

Г. Л. Ривин

**Ремонт
конструкций из
полимерных
композиционных
материалов
летательных
аппаратов**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Г.Л.Ривин

**РЕМОНТ КОНСТРУКЦИЙ
ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**Рекомендовано Учебно-методическим объединением
высших учебных заведений Российской Федерации
по образованию в области авиации, ракетостроения и космоса
в качестве учебного пособия
для студентов, обучающихся по направлению
551000 - Авиа- и ракетостроение и специальности
130100 - Самолето- и вертолетостроение**

Ульяновск 2000

УДК 629.735.33.015.4(075)

ББК 39.5я7

Р 49

Рецензенты: проф., доктор техн. наук **В.И. Толмачев**.
доцент, канд. физ.-мат. наук **К.Е. Никитин**.
канд. техн. наук **В.И. Постнов**.

Утверждено редакционно-издательским советом
Ульяновского государственного технического
университета в качестве учебного пособия.

Ривин Г.Л.

Р 49

Ремонт конструкций из полимерных композиционных материалов летательных аппаратов: Учебное пособие. -Ульяновск: УлГТУ, 2000. – 75с.

ISBN 5-89146-137-4

Рассмотрены причины и виды дефектов конструкции из полимерных композиционных материалов, требования, предъявляемые к ремонту поврежденных конструкций и отремонтированным конструкциям. Приведены типовые технологические процессы ремонта конструкций из композитов. Рассмотрено оборудование, оснастка и инструменты, необходимые для выполнения ремонта.

Пособие разработано в соответствии с программой учебной дисциплины «Технология изготовления конструкций из ПКМ» для студентов направления 551000 и специальности 13.01.00 всех форм обучения.

УДК 629.735.33.015.4(075)

ББКЗ 9.5я7

ISBN 5-89146-137-4

© Г.Л. Ривин, 2000

© Оформление. УлГТУ, 2000

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1.ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	5
2.ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К РЕМОНТУ ПОВРЕЖДЕННЫХ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	10
3.ТРЕБОВАНИЯ К ОТРЕМОНТИРОВАННЫМ КОНСТРУКЦИЯМ.....	14
4.ВИДЫ ДЕФЕКТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИ- ЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПРИЧИНЫ ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ.....	15
5.МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И ОЦЕНКИ ДЕФЕКТОВ.....	19
6.МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ РЕМОНТА. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К НИМ.....	23
7.ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ РЕМОНТА КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	25
7.1.Устранение царапин.....	26
7.2.Устранение расслоений.....	26
7.3.Устранение отслоений.....	28
7.4.Удаление влаги из сотовых конструкций.....	28
7.5.Устранение отслоений обшивки от сотового заполнителя.....	30
7.6.Восстановление обшивки из препрегов с одновременным ее приклеиванием к сотовому заполнителю.....	32
7.7.Расчет конфигураций косоугольного соединения.....	38
7.8.Устранение отслоений сотового заполнителя от каркаса.....	40
7.9.Устранение отслоений обшивки от каркаса.....	41
7.10.Устранение трещин.....	42
7.11.Выбор, подготовка и приклеивание заплат.....	42
7.12.Устранение вмятин, проколов и односторонних пробоин размером до 40 мм.....	45
7.13.Устранение вмятин и односторонних пробоин размером более 40мм.....	45
7.14.Ремонт сквозных пробоин.....	49
7.15.Ремонт законцовок агрегатов.....	52
7.16.Ремонт отслоений в воздухозаборных каналах звукопог- лощающих конструкций (ЗПК).....	54
8.НАГРЕВ ЗОНЫ РЕМОНТА.....	54
9.ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ И РАЗРЯЖЕНИЯ В ЗОНЕ РЕМОНТА.....	57
10.ГЕРМЕТИЗАЦИЯ МЕСТ РЕМОНТА И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЛАКОКРАСОЧНОГО ПОКРЫТИЯ.....	59
11.ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА РЕМОНТА.....	61
12.ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РЕМОНТНЫХ РАБОТ.....	69
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	74

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее учебное пособие входит в серию учебной литературы, посвященной технологии изготовления агрегатов из полимерных композиционных материалов (ПКМ) и сотовых конструкций. Ускорение научно-технического прогресса в авиации - это в первую очередь значительное расширение номенклатуры применяемых материалов и технологий. Большой эффективностью за счет снижения массы летательного аппарата и упрощение технологии его производства обладают современные высокопрочные ПКМ, угле-, стекло- и органические пластики, а также сотовые конструкции. Увеличение объема их применения требует разработки новых и совершенствования существующих технологий ремонта. Кроме того, сотовые конструкции являются наиболее тонкостенными, **ВЫХОДЯЩИМИ** на наружный контур летательных аппаратов. Они более других чувствительны к сосредоточенным нагрузкам, часто повреждаются от попаданий посторонних предметов. В процессе эксплуатации выявляются скрытые дефекты, которые не были обнаружены при производстве конструкций.

Поэтому основное условие при проведении ремонта в авиации - восстановление исходных данных прочностных и аэродинамических характеристик летательного аппарата. В полной мере это может быть достигнуто применением технологии постановки ремонтной детали (заплаты) с использованием препрегов, пленочных и пастообразных клеев с обеспечением необходимой температуры и давления для формования или приклеивания ремонтной детали, чему и посвящено настоящее учебное пособие. Рассматриваемые технологии изготовления ремонтной детали позволяют ее делать из тех же материалов с обеспечением заданной схемы армирования, что и применяемые на ремонтируемом агрегате. В некоторых случаях, используя описанные технологические процессы ремонта и изготовив соответствующее **оснащение**, можно осуществлять ремонт **конструкций, не** снимая их с летательного аппарата (в цехах сборки, на аэродроме и т.п.), что позволит снизить затраты и сократить цикл выполнения ремонта.

Отдельные технические **решения, отраженные** в учебном пособии, выполняемые при проведении ремонтных работ, могут быть использованы студентами в рамках курсового и дипломного проектирования при разработке технологических процессов изготовления конструкций из ПКМ и сотовых наполнителей в производственных условиях (применение гибких нагревательных элементов, воздушных мешков для создания местного давления, приспособлений для механической обработки ПКМ и сотового наполнителя и т.п.).

1. ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Особенности конструкций из ПКМ связаны с рядом факторов, определяющих их удельные прочность и жесткость. К таким факторам относятся: структура ПКМ, технологические параметры изготовления ПКМ, условия эксплуатации, взаимодействие разнородных материалов, долговечность [1].

Высокие удельные прочность и жесткость однонаправленного ПКМ позволяют создать элементы конструкции требуемых несущей способности и деформативности. В понятие структуры входит следующее: сочетание в пределах толщины элемента, скрепленных между собой за одно целое слоев с различной ориентацией волокон, соотношение в указанной толщине слоев с определенной ориентацией волокон относительно направления **нагружения**, порядок размещения по толщине элемента слоев с определенной ориентацией слоев. Для расчета характеристик многослойных ПКМ необходимо знать характеристики однонаправленного материала (слоя):

предел прочности при растяжении и сжатии в продольном и поперечном направлениях;

модуль упругости в продольном и поперечном направлениях;

предел прочности и модуль сдвига в плоскости слоя;

коэффициент Пуассона.

В практике проектирования элементов конструкций из ПКМ при комбинированном **нагружении** вся необходимая совокупность механических свойств может быть получена для структуры ПКМ, состоящей из трех видов слоев с ориентацией волокон - $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$. Слой с ориентацией 0° дает ПКМ высокие механические характеристики в направлении оси X, те же функции в направлении оси Y выполняет слой с ориентацией в 90° , присутствие слоев с ориентацией в $\pm 45^\circ$ увеличивает характеристики сдвига материала в плоскости XOY.

