивки реверса и благоприятных сочетаний значений радиусов  $R$  образующей удается при доводке резиновым вальком добиться полного прилегания контура детали к поверхности формообразования пуансона. Усилие прижима при этом не превышает 50Н.

Для определения реального уровня остаточных напряжений в обшивках реверса из Алор Д16/41 проводились исследования с помощью рентгеноструктурного анализа на дифрактометре Дрон-3 (табл. 2). В образцах №2, 3, 7 исходный материал подвергался предварительному серноокислому анодированию, а в образцах №4, 5, 6 - хромовому анодированию.

Подготовка для исследования остаточных напряжений в образцах проводилась в четыре этапа:

1. Исследовались все образцы с нетро-нутым исходным анодным слоем.
2. В образцах №2, 4, 6, 7 снимался с помощью травления в щёлочи верхний (анодный) слой толщиной 0,02 мм. Образец №3 на данном этапе подвергался шлифовке.
3. Место исследования в образцах №3 и 7 стравливалось на глубину 0,3 мм.

4. Место исследования в образцах №3 и 7 стравливалось на глубину 0,5 мм.
- Результаты исследования остаточных напряжений на поверхности металлического слоя МПКМ и при послойном стравливании приведены в табл. 2.

Таблица 2. Расчетные значения остаточных напряжений

Глубина трав-ления, мм	0		0,02		0,3		0,5		Примечания
	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	
№ образца									
1	-60,0	-43,0	-	-	-	-	-	-	Д16 лист
2	-5,9	-60,1	-19,6	-28,7	-	-	-	-	3-слойн. МПКМ
3	-66,6	-64,7	-66,9	-54,9	+13,7	+18,6	+23,5	+22,5	5-слойн. МПКМ
4	15,7	-45,1	-19,6	-18,1	-	-	-	-	3-слойн. МПКМ
5	-25,4	-21,1	-	-	-	-	-	-	3-слойн. МПКМ
6	-23,5	-65,3	-24,5	-32,7	-	-	-	-	3-слойн. МПКМ
7	-38,2	-27,4	-32,6	-26,1	+18,6	+13,7	+21,2	+29,4	8-слойн. МПКМ

Анализ полученных результатов пока-зал, что внутри металлического слоя есть растягивающие и сжимающие остаточные напряжения. В образце №6 определение ос-таточных напряжений проводилось методом одностороннего стравливания. Изгиб образца в сторону исследуемого слоя показывает на-личие в нем результирующего растягиваю-щего напряжения. Таким образом, сжимаю-щие напряжения в МПКМ существуют только вблизи поверхности образца, что хо-рошо согласуется с данными для поверхно-стно упрочнённых материалов [2] и является характерным для исходного материала (обра-

зец №1). Появление сжимающих остаточных напряжений в исходном материале происход-ит, вероятно, в результате закалки и про-катки листов Д16.

Исследование остаточных напряжений в образцах из МПКМ с растянутой и нерас-тянутой структурой, а также образца из ис-ходного материала Д16чАТВ, листы которо-го использовались при формовании МПКМ, позволило установить, что распределение остаточных напряжений в слоях на поверх-ности и внутри образцов представлено на графиках (рис.4,5,6).

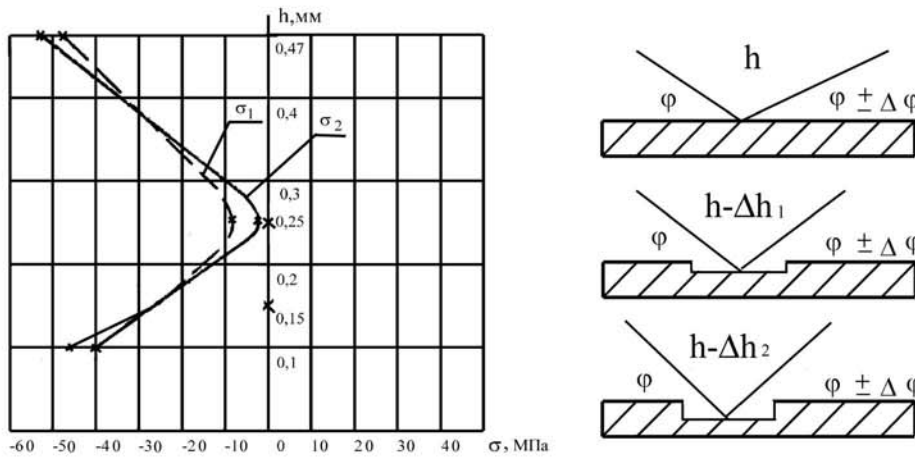


Рис.4. Распределение внутренних остаточных напряжений по толщине листа Д16чАТВ:  $h$  – толщина листа Д16чАТВ 0,5 мм;  $\sigma_1$  – в направлении проката;  $\sigma_2$  – поперёк проката

