

*В.И. Постнов, В.И. Петухов, И.А. Казаков, П.А. Абрамов,
А.В. Постнов, О.Г. Сенаторова, Г.Ф. Железина*

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИЗ МПКМ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАНЕРА САМОЛЕТА И ОСОБЕННОСТИ ИХ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

Освоено изготовление из МПКМ элементов конструкции методами деформирования, применяемыми для листов алюминиевых сплавов, с использованием имеющегося оборудования предприятий. При ограниченных допускаемых деформациях до 2–3% элементы сложных геометрических форм возможно изготавливать «раздельным» методом из слоев металла, деформированных по традиционным технологиям, с их последующей склейкой-формовкой с препрегами в автоклавах или прессах. При изготовлении обшивок с габаритами выше выпускаемых металлургическими заводами, освоена технология сращивания и получения деформированных элементов с малой кривизной под давлением автоклава, когда обшивка собирается из узких слоев металла, а стыки перекрываются накладками и препрегами. Проведены коррозионно-усталостные испытания плоских стенок с отбортовками из МПКМ, а также усталостные испытания обшивок двойной кривизны, показавшие преимущество элементов из МПКМ.

Ключевые слова: деформирование.

Металлополимерные композиционные материалы (МПКМ) разработаны с целью повышения живучести конструкций листовых элементов планера, их усталостной долговечности при снижении массы. МПКМ состоят из склеенных между собой тонких листов алюминиевых сплавов (0,2–0,6 мм) и слоев толщиной 0,2–0,5 мм высокопрочных композиционных материалов (КМ). В МПКМ металлические листы расположены на поверхностях пакета и защищают КМ от внешних воздействий (влаги, излучений, ударных нагрузок и других). При нагружении слои работают совместно. Композиционный материал с высокой прочностью армирующих волокон – до 5800 МПа – позволяет до 2,5 раз повысить прочность такого слоистого материала. В настоящее время разработаны и освоены в серийном производстве:

- АЛОР (алюминий–органопластик), зарубежный аналог – ARALL;
- СИАЛ (стеклопластик и алюминий), зарубежный аналог – GLARE.

Подготовлен для паспортизации и опытного применения ТИОР (титан–органопластик).

В конструкциях необходимые толщины листов или профилей набираются путем увеличения количества и толщины слоев металла и КМ, достаточных для обеспечения прочности и долговечности.

Существует преемственность технологии изготовления элементов обшивок и каркаса из готовых листов МПКМ и технологии изготовления традиционных материалов. Примером может служить поставка готовых листов МПКМ, изготавливаемых централизованно на металлургических или специализированных предприятиях. В этом случае возможны значительное снижение стоимости производства, повышение уровня качества, сертификация МПКМ и стандартизация. Изготовление из МПКМ конструктивных элементов планера самолета, двигательных установок (ДУ) производится на предприятиях, выпускающих авиатехнику и другие изделия. Однако возможности широкого применения МПКМ ограничиваются габаритами выпускаемых стандартных тонких листов алюминиевых и других легких сплавов – для удовлетворения требований производства МПКМ необходима коренная перестройка металлургических предприятий, выпускающих листовой прокат.

Для преодоления металлургических проблем изготовления крупногабаритных (20,0×3,0 м) тонких листов алюминиевых сплавов, разработана технология сращивания, когда изготовление листа МПКМ происходит из листов небольших габаритов, и в этом случае габариты ограничиваются только размерами автоклавов, в которых склеиваются пакеты слоев МПКМ. Формообразование деталей одинарной и двойной кривизны – аэродинамических поверхностей агрегатов крыла, оперения, фюзеляжа и мотогондолы –

производится формованием в автоклаве. Поэтому при проектировании необходимо произвести членение агрегатов с обшивочными панелями, обеспечивающее необходимые расчетные деформации, допустимые при таком формообразовании. По такой технологии изготовлены панели фюзеляжа самолета А-380 с габаритами до 12,0×3,0 м (всего 22 панели с общей площадью 480 м²). Данная технология также опробована в УНТЦ, предложен метод расчета предельных деформаций листовых заготовок МПКМ для освоения в серийном производстве крупногабаритных условно-плоских или криволинейных элементов.