Технологический процесс изготовления конструкции из ПКМ состоит из следующих этапов: получение препрега для каждого слоя, сборка слоев по заданной структуре, полимеризация многослойного ПКМ, а для трехслойных конструкций предусматривается сборка-склейка с наполнителем (сотовым, трубчатым и т.п.) или возможно одновременное формование обшивки со склеиванием с сотовым наполнителем. Видно, что многообразие технологических процессов изготовления конструкций из ПКМ, возможности отклонения параметров технологии от заданных приводят к разбросу механических свойств готовой конструкции, возможности появления микро- и макродефектов в поверхностном слое ПКМ и в целом в конструкции. Происходит адсорбирование в трещинах и порах влаги, а при циклическом воздействии влаги трещины **развиваются**, и прочность ПКМ еще более снижается. Анализ процесса разрушения образцов из органопластика [2] позволил сделать вывод: при

растяжении однонаправленного материала в направлении армирования потеря несущей способности сопровождается разделением волокон на отдельные единицы - фибриллы. Неоднородность связующего в ПКМ приводит к тому, что в процессе **нагружения** напряженное состояние отдельных частей органического волокна неравнозначно, а на границе этих частей возникают напряжения сдвига. В дальнейшем происходит прорастание межфибрилярных трещин в направлении нагрузки и расщепление композита. Расщепление сопровождается обрывом наиболее напряженных волокон и увеличением истинных напряжений в материале.

В трехслойных конструкциях с наружными и внутренними несущими слоями, выполненными из **стеклопластика**, при эксплуатации возможно появление одиночных макротрещин в несущем слое. Была проведена оценка влияния подобных дефектов на остаточную прочность трехслойных конструкций [3]. Выявлено, что разрушение данной конструкции носит хрупкий характер. В момент достижения предельного состояния в сечении с макродефектом напряжения сжатой зоны лежат в упругой области, так как модуль упругости композиции из-за жесткого наполнителя значительно больше минимального значения модуля стеклопластика. Оценка несущей способности оболочки производилась следующим образом. Было принято, что предельное состояние с дефектом в поверхностном слое наступает тогда, когда в одной наиболее нагруженной точке внутреннего слоя в области трещины напряжения достигают разрушающих σ_{\max} . Поперечное сечение круговой цилиндрической оболочки относится к декартовым координатам YOZ, и вводится текущий полярный угол φ , отсчитываемый по часовой стрелке от положительного напряжения оси YOZ (рис.1). Обозначая радиус поперечного сечения через R, зону макродефекта во внешнем слое стеклопластика $2\beta_0$, при этом угол β_0 отсчитывается от отрицательного направления оси OY. Положение нейтральной оси отмечается координатой Y_0 или соответствующим углом α_0 . Макродефект в оболочке ориентируется в слабейшем направлении к предполагаемым нагрузкам - изгибающему моменту и продольной силе (рис.1). В момент разрушения оболочки в наиболее удаленной от нейтральной оси точке А (рис.1) деформация растяжению стеклопластика равна максимальной:

$$\varepsilon_A = \varepsilon_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{E'_{1\min}}, \quad (1)$$

где $E'_{1\min}$ - минимальный секущий модуль стеклопластика;

σ_{\max} - разрушающие напряжения при растяжении.

При принятых допущениях деформации в сечении оболочки распределяются по закону:

$$\varepsilon(\varphi) = \varepsilon_{\max} \frac{\sin \alpha_0 - \sin \varphi}{1 + \sin \alpha_0} \quad (2)$$

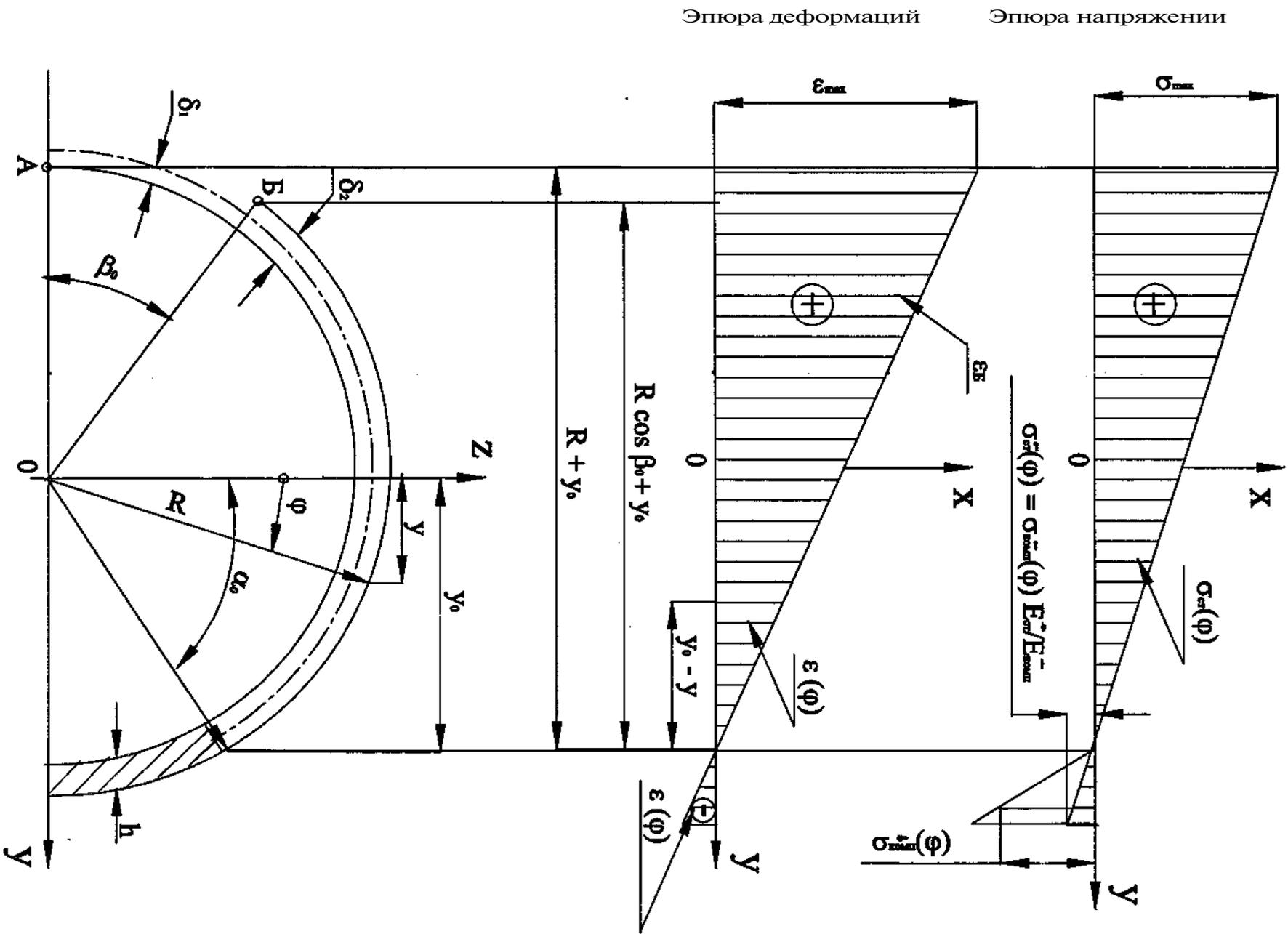


Рис.1 Эпюры деформаций и напряжений оболочки из полимерного композиционного материала с макродефектом в наружном слое

Получим выражения для осевой силы и изгибающего момента сечения трехслойной оболочки с макротрещиной в наружном слое. Осевая сила сечения оболочки равна:

$$N = 2 \left[\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2} + \beta_0} E_1' \varepsilon(\varphi) \cdot \delta_1 \cdot R \cdot d\varphi + \int_{-\frac{\pi}{2}}^0 E_1' \cdot \varepsilon(\varphi) (\delta_1 + \delta_2) \cdot R \cdot d\varphi + \int_0^{\frac{\pi}{2}} E \varepsilon(\varphi) \cdot h \cdot R d\varphi \right], \quad (3)$$

где E_1' - секущий модуль упругости стеклопластика при растяжении;
 E - модуль упругости пакета композиции при сжатии;
 δ_1 - толщина внутреннего слоя стеклопластика;
 δ_2 - толщина наружного слоя стеклопластика;
 h - толщина пакета композиции.