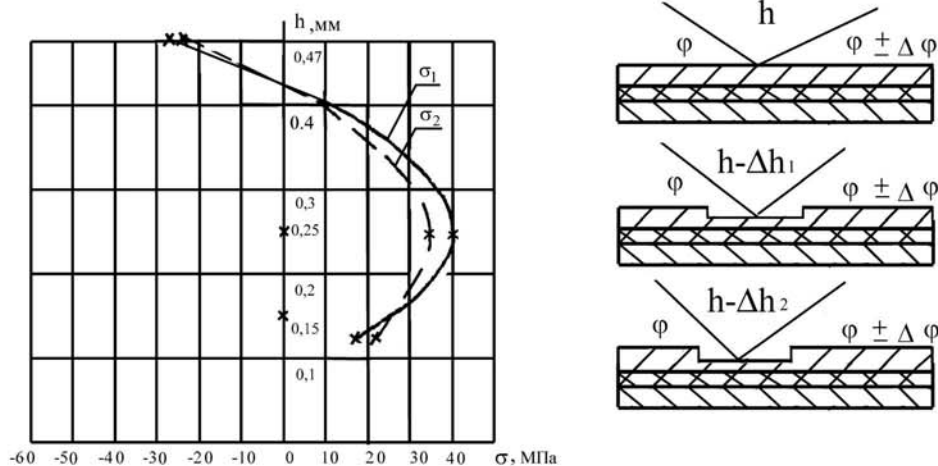


Рис. 5. Распределение внутренних остаточных напряжений по толщине листа Д16чАТВ в материале Алор Д16/41 с нерастянутой структурой органика:  $\sigma_1$  – направлении проката;  $\sigma_2$  – поперёк проката

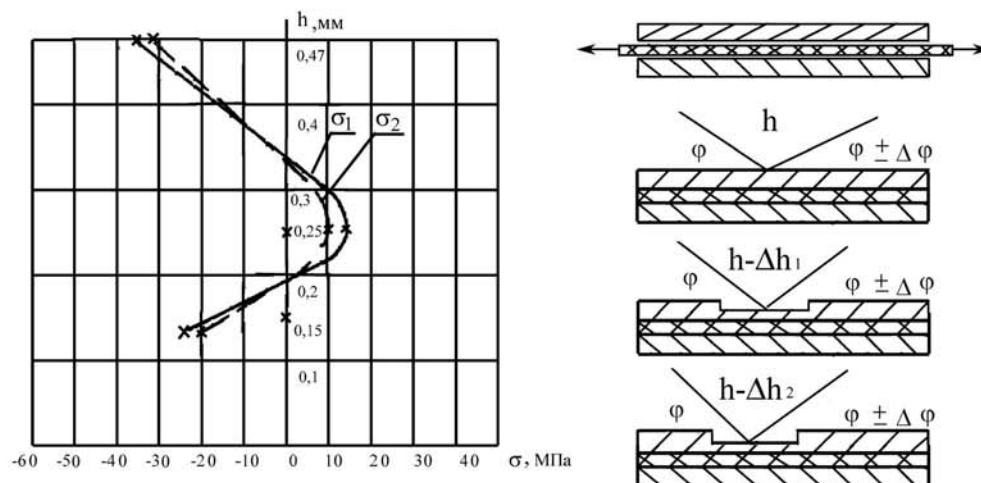


Рис. 6. Распределение внутренних остаточных напряжений по толщине листа Д16чАТВ в материале Алор Д16/41 с растянутой на 25% от разрушающей деформации структурой органика:  $\sigma_1$  – в направлении проката;  $\sigma_2$  – поперёк проката

Исследования остаточных внутренних напряжений показали различия их уровня и распределения по толщине слоев Д16 с тенденцией сдвига в область сжимающих от исходного листа к растянутой структуре. Наличие остаточных напряжений в слоях Алора и приблизительный их уровень можно наглядно увидеть, если сравнить поверхностный слой алюминия (рис.7).

Изготовление крупногабаритных листов Алор Д16/41 2220×600 мм производилось в автоклаве «Шольц». После контроля непрочлеев листы подвергались растяжению в обтяжном прессе до 2% с остаточной деформацией 1%.