Проведенные технологические исследования на серийном оборудовании ЗАО «Авиастар-СП» показали, что способность слоистых МПКМ к формоизменениям зависит от схемы армирования листов волокнами. Так, для однонаправленных МПКМ при гибке вдоль оси армирования получают минимальные радиусы изгиба и углы пружинения. Необходимо отметить, что для производимых листовых заготовок 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 $r \geq 1$), коэффициент выдавки $K_{\text{выд}} \leq 8\%$; коэффициент обтяжки $K_{\text{обт}} \leq 1,02-1,025$. В связи с ограниченными возможностями обтяжки СИАЛов, АЛОРов разработаны специальные методы и приемы с учетом пружинения детали в обтяжной оснастке. Образцы деталей, полученных пластическим деформированием из готовых листов МПКМ, показаны на рис. 1.

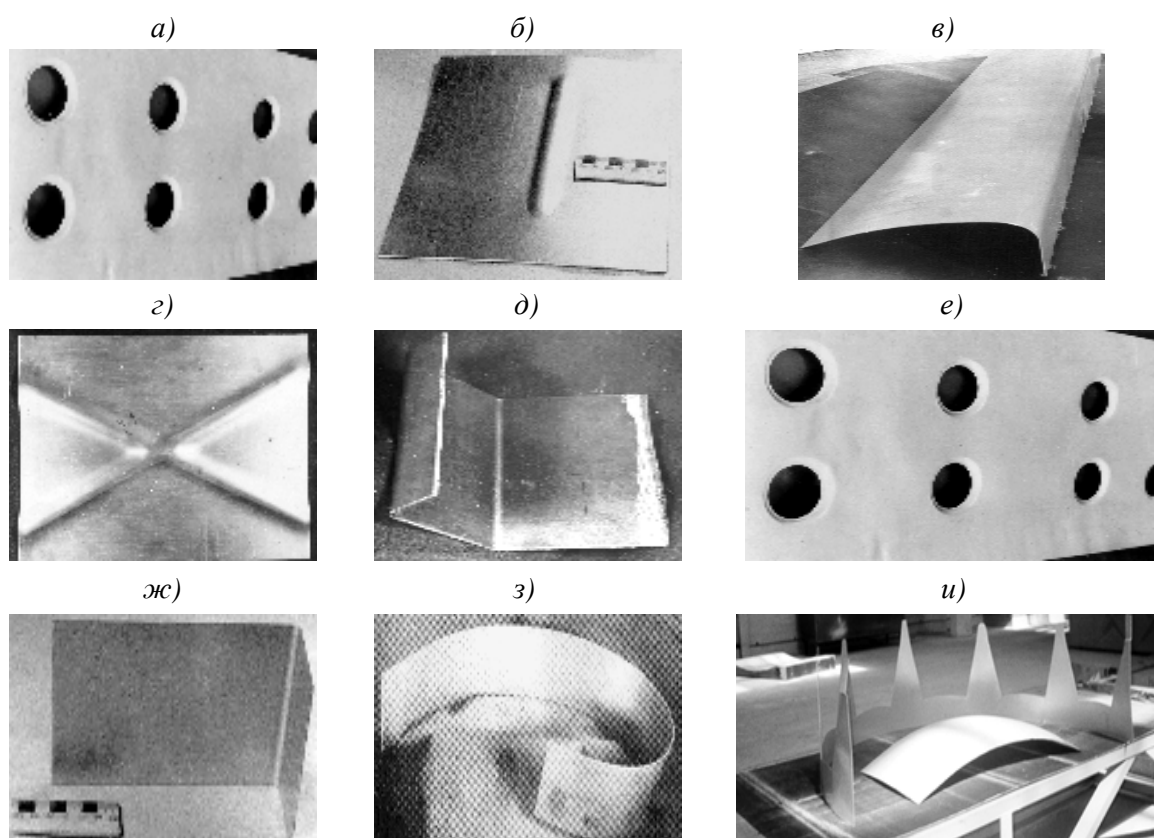


Рис. 1. Образцы деталей, полученных пластическим деформированием из листов МПКМ: а – отбортовка (штамповка эластичной средой); б – рифт (штамповка эластичной средой); в – обшивка носка крыла; г – перекрещивающиеся рифты (штамповка эластичной средой); д – образец гнутый (углы изгиба 60–70 град); е – фрагмент стенки балки с отбортовками тарельчатой формы; ж – образец гнутый (угол изгиба 90 град); з – образец (гибка–прокатка на радиусы 500–100 мм); и – образцы обшивок реверса РУ-18Т (корона) и мотогондолы двигателя Д18Т (изготовлены обтяжкой)

Если деталь сложна по геометрии и не может быть изготовлена по традиционным технологиям для металлов, то для ее изготовления разработана новая технология «раздельного» формования, когда из отдельных слоев изготавливают элементы детали, а затем они формируются в специальной оснастке в прессе или автоклаве. Примером такой технологии является изготовление нервюр из АЛОР Д16/41 для носка крыла и обшивки мотогондолы самолета Ан-124-100 (рис. 2).