Принимая запас прочности,

$$E_1' = E_{1\min}' \quad (4)$$

Отношение погонных жесткостей сжатой и растянутой областей называется редуцированным коэффициентом:

$$\psi = \frac{E \cdot h}{E_{1\min}' (\delta_1 + \delta_2)} \quad (5)$$

Подставляя (2) в (3), с учетом (1), (4), (5) после интегрирования получается:

$$N = \frac{2R(\delta_1 + \delta_2) \cdot \sigma_{\max} \cdot \sin \alpha_0}{1 + \sin \alpha_0} \times \left[\frac{\delta_1}{\delta_1 + \delta_2} \left(\beta_0 + \frac{\sin \beta_0}{\sin \alpha_0} \right) + \frac{n}{2} + \alpha_0 + \operatorname{Ctg} \alpha_0 - \beta_0 - \frac{\sin \beta_0}{\sin \alpha_0} + \psi \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_0 \right) \right] \quad (6)$$

Изгибающий момент сечения оболочки относительно оси Z равен:

$$M = -2 \left[\int_{-\frac{\pi}{2}}^{-\frac{\pi}{2} + \beta_0} E_1' \cdot \varepsilon(\varphi) \cdot \delta_1 \cdot R^2 \sin \varphi \cdot d\varphi + \int_{-\frac{\pi}{2} + \beta_0}^0 E_1' \cdot \varepsilon(\varphi) (\delta_1 + \delta_2) R^2 \sin \varphi \cdot d\varphi \right] + (-2) \left[\int_{\alpha_0}^{\frac{\pi}{2}} E \cdot \varepsilon(\varphi) \cdot h \cdot R^2 \sin \varphi \cdot d\varphi \right] \quad (7)$$

Подставив в выражение (7) значение деформации (2), принимая во внимание (1), (4), (5), после интегрирования определяется изгибающий момент сечения оболочки:

$$M = \frac{R^2(\delta_1 + \delta_2)\sigma_{\max}}{2(1 + \sin\alpha_0)} \left[\frac{\delta_1}{\delta_1 + \delta_2} (2\beta_0 + 4\sin\alpha_0\sin\beta_0 + \sin 2\beta_0) \right] + \\ + [\pi + 2(\alpha_0 - \beta_0) + \sin 2\alpha_0 - \sin 2\beta_0 - 4\sin\alpha_0\sin\beta_0 + \psi(\pi - 2\alpha_0 - \sin 2\alpha_0)] \quad (8)$$

На основании полученных выражений (6) и (8) приближенно определяется несущая способность трехслойной оболочки с макродефектом во внешнем слое при совместном действии изгибающего момента и продольной силы.

Относительный размер дефекта удобно определять параметром

$$\bar{s}_{mp} = \frac{c_{mp}}{S},$$

где S_{mp} - величина трещины во внешнем слое,

S - периметр рассматриваемого сечения с дефектом.

Остаточная прочность трехслойной оболочки с трещиной в наружном слое оценивается коэффициентом ε :

$$\varepsilon \sim \frac{M_{\text{ПРЕД}}}{M_{\text{ПРЕД}}^0},$$

где $M_{\text{ПРЕД}}$ - предельный изгибающий момент при поверхностной трещине S_{mp} ;

$M_{\text{ПРЕД}}^0$ - разрушающий изгибающий момент при отсутствии дефекта.

Были проведены экспериментальные исследования и сравнены расчетные данные с экспериментальными, причем последние на 10-15% больше расчетных [3]. Это дает вероятность сделать заключение о том, что предполагаемый приближенный метод является достаточно эффективным для инженерных оценок остаточной прочности подобных конструкций на стадии проектирования и оценке ремонтных вариантов.

Было установлено [4], что проницаемость воды в предварительно ненапряженных линейно армированных стеклопластиках вдоль волокон почти на два порядка выше проницаемости в поперечном направлении. Причинами образования ослабленных связей, является возникновение удлиненных вдоль волокон локальных трещин, через которые проникает вода, неравномерность распределения усадочных напряжений в структуре и неоднородность процесса образования связей при градиенте температуры. Таким образом, снижение градиента температуры в зоне ремонта, обеспечение равномерности передачи давления в зоне ремонта и возможность изменения давления в течение всего хода технологического процесса ремонта конструкций из ПКМ по заданному режиму, в том числе определение момента времени, когда связующее имеет минимальную вязкость для возможности приложения максимального давления формования, является актуальным. Реализация данных требований позволит обеспечить заданное содержание наполнителя, снизить пористость материала, уменьшить

усадочные напряжения и вероятность образования трещин, что повысит герметичность и влагостойкость доработанной зоны конструкции.

2.ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К РЕМОНТУ ПОВРЕЖДЕННЫХ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ПКМ

Как было отмечено ранее, в процессе эксплуатации летательных аппаратов возможны повреждения отдельных участков планера. В процессе ремонта силовые элементы с большими повреждениями нужно удалять. Замена поврежденного силового элемента в подавляющем большинстве случаев требует конструктивного изменения ремонтируемого участка. При этом меняются прочность, жесткость и устойчивость силового элемента, увеличивается масса конструкции и возникает опасность нарушения внешних обводов несущих поверхностей. Значительные отклонения перечисленных параметров от исходных значений могут вызвать нарушение работоспособности отремонтированных участков и всего летательного аппарата в целом. Отклонение жесткости отремонтированного участка от исходной вызывает изменение величины упругой деформации в процессе полета и искажение геометрической формы внешних обводов, т.е. изменение аэродинамических характеристик и ухудшение летных качеств летательного аппарата. Как увеличение, так и уменьшение жесткости вызывает перераспределение нагрузки, вызывающее уменьшение выносливости перегруженного элемента.

Примером неправильного ремонта может служить замена части углепластиковой обшивки на СТЕКЛОПЛАСТИКОВУЮ с несоблюдением схемы армирования обшивки. При упругом растяжении панели на величину Δl более жесткая углепластиковая обшивка воспримет во столько раз большую нагрузку, во сколько раз модуль упругости углепластика превосходит модуль упругости стеклопластика. Эта нагрузка будет передана на границе стыков ОБШИВОК, и напряжения в зоне стыка обшивки и ремонтной накладки (стеклопластик) возрастут примерно в то же число раз. За счет многократного повторения во время полета значительно возросшей нагрузки ремонтная стеклопластиковая заплатка может разрушиться в месте соединения с жесткой углепластиковой обшивкой в зоне их стыковки. Из приведенного примера видно, что отклонение жесткости отремонтированного элемента от исходной приводит к перераспределению нагрузки. Перегруженные элементы могут в процессе эксплуатации летательного аппарата разрушаться. Поэтому при установке ремонтной заплатки необходимо обеспечить применение материалов (наполнитель и связующее), аналогичных ремонтируемой обшивке с обязательным сохранением схемы армирования наполнителя в обшивке согласно чертежу. Методы и способы обеспечения выполнения данных прочностных требований, предъявляемых к ремонтируемым зонам на агрегатах из ПКМ, будут отражены в технологических решениях настоящего учебного пособия.

Кроме того, очень важным моментом при выполнении ремонта является обеспечение равнопрочности и равножесткости ремонтируемого участка и агрегата в целом [5].