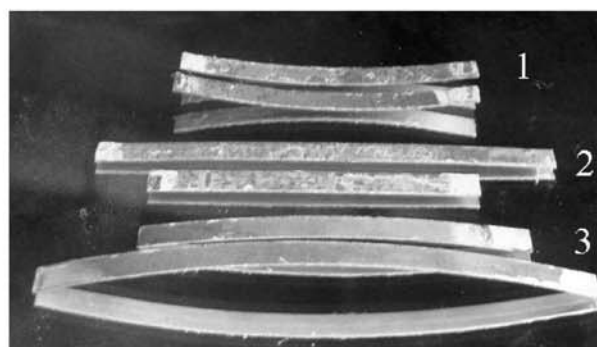


Рис. 7. Образцы Алор Д16/41 после травления слоя Д16чАТВ: 1 – Алор Д16/41 без натяжения СВМ, 2 – Алор Д16/41 с минимальным растяжением СВМ, 3 – Алор Д16/41 с максимальным растяжением СВМ

Исследования прочностных характеристик проводились на машине «Инстрон-1185», а усталостные – на машине «EUS» с усилием 20 тонн, при частоте  $\nu=5,7$  Гц,  $\sigma_{\min}=8\div 10$  МПа,  $\sigma_{\max}=150$  МПа. При исходных свойствах листов Д16чАТ  $\sigma_b=460$  МПа и пределе текучести  $\sigma_{0,2}=310$  МПа механические свойства Алор Д16/41 при вакуум-автоклавном формовании находятся в пределах  $\sigma_b=490,5$  МПа,  $\sigma_{0,2}=299$  МПа,  $\tau_{сдв}=18,784$  МПа. Результаты исследования свидетельствуют о том, что в материалах листов Алор Д16/41, изготовленных по различным технологическим схемам, нет явного преимущества одного из вариантов.

Дополнительно исследовались виброусталостные свойства Алора Д16/4. Исследование влияния растяжения волокон наполнителя на упруго-демпфирующие свойства Алор Д16/41 проводилось на образцах в виде стержней постоянного поперечного сечения  $L \times B \times h=150 \times 20 \times 1,3$  мм. Образцы вырезались вдоль основы ткани СВМ и по утку листов 2н, 2т, 3н, 3т, т. е. в исходном состоянии (н) и с предварительным деформированием волокон (т) до 1% в направлениях основы и утка. Образцы закреплялись на струнах в узловых линиях первой формы изгибных колебаний. Определение усталостных свойств также проводилось на стержнях при их колебаниях по этой же форме колебаний.

Для образцов, вырезанных по основе, определен ограниченный предел выносливости на базе  $N=10^6$  циклов. Он составил  $\varepsilon_1=260 \cdot 10^{-5}$ . Минимальное значение  $\varepsilon_1=235 \cdot 10^{-5}$  наблюдается для варианта (2н). Резонансная частота образцов в процессе испытаний до момента начала разрушения практически осталась постоянной, а затем резко упала. Разрушение образцов проявляется в виде магистральной трещины в алюминии (в середине образца по длине) с одной или с двух сторон образцов. У части образцов трещина смещена на 5-10 мм от середины образца (по длине). Ограниченные пределы выносливости на базе  $N=10^6$  циклов для всех вариантов изготовления находятся в диапазоне от 169 до 187 МПа.

Из анализа результатов динамических испытаний необходимо отметить, что Алор Д16/41 с предварительным деформировани-

ем имеет более стабильную усталостную прочность.

Полученные результаты были использованы на носке крыла Ан-124-100 и испытания на малоцикловую усталость, проведенные на партии нерастянутого Алора, показали, что МЦУ при частоте  $5\div 7$  Гц и напряжениях 160 МПа –  $60\div 80 \cdot 10^3$  циклов, для растянутой структуры вакуум-автоклавного формования – в пределах  $90\div 110 \cdot 10^3$  циклов, что не уступает паспортизированной структуре.

Как известно, при уменьшении уровней остаточных растягивающих напряжений или с увеличением уровня остаточных сжимающих напряжений до  $20\div 40$  МПа усталостные характеристики при растягивающих нагрузках растут. Таким образом, предварительное деформирование листов Алор Д16/41 приводит к перераспределению остаточных напряжений и может быть рекомендовано для изготовления заготовок обшивки реверса с коэффициентом обтяжки до  $1,01\div 1,02$  методами обтяжки с растяжением.

По отработке технологии обтяжки сделаны выводы:

- обтяжка возможна без придания заготовке специальной формы;

- при удовлетворительной точности формы прилегания к пуансону деформации растяжения у торцов пуансона (угол  $\alpha=15^\circ$ ) составили  $1,13\div 1,20\%$ , на вершине –  $1,0\%$ , что показывает их допустимость при существующей точности контроля ( $0,125\%$ );

- при обрыве заготовки у зажима необходимо учитывать припуски для пережима;

- контроль расслоений заготовки показал, что после деформирования при обрыве от удара и ударной доводки контура обшивки расслоений в ней не происходит;

- примерка обшивки по стапелю сборки подвижного корпуса и образцовой детали показала удовлетворительную точность детали.