На рис. 3 и 4 представлены образцы сборочных единиц с листовыми элементами из МПКМ.

Как перспективные элементы, позволяющие значительно снизить материалоемкость и трудоемкость (при повышении ресурса), на рис. 5 показаны образцы монолитных панелей с ребрами и полотном из МПКМ.

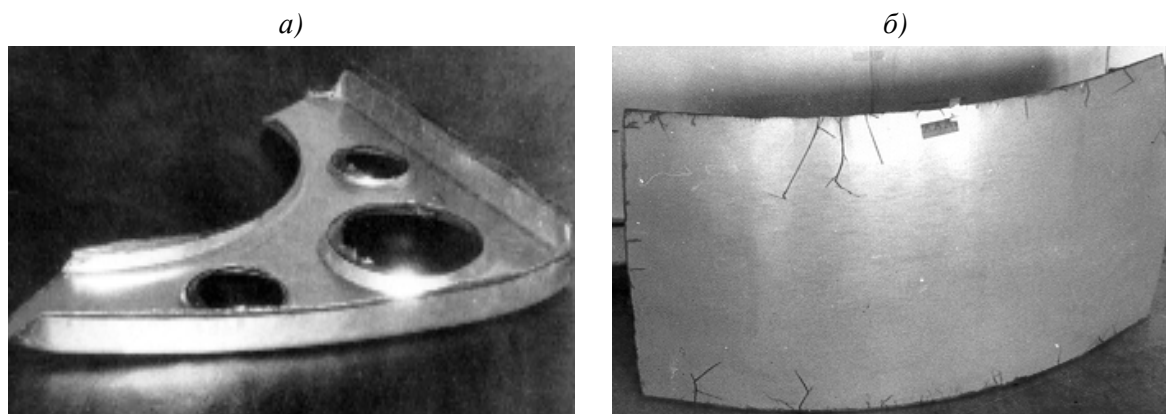


Рис. 2. Детали, полученные методом «раздельного» формования из слоев металла и КМ:
а – нервюра носка крыла; б – обшивка мотогондолы Ан-124-100

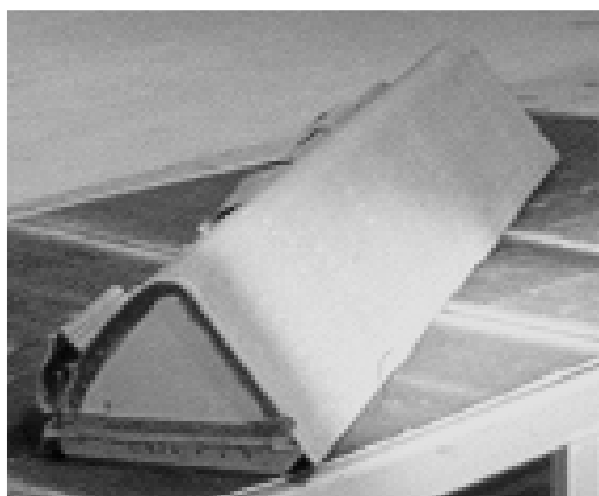


Рис. 3. Собранный натурный фрагмент носка крыла с листовыми элементами из МПКМ АЛОР

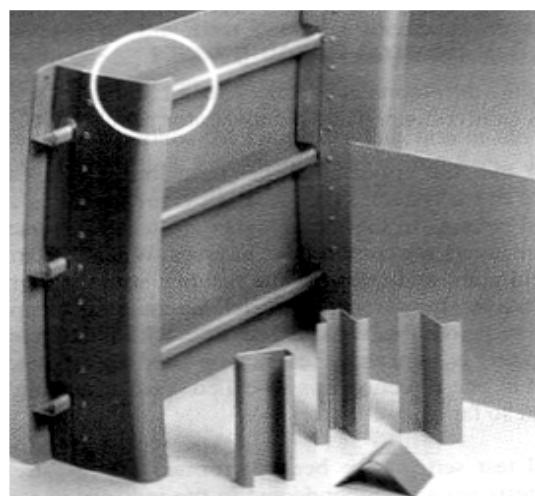


Рис. 4. Собранный узел конструкции и профили, гнутые из листов МПКМ FMLC (Нидерланды)