Характерной особенностью работы силовых элементов планера является то, что каждый из этих элементов воспринимает определенную нагрузку при заданной величине деформации. Наиболее распространенными являются растягивающие напряжения. Исходя из закона Гука видно, что величина нагрузки, воспринимаемая силовым элементом, зависит от величины относительного удлинения \mathcal{E} и произведения модуля упругости (E) на площадь поперечного сечения силового элемента (F). При одинаковом удлинении равенство нагрузок, воспринимаемых разными силовыми элементами, будет лишь при условии равенства произведений EF , которое называется жесткостью силового элемента. При **ремонте** основным условием сохранения жесткости отремонтированного участка является соблюдение равенства $EF = E_H F_H$. Величины E и F этого равенства без индекса соответствуют модулю упругости материала и площади поврежденного силового элемента, а с индексом “**H**” - силовой (ремонтный) накладке. Таким образом, мы можем рассчитать потребную площадь поперечного сечения накладки:

$$F_H = \frac{E}{E_H} F \quad (9)$$

Отремонтированный участок силового элемента при **нагружении** растягивающей нагрузкой может разрушиться в одном из пяти мест:

- по ослабленному сечению обшивки;
- по компенсирующей прокладке, вклеенной в зону доработки;
- по стыку компенсирующей прокладки с обшивкой;
- по зоне перехлеста ремонтной накладки с обшивкой;
- по ремонтной накладке.

Если обозначить величины разрушающих усилий в указанных местах соответственно P_1, P_2, P_3, P_4 и P_5 , получим условие равнопрочности приклеивания ремонтной накладки:

$$P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = P_5 \quad (10)$$

Соблюдение данного условия обеспечивает достаточную прочность отремонтированного участка и минимальное увеличение массы конструкции. Однако точное соблюдение условия равнопрочности выполнить очень сложно, поэтому при ремонте условие достаточной прочности выражается неравенствами:

$$P_2 \geq P_1 ; P_3 \geq P_1 ; P_4 \geq P_3 \text{ и } P_5 \geq P_1 \quad (11)$$

Случай, когда P_2 , P_3 , P_4 и P_5 значительно больше P_1 , означает излишнюю прочность и увеличение масс компенсирующей прокладки и ремонтной накладки, а также увеличение зоны приклеивания (нахлеста) ремонтной накладки.

Величина разрушающей нагрузки P_1 определяется по величине минимальной площади поперечного сечения $F_{осл}$ и предела прочности σ_B материала ремонтируемой обшивки:

$$P_1 = F_{осл} \cdot \sigma_B = (F - \Delta F) \sigma_B, \quad (12)$$

где ΔF - уменьшение площади поперечного сечения обшивки за счет удаления дефектной части.

Аналогично можно найти величину разрушающей нагрузки P_2 :

$$P_2 = F_{пр} \cdot \sigma_{впр}, \quad (13)$$

где $F_{пр}$ - площадь поперечного сечения компенсирующей прокладки, вклеенной в зону доработки;

$\sigma_{впр}$ - предел прочности материала прокладки.

Из условия (11) и двух последних равенств находится необходимая величина предела прочности материала прокладки, вклеиваемой в дефектную зону, удовлетворяющая условию равнопрочности:

$$\sigma_{впр} = \frac{F - \Delta F}{F_{пр}} \sigma_B \quad (14)$$

Определив $\sigma_{впр}$ и зная материал, из которого она будет изготавливаться, можно определить схему армирования.

Величина разрушающей нагрузки P_3 определяется по формуле (15):

$$P_3 = F_{ст} \cdot \sigma_{ВМ}, \quad (15)$$

где $F_{ст}$ - площадь поперечного сечения стыковки компенсирующей прокладки и обшивки;

$\sigma_{ВМ}$ - предел прочности материала, которым стыкуется прокладка и обшивка.

Из условия (11) и равенства (12) и (15) находится необходимая величина предела прочности материала, которым осуществляется стыковка, удовлетворяющая условию равнопрочности:

$$\sigma_{ВМ} = \frac{F - \Delta F}{F_{ст}} \sigma_B \quad (16)$$

В практике материал, которым производится стыковка, является связующее препрега, из которого производится изготовление компенсирующей прокладки, соединение имеет недостаточно высокие прочностные показатели при сдвиге в тех случаях, когда оно применяется в качестве клея при соединении двух ОТВЕРЖДЕННЫХ обшивок или при соединении отвержденной обшивки и препрега. Кроме того, у данного соединения недостаточна сдвиговая прочность из-за соизмеримой длины соединения с толщиной обшивки. Для увеличения сдвиговой прочности, обеспечения равномерности передачи нагрузки предпочтительным является косое соединение ремонтируемой обшивки с компенсирующей заплатой. Расчет конфигурации косого соединения и технология его формирования будут рассмотрены далее в специальных разделах.

Величина разрушающей нагрузки P_4 определяется по формуле (17):

$$P_4 = F_{\text{ПЕР}} \cdot \sigma'_{\text{ВМ}}, \quad (17)$$

где $F_{\text{ПЕР}}$ - площадь поперечного сечения перехлеста ремонтной накладки и обшивки;

$\sigma'_{\text{ВМ}}$ - предел прочности материала, которым соединяется ремонтная накладка и обшивка.

Рассмотрев условие (11) и равенства (12) и (17), находим необходимую величину предела прочности материала, которым осуществляется соединение ремонтной накладки и обшивки:

$$\sigma'_{\text{ВМ}} = \frac{F - \Delta F}{F_{\text{ПЕР}}} \sigma_{\text{В}} \quad (18)$$

Для обеспечения более равномерного распределения нагрузки на клеящий материал необходимо в последних слоях ремонтной накладки сформировать край в виде зубцов с учетом схемы армирования.

Величина разрушающей нагрузки P_5 определяется по формуле (19):

$$P_5 = F_{\text{РН}} \cdot \sigma_{\text{ВРН}}, \quad (19)$$

где $F_{\text{РН}}$ - площадь поперечного сечения ремонтной накладки;

$\sigma_{\text{ВРН}}$ - предел прочности материала ремонтной накладки.

Из условия (11) и равенств (12) и (19) находим необходимую величину предела прочности материала, из которого изготавливается ремонтная накладка:

$$\sigma_{\text{ВРН}} = \frac{F - \Delta F}{F_{\text{РН}}} \sigma_{\text{В}} \quad (20)$$

Определив $\sigma_{ВРН}$ и зная материал, из которого она будет **изготавливаться**, можно определить схему армирования. При выборе схемы армирования за основу принимается существующая схема армирования ремонтируемой обшивки с возможным введением дополнительных слоев в определенных направлениях. Технические условия на ремонт силовых элементов планера требуют сохранение не менее 90% их исходной прочности. Применение косого соединения компенсирующей заплата с обшивкой и зубчатого окончания последних слоев ремонтной накладки позволяет обеспечить заданные требования при ремонте агрегатов из ПКМ.

3.ТРЕБОВАНИЯ К ОТРЕМОНТИРОВАННЫМ КОНСТРУКЦИЯМ

Первое требование к ремонту любой конструкции заключается в восстановлении необходимой прочности и жесткости. Это не обязательно означает полное восстановление прочности исходного материала **конструкции**, определяемой по прочности волокон на разрушение. Ко многим самолетным конструкциям предъявляются требования к динамической жесткости, стойкости и усталости, которые ограничивают расчетные значения предела прочности или предельной деформации до величины, значительно меньшей прочности материала на разрушение. Восстанавливаемая статическая прочность должна превышать расчетное значение предела прочности, по возможности максимально приближаться к прочности исходного материала конструкции в пределах, определяемых другими критериями. Реализованную технологию ремонта можно считать **успешной**, если достигнуто 90 % от прочности исходного материала. Значение восстановленной жесткости должно быть приближено к значению жесткости исходного материала, т.к. значительное снижение или ее увеличение отрицательно влияют на характеристики всей конструкции.