Отработка технологических процессов обтяжки с доводкой и гибки-прокатки с доводкой показала возможность изготовления внутренних обшивок подвижного корпуса реверса из Алор Д16/41 с деформациями, не превышающими допустимые – 2% (рис. 8).



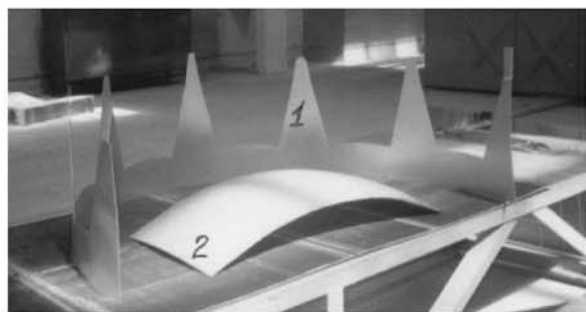


Рис. 8. Обшивка подвижного корпуса реверса (1), фрагмент обшивки мотогондолы (2)

Таким образом, формование листов Алор Д16/41 с различным усилием натяжения слоев органопластика приводит к изменению уровня остаточных напряжений в алюминиевых слоях. Такой технологический приём не приводит к изменениям статических упруго-прочностных свойств Алор Д16/41 ( $\sigma_v$ ,  $E_v$ ), однако позволяет увеличить на 5÷10% их усталостную прочность по сравнению с Алором Д16/41 в исходном состоянии.

### Библиографический список

1. Уманский, Я.С. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия [Текст] / Я.С. Уманский - М.: Металлургия, 1982.
2. Рентгенографический и электронно-оптический анализ [Текст]: учеб. пособие, 4-е изд., перераб. и доп. - М.: МИСИС, 2002.- 357 с.
3. Приборы и методы физического материаловедения [Текст] / Под ред. Вайнберга. - М.: Мир, 1973. Вып. 1
4. Мясников, Ю.Г. Рентгеновские дефрактомеры для исследования и контроля напряженно деформированных материалов [Текст] / Ю.Г. Мясников // Заводская лаборатория. - 1985. - №7. - С. 21-26.

## INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL FACTORS ON THE LEVEL OF RESIDUAL STRESSES IN MPKM COVERING REVERSE D18T

© 2011 O. J. Arlashkina<sup>1</sup>, V. I. Postnov<sup>1</sup>, M. V. Postnova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ulyanovsk centre of science-technological of the federal state unitary enterprise «All-Russian institute of aviation materials»

<sup>2</sup>Institute of aviation technologies and managements

The article presents the results of researches influence technological factors on the level of residual stresses in the skins MPKM reverse D18T. Established that the forming sheets Алор Д16/41 with different tension force organoplastic layers leads to a change in the level of residual stresses in aluminum and composite layers.

*Residual stress, resource, reversing gear frame, fatigue strength.*

### Информация об авторах

**Арлашкина Ольга Юрьевна**, инженер-технолог Ульяновского научно-технологического центра федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский институт авиационных материалов». Тел.: 8(8422) 52-45-22. E-mail: [untcviam@gmail.com](mailto:untcviam@gmail.com). Область научных интересов: конструкции из композиционных материалов.

**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](mailto:untcviam@gmail.com). Область научных интересов: конструкции из композиционных материалов.

**Постнова Мария Вячеславовна**, кандидат технических наук, Институт авиационных технологий и управления УлГТУ. Область научных интересов: конструкции из композиционных материалов.

**Arlashkina Olga Jurevna**, the engineer-technologist of the Ulyanovsk centre of science-technological of the federal state unitary enterprise «All-Russian institute of aviation materials». Phone: 8 (8422) 52-45-22. E-mail: [untcviam@gmail.com](mailto:untcviam@gmail.com). Area of research: designs from composites.

**Postnov Vyacheslav Ivanovich**, Doctor of Technical Sciences, deputy chief of the Ulyanovsk centre of science-technological of the federal. Phone: 8(8422) 52-45-22. E-mail: [untcviam@gmail.com](mailto:untcviam@gmail.com). Area of research: designs from composites.

**Postnova Maria Vjacheslavovna**, Candidate of Technical Sciences. Institute of aviation technologies and managements. Area of research: designs from composite materials.