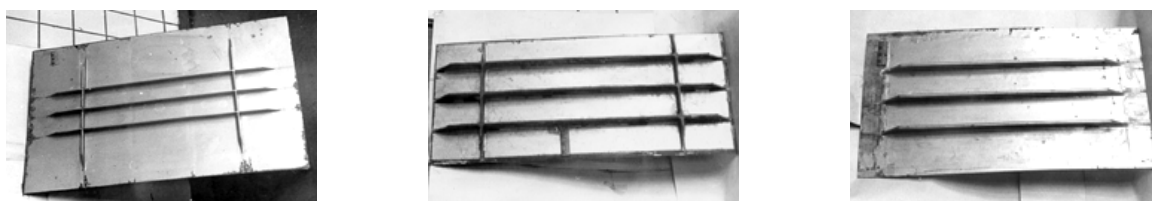


Рис. 5. Панели с полотном из МПКМ с перекрестными и продольными ребрами (лист алюминиевого сплава + КМ)

Ребра имеют полости, заполненные жгутами из КМ и связующим, и полимеризуются заодно с полотном. Также ребра могут представлять собой штампованные или штампосварные коробки, установленные на полотне, например, по сборочным отверстиям, образуя в зазорах между коробками полости, заполненные КМ.

При отработке и освоении формообразования элементов конструкции из МПКМ установлены следующие основные особенности.

1. Предельные возможности пластического деформирования готовых листов МПКМ ограничиваются не только технологическими возможностями сплавов в состоянии после окончательной термической обработки (ϵ_{\max}), но и ϵ_{\max} слоев композита, анодных покрытий, величиной градиентов напряжений на границах металл–композит, схемой напряженно-деформированного состояния. Так, для алюминиевого сплава Д16ч.-АТ и органопластика на основе органоткани СВМ (арт. 56313) и связующего – клея ВК-41 – в процессе обтяжки опасными являются ϵ_{\max} в пределах 2,0–2,5%.

При стесненном изгибе профилей, где создается неравномерное всестороннее сжатие в зоне деформирования, обеспечивается без разрушения относительный радиус

$$\bar{r} = \frac{h_{\text{н.о}}}{r_{\text{н.о}}} \geq 1,0,$$

где $h_{\text{н.о}}$ – расстояние от волокна до нейтральной оси изгиба, $r_{\text{н.о}}$ – радиус кривизны нейтральной оси.

Если слой композита и его границы расположены симметрично относительно нейтральной оси, то для трехслойного МПКМ (без расслоений) относительная деформация крайних металлических слоев может составлять до 30–33%. При этом усталостная прочность в них не уменьшается (по сравнению с аналогичной характеристикой для листа МПКМ).

Для работы МПКМ в коррозионных средах нарушение целостности плакирующего слоя и анодного покрытия при деформации в пределах 1,8–2,5% требует изменения способа гибки на «раздельное» формообразование с деформированием отдельных слоев металла (в том числе и для профилей).

2. При освоении и исследовании процессов изготовления элементов каркаса с отбортовками (см. рис. 1, а, е; рис. б) установлено, что деформации в зонах радиусов изгиба достигают 10–13% без расслоений для тарельчатых отбортовок.

Однако для серийного производства следует рассмотреть вопрос увеличения радиусов в сечении отбортовки либо применить «раздельное» формование (аналогично показанному на рис. 2, а для стенки нервюры с отбортовками). Для тороидальных отбортовок следует уменьшить глубину отбортовки и увеличить радиусгиба в сечении. Стенки с отбортовками прошли усталостно-коррозионные испытания в СибНИА. Долговечность элементов с отбортовками, установленная при циклических испытаниях типовых отбортовок $\varnothing 74$ мм при габаритах элемента 0,2×0,4 м, приведена в табл. 1. Усталостные испытания проводились в соответствии с ГОСТ 25.502–79 по методике СибНИА. Коррозионные испытания проводились в соответствии с ГОСТ 9.017–74 на натуральных образцах габаритом 0,2×0,4 м. Блок испытания состоял из выдержки в 3%-ном растворе NaCl (15 сут) и последующего циклического нагружения ($1 \cdot 10^5$ цикл: $\sigma_{\min} \rightleftharpoons \sigma_{\max}$ при $f=11$ Гц).