Второе требование к ремонту конструкции заключается в обеспечении качества аэродинамической поверхности. При расчете конструкции самолета присутствует критерий аэродинамической гладкости, который допускает только небольшие изменения поверхности.

Для наиболее критических зон самолета допускаются неровности поверхности до 0,5 мм, хотя к некоторым зонам могут предъявляться еще более жесткие требования. Поэтому методы ремонта должны удовлетворять заданным требованиям.

При выполнении ремонтных работ необходимо, чтобы возрастание веса было минимальным, особенно это требование значительно при ремонте рулевых поверхностей.

Материалы, используемые для ремонта конструкций из **ПКМ**, после их технологической обработки должны быть совместимы с условиями окружающей среды. На прочность ПКМ наибольшее влияние оказывают два фактора: изменения температуры и поглощение влаги. Выбор материалов и технологических процессов определяется требованием сохранения необходимой прочно-

сти при температурах от -60°C до $+150^{\circ}\text{C}$ в условиях влажной атмосферы. Кроме ТОГО, необходимо учитывать, что реальный ремонт будет выполняться на материалах, которые эксплуатировались в течение некоторого времени и имеют повышенную влажность.

Применяемые материалы и методы ремонта должны обеспечить долговечность конструкции в течение всего срока эксплуатации самолета.

В реальной ситуации при проведении ремонта придется сделать выбор между ремонтом поврежденной конструкции на самолете или в условиях авиационных баз. Этот выбор, т.е. доступность ремонта, определяется такими факторами, как легкость съема поврежденной конструкции, время вынужденного простоя самолета, наличие запасных частей, возможность доступа к повреждению с двух сторон или только с одной стороны.

4. ВИДЫ ДЕФЕКТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПРИЧИНЫ ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ

При изготовлении конструкций из ПКМ имеет место большое число факторов, влияющих на их свойства. Многие из этих факторов взаимосвязаны. Разрушение, определяющее предел прочности конструкций, имеет прогрессирующий характер и возникает из-за местных дефектов и концентрации напряжений в материале [6].

Известно, что на прочность ПКМ влияет наличие пустот или газовых пузырьков, качество связи между наполнителем и полимерной матрицей, а также дефекты поверхности, нарушающие целостность и непрерывность армирования. Рассмотрим кратко каждый дефект.

Наличие пустоты в ПКМ приводит к снижению прочности при растяжении, сжатии из-за уменьшения поперечного сечения конструкции. Зависимость кажущейся прочности от объема пустот рассчитывается по формуле (21):

$$\sigma = a_s \left[1 - \left(\frac{V_s}{V} \right)^{2/3} \right], \quad (21)$$

где a - кажущаяся прочность материала;

σ_s - прочность твердого вещества материала;

V_s - объем пустот;

V - полный объем материала.

Полный объем материала равен сумме объема твердого вещества и объема пустот. Экспериментальные данные [6] показывают, что при объеме пустот в стеклопластике 5%, предел прочности при растяжении снижается в 1,15 раз, а при 10% соответственно в 1,25 раз.

Большое значение для механических свойств имеет прочность связи между волокнами наполнителя и полимерной матрицей.

Необходимо обеспечивать при выборе составляющих ПКМ и при изготовлении конструкций наличие химических связей между полимерной матрицей и волокном, а также механического "обжатия" волокон.

Однако, если не обеспечивается заданная влажность наполнителей при производстве препрегов и их хранении, то прочностные свойства пластиков значительно снижаются и приводят к дефектам в эксплуатации, т.к. нарушается связь между волокном и матрицей, обшивками и наполнителем.

Рассмотрим влияние дефектов поверхности на прочность конструкций. Дефекты поверхности могут возникать при изготовлении конструкций, а также и при их эксплуатации. Данный вид дефектов нарушает целостность и непрерывность армирования. К дефектам поверхности относятся складки слоев наполнителя, места соединения краев одного или нескольких слоев наполнителя встык или внахлест, макроскопические трещины, царапины, надрезы и т.п.

Наличие складок приводит к уменьшению прочности при растяжении и сжатии, наличие поверхностных надрывов приводит к падению прочности при растяжении, расслоению обшивок, т.к. превышение предела прочности при сдвиге связующего приводит к отслоению концов разрезанных волокон, а в дальнейшем к полному разрушению конструкции.

Для оценки влияния дефектов на прочность конструкции необходимо знать, в каких условиях будет работать материал конструкции. Возможно, что один и тот же материал, имеющий некоторые дефекты, в одних условиях будет работать удовлетворительно, а в других - в нем могут развиваться имеющиеся дефекты.

Трещины в матрице являются концентраторами напряжений и влияют на прочностные характеристики, они развиваются быстрее, чем расслоение, могут иметь разветвления и приводят к резкому разрушению матрицы между слоями армирующего материала.

Таким образом, основными причинами разрушений (полных или частичных) ПКМ являются [8]:

разброс физико-механических и геометрических параметров матрицы и армирующего материала;

недостаточно хорошие адгезионные и **КОГЕЗИОННЫЕ** характеристики матрицы и армирующего материала, клеевых материалов;

остаточные напряжения в матрице;

внутренние технологические микродефекты волокна, матрицы на границе раздела "волокно - матрица" (поры, трещины, расслоения, раковины, складки);

поверхностные дефекты (риски, царапины, складки, трещины, **НАХЛЕСТЫ** препрега и др.).

Исходя из этого дефекты можно разделить на два класса: дефекты, не развивающиеся при работе конструкции из ПКМ, и дефекты, развивающиеся в

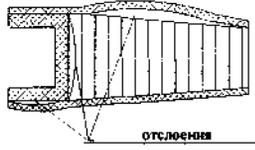
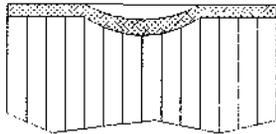
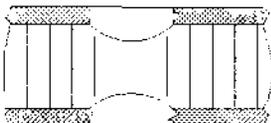
процессе эксплуатации и вызывающие ухудшение эксплуатационных характеристик, а иногда приводящие к катастрофическим последствиям.

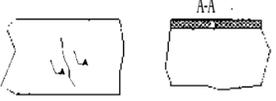
Наиболее часто встречающиеся дефекты конструкций из ПКМ показаны в табл. 1.

Таблица 1

Виды дефектов конструкции из ПКМ и причины их возникновения

№ п/п	Наименование дефекта	Местоположения дефекта	Характеристика дефекта	Эскиз дефекта	Причина возникновения
1	2	3	4	5	6
1	Царапины: а) в матрице (в связующем), б) неглубокая царапина в наполнителе (в ткани, ленте)	По всему полю агрегата По всему полю агрегата	Щелевое несквозное повреждение Глубина менее 25% толщины обшивки		Небрежные: транспортировка, хранение, эксплуатация Небрежные: транспортировка, хранение, эксплуатация
2	Расслоение	По всему полю агрегата	Нарушение межслойной связи обшивки		Нарушение технологии изготовления конструкции (разгерметизация вакуумного мешка в процессе формования обшивки, некачественный препрег, остатки пленки подложки)

1	2	3	4	5	6
3	Отслоение	Обшивка –сотовый наполнитель; обшивка – каркас; каркас – сотовый наполнитель	Нарушение целостности клеевых соединений		Нарушение технологии сборки-склейки агрегата, недопустимо высокие акустические нагрузки, накопление влаги
4	Вмятина	Обшивка –сотовый наполнитель	Деформация обшивки и сотового наполнителя		Небрежная транспортировка, хранение, механические повреждения вследствие столкновения с посторонними предметами
5	Пробоина а) односторонняя б) сквозная	По всему полю агрегата По всему полю агрегата	Местное разрушение в одной обшивке и сотовом наполнителе Местное разрушение в обеих обшивках и сотовом наполнителе	 	Небрежная транспортировка, хранение, механические повреждения вследствие столкновения с посторонними предметами То же