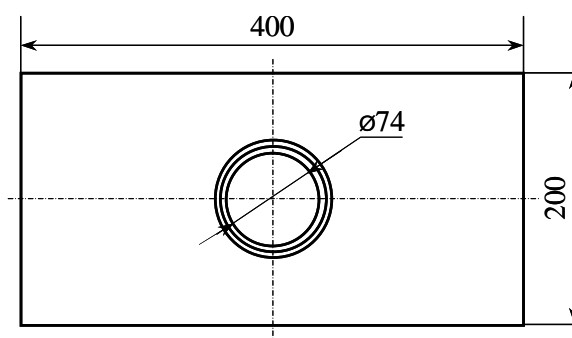


Рис. 6. Эскиз элемента стенки с отбортовкой $\varnothing 74$ мм для усталостно-коррозионных испытаний

Результаты испытаний стенок с отбортовками

Вид испытания	Материал элемента	Тип отбортовки по ГОСТ 17040–80 и технология изготовления	Режим нагружения при испытании на МЦУ ($f=11$ Гц, $\sigma_{\min}=20$ МПа): σ_{\max} , МПа	Количество циклов до разрушения, N	Квоты превосходства, n раз
Усталостные испытания (ГОСТ 25.502–79)	Д16ч.-АТ-1,2	Тарельчатая, штамповка из свежезакаленного листа	80,0	2709060	} 1
			100,0	503270	
	120,0	185910			
	АЛОП Д16/41-1,3 с растяжением СВМ	Тарельчатая, штамповка из полимеризованного АЛОРа на гидропрессе	80,0	Св. 5000000	1,95
			100,0	1056100	2,10
	120,0	493430	2,70		
АЛОП Д16/41-1,3 без растяжения СВМ		100,0	4828460	9,60	
Коррозионные испытания по ГОСТ 9.017–74 (15 сут в 3%-ном NaCl) + усталостные испытания	Д16ч.-АТ-1,2	Тарельчатая, штамповка из закаленного и состаренного состояния	100,0	130500	} 1
			120,0	93169	
	АЛОП Д16/41-1,3 с растяжением СВМ	Тарельчатая, штамповка из полимеризованного состояния на гидропрессе	100,0	699347	5,35
			120,0	234552	2,41

Возможность деформирования элементов без ухудшения ресурса сборочных единиц проверена ресурсными испытаниями в СибНИА.

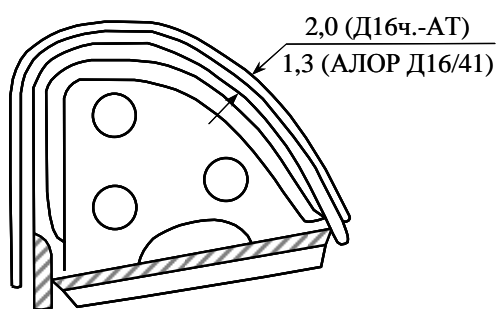


Рис. 7. Упрощенная схема носка носовой части крыла Ан-124-100

Испытываемые натурные фрагменты носка носовой части крыла самолета Ан-124-100 схематично показаны на рис. 7.

В этом фрагменте обшивки (см. рис. 7) все листовые детали, кроме мелких прокладок, выполнены из АЛОП Д16/41 с нерастянутой и растянутой при полимеризации структурой. Для сравнения испытывались фрагменты, выполненные по серийным чертежам. При этом были применены гибка, гибка–прокатка обшивки, штамповка на гидропрессе отбортовок на нервюрах и стенке, обрезка по контуру на высокооборотном фрезерном станке с ЧПУ.

Результаты ресурсных испытаний на статическое, повторно-статическое, акустическое нагружение, комплекс повторно-статического и виброакустического нагружения подтвердили преимущества фрагментов из МПКМ и приведены в табл. 2.

**Долговечность конструкции с листовыми деталями из АЛОР Д16/41
при виброакустическом нагружении с уровнем 162 дБ в полосе частот 80–100 Гц**

Материал листовых деталей	Комплекс нагрузок* при испытании до разрушения	Время до разрушения, ч		Квота превосходства МПКМ перед сплавом Д16ч.-АТ, <i>n</i> раз		Максимальные напряжения при испытании, МПа	
		начало	конец	по началу разрушения	по концу разрушения	в обшивке	в нервюре
Нервюры из Д16ч.-АТ (1,2); обшивка из Д16ч.-АТВ (1,2) с приклеенными клеем ВК-25 накладками Д16ч.-АТ (0,8)	Акустические (I)	509,7	866,7	1	1	19,0–25,9	11,4–15,2
	Повторная статика с трехкратной расчетной нагрузкой + акустические нагрузки до разрушения (II)	63	457	1	1	22,4	17,0
АЛОР Д16/41 (1,3) без растяжения СВМ при полимеризации	I	787,5	1261,0	1,55	1,45	26,3	16,1
	II	1292	1781	20,5	3,8	28,7	10,5
АЛОР Д16/41 (1,3) с растяжением СВМ на 1%	I	2055	3356,5	4,03	3,9	22,1–26,3	9,3–16,1
	II	1580	1843,6	27,75	4,03	21,1	14,5

* I и II – условные обозначения комплекса нагружения.

Наименее затратными и не требующими специального оборудования и обтяжной оснастки, больших площадей для ее хранения являются процессы формования со «сращиванием» и деформированием слоев МПКМ давлением автоклава с полимеризацией на поверхностях выклечных форм одинарной и малой двойной кривизны.

Такой метод опробован на образцах, и показана возможность получения обшивок с неприсоединением к форме, устраняемым путем прижатия обшивки к форме нормированным для металлических обшивок усилием до 100 Н. Основные схемы сращивания и их выбор показаны далее.

Выбор технологических схем сращивания металлических слоев МПКМ предлагается по результатам (полученным при освоении самолета А-380) наземных, летных испытаний и сертификации самолета.

Анализ известных схем сращивания показал, что они являются разновидностью или комбинацией двух основных схем:

– схема со стыком металлических слоев без нахлеста с установкой металлической накладке снаружи на верхний слой пакета МПКМ, перекрывающей все стыки (рис. 8). (Накладка в конструкции расположена внутри агрегата);

– схема с перехлестом металлических слоев в местах стыка с перекрытием стыка в каждом слое (рис. 9). Ступеньки толщин расположены внутри агрегата и не выходят на аэродинамический контур.

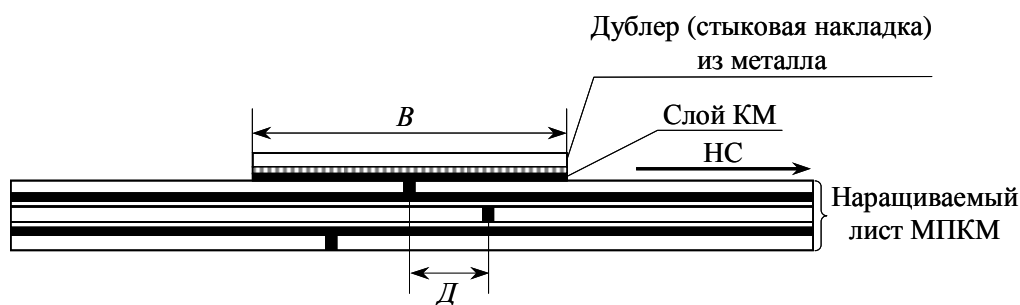


Рис. 8. Схема «сращивания» со стыком металлических слоев без нахлеста (НС – направление сращивания); B – ширина накладки (≥ 150 мм); D – дистанция сращивания (37–40 мм):
 □ – слой металла; ■, ▨ – слой КМ с волокном, направленным параллельно и перпендикулярно НС соответственно

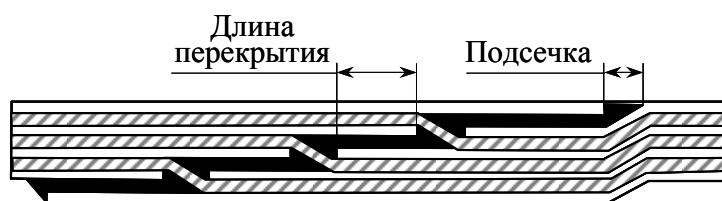


Рис. 9. Схема «сращивания» с перехлестом металлических слоев:
 □ – металл; ▨ – слой КМ; ■ – клей (связующее)

Для отработки технологии изготовления обшивок из МПКМ марок СИАЛ и АЛОР выбраны следующие технологические схемы сращивания металлических слоев:

- схема 1 – стык металлических слоев без нахлеста с установкой внешней металлической накладки снаружи на верхний слой пакета МПКМ, перекрывающей все стыки (см. рис. 8);
- схема 2 – перехлест металлических слоев в местах стыка с установкой металлической накладки внутри пакета на первый металлический слой с перекрытием стыка в этом слое (рис. 10).