1	2	3	4	5	6
6	Трещина	По всему полю агрегата	Щелевое сквозное нарушение целостности обшивки		Неравномерные напряжения, недопустимо высокие нагрузки

5. МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И ОЦЕНКИ ДЕФЕКТОВ

Существующая технология изготовления конструкций из ПКМ и сотовых заполнителей не достаточно совершенна, поэтому, естественно, в них появляются дефекты, которые снижают прочность конструкций. Дефекты могут так же возникать из-за небрежности при эксплуатации конструкций. Для повышения надежности изделий необходимы методы неразрушающего контроля (дефектоскопия), обеспечивающие выявление дефектов в конструкциях из ПКМ и сотовых заполнителей. Для контроля качества применяют главным образом методы, основанные на возбуждении в исследуемом агрегате упругих колебаний звукового или ультразвукового диапазона. К этим методам относятся: метод свободных колебаний многократных отражений, ультразвуковой теневой метод, акустический ИМПЕДАНСНЫЙ метод и т.д. Дефект в этом случае отмечает-ся либо по изменению (уменьшению) фиксируемой прибором общей толщины проверяемой обшивки в зоне нарушения, либо по резкому изменению амплитуд резонансных пиков на экране дефектоскопа, обусловленному влиянием дефекта на коэффициент отражения упругих волн от границы раздела соединяемых элементов конструкции. Акустический импедансный метод, наиболее распространенный в промышленности, позволяет обнаружить зоны нарушения обшивки с элементами жесткости [9,10,11] (лонжероном, нервюрой и др.) и сотовым заполнителем. Для контроля и выявления размеров отслоений и расслоений ИМПЕДАНСНЫМ акустическим методом используют приборы типа АД-42И, ИД-91М [12]. На эффективность импедансного метода влияют те параметры конструкции, от которых зависит импеданс на участках с хорошим соединением и в зоне дефекта. К числу этих параметров относятся:

жесткость обшивки;

плотность материала обшивки;

суммарная жесткость соединяемых с обшивкой элементов конструкции;

суммарная масса внутренних элементов конструкции, приходящаяся на единицу поверхности конструкции;

размер ячейки, толщина и материал высота заполнителя.

При контроле многослойных конструкций со сплошным внутренним элементом (соединение обшивки с лонжероном) уменьшение толщины, модуля упругости и плотности материала обшивки при прочих равных условиях влечет

за собой повышение чувствительности метода. При увеличении толщины обшивки чувствительность метода снижается.

Акустический метод свободных колебаний основан на ударном возбуждении свободно затухающих упругих колебаний широкого диапазона частот в контролируемой зоне конструкции и регистрации изменения спектра применяемых сигналов. Метод является приборным вариантом метода простукивания, в котором человеческий слух заменен специальным приемником и спектроанализатором. Метод свободных колебаний применяют для контроля клеевых многослойных конструкций с обшивками (из ПКМ) толщиной более 2,0 мм. Признаком наличия дефекта при контроле методом свободных колебаний является такое изменение спектра упругих колебаний конструкции в зоне контроля, при котором он смещается в область высоких частот, и наблюдается заметное изменение амплитуды принятого сигнала. Для контроля методом свободных колебаний используют приборы АД-5ЛЦ, АД-60С.

Ультразвуковой теневой метод основан на излучении и приеме высокочастотных колебаний, однократно прошедших через контролируемый объект. Признаком дефекта является уменьшение амплитуды прошедшего сигнала. Контроль осуществляется двухсторонним доступом к конструкции и строгим совпадением акустических осей излучателя и приемника. Теневой метод применяют для контроля слоистых пластиков и их соединений типа ЛИСТ-ЛИСТ с толщиной пакета до 20 мм, а также сотовых конструкций с толщиной до 15 мм. Для контроля теневым методом используют приборы типа УД 2-16, УД-23УМ, УД2-12 с прямыми и катящимися преобразователями.

Выбор метода контроля осуществляют с учетом конструктивно-технологических особенностей контролируемой конструкции (сочетание материалов, толщин элементов, условий доступа, требуемой чувствительности к дефектам, состоянию поверхности и др.) и реальных возможностей типа прибора.

При анализе механических повреждений конструкций из ПКМ необходимо учитывать, что размер невидимого (внутреннего) повреждения может быть значительно больше внешнего (видимого) повреждения. Площадь дефектов измеряют с помощью сетки, нанесенной на трафарет из прозрачного материала.

В общем случае для выбора метода контроля необходимо руководствоваться следующими принципами.

Для выявления **непроклеев** типа расслоений в многослойных конструкциях с легким наполнителем в зависимости от толщины обшивки рекомендуется:

для обшивки толщиной 0,45... 1,5 мм - **импедансный** метод с совмещенным преобразователем;

для обшивки толщиной 1,5...2,0 мм - один из вариантов **импедансного** метода или метод свободных колебаний;

для обшивки толщиной более 2,0 мм - метод свободных колебаний или ультразвуковой теневой метод.

Минимальный диаметр выявляемых дефектов 10 ... 30 мм.

В некоторых случаях при ориентировочной оценке наличия дефектов возможно осуществлять простукивание агрегата стальными палочками диаметром 6-8 мм, длиной 70-100 мм с закругленными торцами, ударяя ими с высоты 50-60 мм по обследуемой **зоне, или** эбонитовым, текстолитовым молоточками. На участках, где есть отслоения или расслоения, звук более глухой.

В процессе эксплуатации агрегатов с сотовым наполнителем происходит накопление влаги, причем преимущественно за счет разницы давления воздуха на уровне земли и на высотах, где эксплуатируется изделие. При наличии повреждений обшивок или расслоений в процессе эксплуатации в сотовых конструкциях или отдельных зонах, соединяющихся с атмосферой, создается разрежение, из-за которого в агрегат на уровне земли засасывается атмосферный воздух с водяными парами, которые внутри агрегата конденсируются и накапливаются.

Зависимость давления воздуха от высоты над уровнем моря, температуры кипения воды от давления, температуры воздуха от высоты над уровнем моря показана на рис.2.

Наличие влаги в сотовых конструкциях может вызывать:

коррозию фольги сотового наполнителя из алюминиевых сплавов;

разрушение сотового наполнителя (или всего агрегата) при замерзании

воды в холодное время года или на больших высотах;

отслоение обшивок на значительных площадях;

разбалансировку агрегатов.

Определение наличия влаги в сотовых конструкциях и ее удаление является одной из важнейших задач ремонта. Наличие влаги может быть установлено визуально, по признакам, перечисленным ниже, а **также** рентгеновским или акустическим **методами**.

Визуально наличие влаги можно обнаружить по следующим признакам:

подтекание влаги в узлах навески, в стыках обшивок, в неплотностях между обшивкой и каркасом;

вспучивание обшивок в результате расширения замершей воды;

отслоение обшивки от сот.

Обнаружение влаги в дефектах, связанных с механическими повреждениями (проколы, пробойны, трещины), **производят** с помощью полимерных полупрозрачных трубочек или жгутиков из фильтровальной бумаги, помещаемых в зону дефекта.

Обнаружение влаги в сотовых конструкциях возможно акустическим ударным методом с использованием специального дефектоскопа, по изменению периода колебаний ударного импульса. Настройка дефектоскопа производится по контрольным образцам, в которые вводятся различные количества влаги.