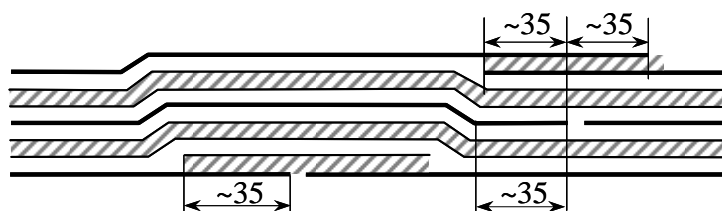


Рис. 10. Схема «сращивания» с перехлестом металлических слоев в местах стыка и с внутренней металлической накладкой в месте стыка в первом слое:
 — металл; ▨ – слой КМ

Схема 1 неприемлема для изготовления обшивок двойной кривизны, так как из-за подвижки листов при формовании невозможно обеспечить необходимый зазор 10–20 мм по их стыку, но она приемлема для обшивок одинарной кривизны. Схема 2 приемлема для обшивок двойной кривизны, так как наличие перехлестов в местах стыков обеспечивает качественное соединение, несмотря на возможные подвижки металлических слоев при формовании.

Для обеспечения прочности места сращивания на уровне не ниже, чем в местах с регулярной обшивкой, выполнен расчет необходимой величины нахлеста металлических слоев. Расчет величина нахлеста слоев (D) выполнен по формуле:

$$D = \frac{3S \cdot \sigma_{0,2Al}}{\tau_{сдв}}, \quad (1)$$

где S – толщина сращиваемых листов, м; $\sigma_{0,2}$ – предел текучести алюминиевого сплава, МПа; $\tau_{сдв}$ – предел прочности при сдвиге соединения внахлест металлических листов, склеенных пленочным клеем либо препрегом, МПа.

Величина нахлеста слоев (для АЛОР и СИАЛ) составляет 35 мм исходя из прочностных характеристик листов Д16ч.-АТ толщиной 0,5 мм ($\sigma_b=400$ МПа) и величины $\tau_{сдв}=17,7$ МПа для места склейки слоя КМ с анодированной поверхностью листа Д16ч.-АТ. При таком нахлесте прочность клеевого соединения в месте стыка в три раза выше прочности металлических слоев, и клеевой шов не будет причиной разрушения обшивки.

Для определения ширины B сращиваемых листов из прямоугольного треугольника на рис. 11 находим величину $H=B^2/8R$. Относительное сжатие ε края листа по отношению к середине, согласно рис. 11, вычисляется, исходя из отношения разницы длин дуг по центру и по краю к длине дуги по краю нарисованной поверхности, следовательно, величина ε и есть интересующий нас критерий драпируемости (при условии, что не произошло образования гофр на сжатых участках металлического листа), и он вычисляется по формуле:

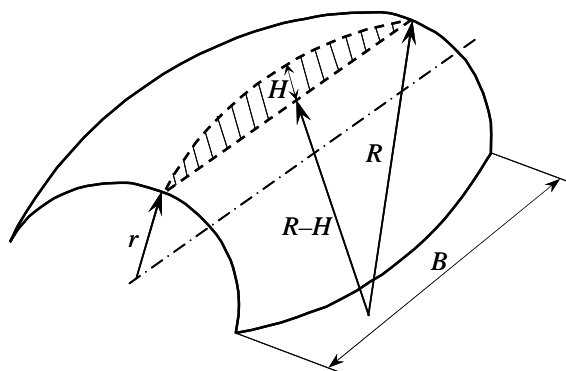


Рис. 11. Схема укладки металлического листа на поверхность двойной кривизны

$$\varepsilon = \frac{H}{r} = \frac{B^2}{8r \cdot R}, \quad (2)$$

где B – ширина листа, м; r, R – радиусы кривизны, м.

Максимально допустимое значение величины B было определено эмпирически в процессе опробования выкладки листов Д16 толщиной 0,3 и 0,5 мм, разных по ширине, на оснастку двойной кривизны с известными радиусами кривизны. Для этого использованы две выклеечные оснастки двойной кривизны с радиусами продольного (R) и поперечного сечения (r): первая с $R=8$ м, $r=0,9$ м, габаритом $0,9 \times 0,7$ м (рис. 12); вторая с $R=20$ м, $r=1,9$ м, габаритом $1,8 \times 0,8$ м.

На первой оснастке с $R=8$ м, $r=0,9$ м, при использовании металлических листов Д16 (толщиной 0,3 и 0,5 мм) различной ширины, отрабатывался критерий драпируемости. При этом для контроля полноты прилегания листов к поверхности оснастки использовались отверстия, предварительно просверленные в листах. В результате формования образцов обшивок из МПКМ на первой оснастке при использовании металлических листов шириной более 0,3 м на поверхности образовались гофры, которые при формовании были заполнены выдавленным из препрега клеем. Следовательно, для первой оснастки максимально допустимая ширина полос не более 0,3 м, и поэтому при расчете по формуле (2) получено: $\varepsilon=0,0015$.

Полученные обшивки (рис. 13) имели разброс толщины в пределах $\pm 0,1$ мм. Неприлегание обшивок к выклеечной оснастке – не более 0,2 мм и устраняется сосредоточенной нагрузкой до 100 Н.

Проведенные исследования усталостных свойств (ОСТ 9.0268–78) образцов-свидетелей полученных обшивок (при напряжении на регулярной части 140 МПа с частотой $f=9$ Гц; коэффициенте асимметрии $R=0,2$) показали, что выносливость по месту сращивания не ниже, чем по регулярной части, и составила для обшивки из АЛОР более 80 кциклов, а для обшивки из СИАЛ – более 200 кциклов. При металлографических исследованиях структуры обшивки в зоне стыков при сращивании расслоений не обнаружено (рис. 14).



Рис. 12. Оснастка двойной кривизны с $R=8$ м, $r=0,9$ м, габаритом 0,9×0,7 м

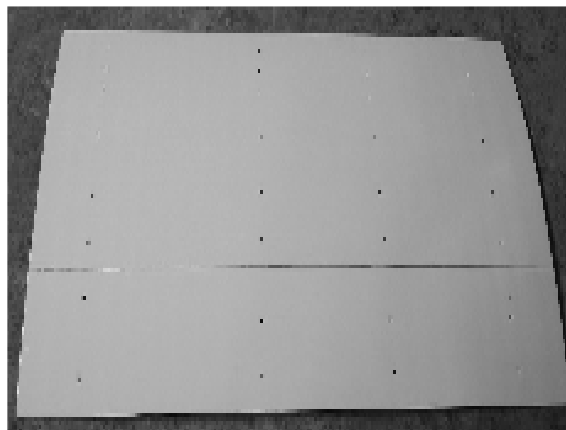


Рис. 13. Обшивка двойной кривизны с $R=20$ м; $r=1,9$ м и габаритом 0,7×1,2 м со структурой СИАЛ3-3/2-0,5

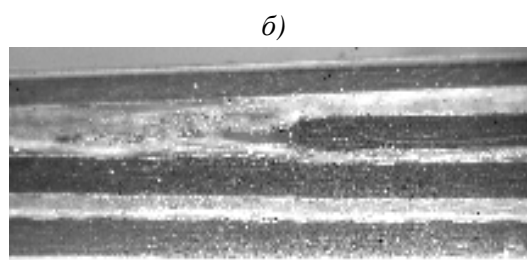
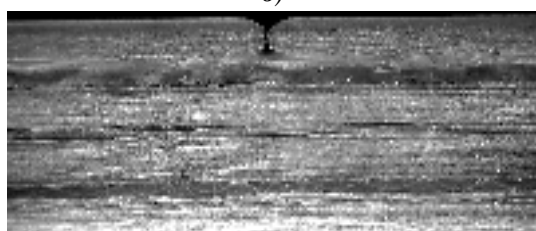
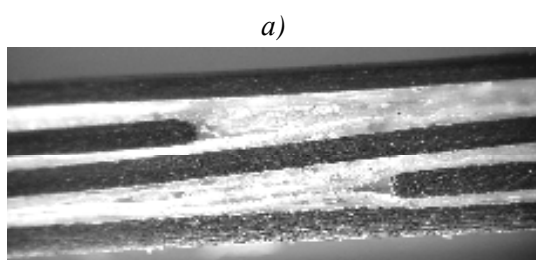


Рис. 14. Металлография зон стыков слоев при сращивании образца листа МПКМ СИАЛ:

а, б – сращивание по схеме 2; в – по схеме 1

По результатам проведенных исследований можно сделать выводы:

- показана возможность освоения производства элементов из МПКМ с применением методов деформирования, в том числе без применения обтяжного оборудования и уникальных крупногабаритных листогибочных станков в условиях действующих серийных предприятий по изготовлению авиатехники;
- приемлемость отработанных технологий формообразования элементов и сборочных единиц подтверждена положительными результатами наземных ресурсных испытаний натурных фрагментов планера и последующей проверки в лётной эксплуатации;
- разработанный комплект НД для МПКМ освоен в производстве.