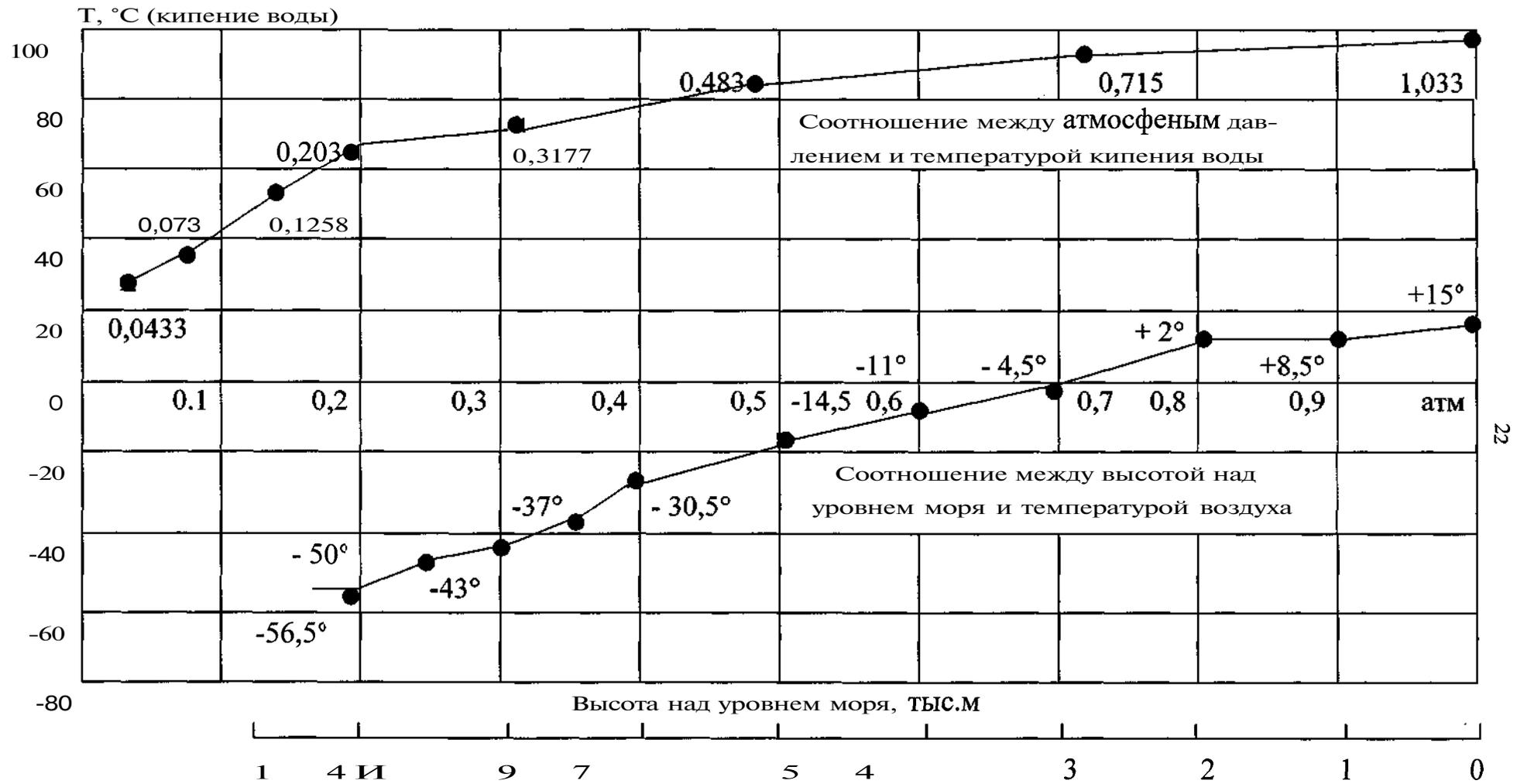


Рис.2. Зависимость давления воздуха от высоты над уровнем моря, температуры кипения воды от давления, температуры воздуха от высоты над уровнем моря

Образцы должны иметь характеристики, аналогичные контролируемым конструкциям (толщина и материал обшивки, высота и марка сотового заполнителя и т.д.). Данный метод позволяет не только определять наличие влаги, но и оценивать ее **КОЛИЧЕСТВЕННО**, начиная с высоты столба 1 мм в зонах размером (по площади) 1-2 ячейки.

При проверке агрегата на наличие влаги необходимо проконтролировать его на наличие отслоений обшивки от сотового заполнителя и каркаса.

Наличие влаги в агрегатах может вызвать коррозию металлических деталей, сотового заполнителя. Оценку коррозионного поражения проводят качественным и количественным химическим анализом [13]. Качественный химический анализ проводят для установления коррозионного поражения и определению его вида путем исследования продуктов коррозии. Наличие в продуктах коррозии ионов металлов различных частей корродирующей детали свидетельствует об их коррозии, а наличие ионов отдельных составляющих его - об избирательной коррозии. Однозначность результатов анализа достигается применением специальных реагентов, которые с ионами соответствующих металлов дают соединения определенной окраски.

Для взятия пробы сначала жирным карандашом или восковой палочкой проводят на детали круг диаметром 8-12 мм. На ограниченный участок наносят две-три капли раствора для снятия продуктов коррозии. Раствор перемешивают в течение 1-2 минут, переносят на стекло. При наличии **не/растворившихся** продуктов коррозии добавляют каплю раствора соляной или азотной кислоты (1:1). Раствор анализируют, чтобы выявить компоненты, определяющие наличие коррозионного поражения.

Количественный анализ проводят для установления степени коррозионного поражения, средней скорости коррозии, глубины проникновения коррозии, уменьшения толщины покрытия.

6.МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ РЕМОНТА. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К НИМ

Выбор марок материалов (препрегов, клеев, сотовых заполнителей) для проведения ремонтных работ зависит от вида и размеров дефекта, конструкции агрегата, условий эксплуатации изделия и условий проведения ремонта.

Выбранные материалы должны обеспечить выполнение следующих ремонтных работ:

заполнение пустот в агрегатах, возникших в результате небольших механических повреждений;

заполнение небольших объемов в сотовом заполнителе при ремонте отслоений "обшивки-соты";

вклеивание вставок сотового заполнителя;

устранение расслоений обшивок;

изготовление слоев внутренних заплат ("пломб") и внешних заплат.

С целью максимального восстановления прочности конструкции для проведения ремонтных работ необходимо применять марки материалов, из которого была изготовлена ремонтируемая **конструкция**.

В современном авиастроении для изготовления конструкций из ПКМ и соевых наполнителей применяются следующие препреги и клеевые композиции:

препреги на основе углеродных лент (тканей), стекло- и органотканей на связующих ЭДТ-69Н, УП-2227, ВФТ, ЭБСМ;

клеевые препреги на основе пленочных клеевых материалов и связующих ВК-36, ВК-36Р, ВК-41, ВК-51 и ЭДТ-69Н;

клеевые пленочные материалы ВК-36, ВК-36Р, ВК-41, ВК-51, ВКВ-3;

пастообразные клеевые материалы ВК-9, ВК-27, ВКВ-9.

Таким образом, выбор конкретного материала для проведения ремонта зависит от того, из каких марок материалов были изготовлены ремонтируемая конструкция. При выборе материалов необходимо учитывать также и температурные условия эксплуатации конструкции. Допустимая температурная область применения клеев и связующих, а также технологические режимы отверждения указаны в табл.2.

Таблица 2

Клеи и связующие, применяемые при ремонте ПКМ

№ П/П	Марки клея, связующего	Режимы отверждения клея, связующего			Температурная область применения
		Температура, °С	Время, ч	Давление, МПа	
1	2	3	4	5	6
1	ВК-36 (пленочный)	170...180	3	0,15	-60...+150 °С
2	ВК-36Р (пленочный)	170...180	3	0,15-0,30	-60...+150 °С
3	ВКВ-3(пленочный вспенивающийся)	120...130	3	Контактное	-60...+150 °С
4	ВК-41 (пленочный)	120...130	3	0,15-0,20	-60...+80 °С
5	ВК-51 (пленочный)	120...130	3	0,15-0,20	-60...+80 °С
6	ЭДТ-69Н (жидкое связующее)	120...130	3	0,15 (допускается вакуумн.)	-60...+80 °С
7	ВК-9 (пастообразный)	18...25	24	0,01-0,20	-60...+125 °С
		60...70	1	-//-	
8	ВК-27 (пастообразный)	18...25	24	0,01-0,20	-60...+125 °С
		60...70	1	-//-	
9	ВКВ-9 (пастообразный, вспенивающийся)	18...25	24	Контактное	-60...+125 °С

На основе клеев ВК-36, ВК-36Р, ВК-51, связующего ЭДТ-69Н могут быть изготовлены клеевые препреги, что позволяет произвести одновременное формование и приклеивание заплата к ремонтируемой зоне.

Все материалы, применяемые для ремонта, подлежат перед применением контролю при поступлении в производство, а **также** после истечения гарантийного срока хранения.

При контроле материалов из всех **параметров, характеризующих** материалы, **обязательно** проверяются важнейшие параметры, обеспечивающие качество ремонта. Для связующих материалов такими параметрами являются: вязкость, концентрация, содержание сухого остатка; для препрегов - содержание связующего, содержание летучих веществ, содержание растворимой смолы; для пленочных клеевых материалов - прочность при сдвиге, прочность при отрыве клеевого соединения сотового заполнителя с обшивкой, текучесть; для пастообразных клеев - прочность при сдвиге, жизнеспособность и т.д.

7. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ РЕМОНТА КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ремонт в производственных условиях имеет целью восстановление эксплуатационных характеристик агрегатов. Для обеспечения качественного ремонта необходимо выполнить комплекс подготовительных работ, обеспечивающих **температурно-влажностный** режим в помещении (температура не ниже $+18^{\circ}\text{C}$, относительная влажность не выше 75%).

При подготовке к устранению конкретного дефекта необходимо:

определить зону повреждения;

определить границу повреждения;

определить толщину обшивки, её состав и тип заполнителя в зоне ремонта;

подобрать соответствующие методы работы, оборудование, оснастку, материалы;

изучить правила безопасности работ.

Перед выполнением ремонта зона работ должна быть очищена от загрязнений на 350 мм кругом от края дефекта. Установка заплат на ремонтируемую зону может быть выполнена по двум схемам: приклеивание заранее изготовленных заплат и формование заплат из слоев препрега в специально вырезанном в обшивке углублении с частичной заменой (при необходимости) заполнителя. Вторая схема является более предпочтительной, так как позволяет восстанавливать до 91% исходной прочности [14].

Для определения степени пригодности агрегатов из ПКМ к эксплуатации все имеющиеся на них дефекты, а также выполненный ремонт надлежит наносить на схемы агрегатов с указанием приблизительного контура дефекта, его вида, размеров и расстояния до кромки агрегата. Схемы сохраняются в течение всего срока эксплуатации агрегатов.

Технологический процесс ремонта агрегатов начинается с выполнения операции разметки дефектных зон, которая осуществляется графитовыми карандашами, цветными стержнями по ЛКП. Затем производится разметка ремонтируемой зоны агрегата, которая ограничивается плавными линиями с минимальным радиусом кривизны 10 мм. Контур вырезаемого участка отстоит не менее чем на 8-10 мм от повреждения. Проведение дальнейших технологических операций зависит от вида дефекта, поэтому нами будет рассмотрено выполнение ремонта всех видов дефектов согласно классификации [14], приведенной в табл. 1.

7.1. Устранение царапин

Устранение царапин в матрице, которые не затрагивают наполнитель, производится нанесением шпателем клея ВК-9 (или ВК-27) на предварительно обработанный мелкой наждачной бумагой дефектный участок на ширине 5 мм на всю глубину царапины. На зону ремонта прикатывается пленка из фторопласта, устанавливается пластина толщиной 0,3-0,5 мм, груз и проводится отверждение клея по режимам, указанным в табл.2. Устранение неглубоких царапин (глубина менее 25% толщины обшивки) производится по следующей технологии:

удаляется зашкуриванием лакокрасочное покрытие из зоны ремонта согласно разметки;

обрабатывается мелкой наждачной бумагой участок шириной 10-15 мм на всю длину царапины и на половину ее глубины;

зашкуривается наждачной бумагой царапина на всю глубину при ширине примерно 5 мм и зона 25-30 мм кругом царапины. После удаляется чистой сухой кистью пыль с дефектной зоны;

изготавливаются и приклеиваются (приформовываются) 1-2 слоя препрега (можно использовать стеклоткань, пропитанную клеем ВК-9 или ВК-27 без наполнителя) в зависимости от глубины царапины. Нахлест препрега в обе стороны от царапины не менее 60 мм;

технология приформовывания слоев препрега будет рассмотрена позже при описании технологического процесса ремонта отслоений обшивки от соотопного заполнителя и пробоин агрегатов с частичной заменой обшивки.

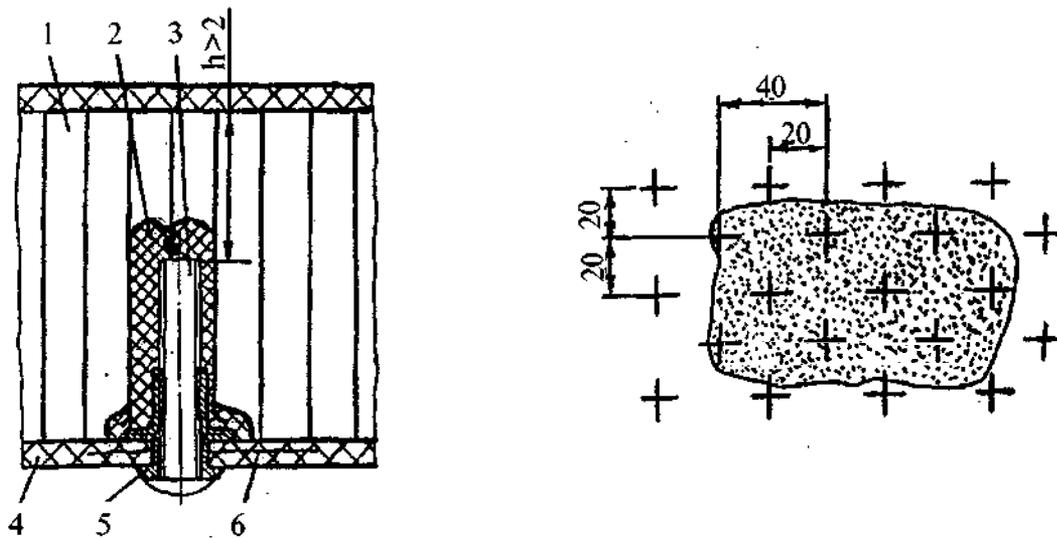
Устранение глубоких царапин производится аналогично устранению трещин.

7.2. Устранение расслоений

Технологический процесс устранения расслоений обшивки зависит от места его обнаружения. Расслоения могут быть по периметру или по полю обшивки.

При обнаружении расслоения по периметру обшивки его устраняют следующим образом. Первоначально очищается дефект от старого связующего наждачной бумагой или тонкой пластиной с насечками. Зашприцовывается клей или связующее с помощью шприца (при необходимости можно подогреть до температуры 40-50 °С), плотно сжимается зона ремонта вручную. Удалив излишки связующего или клея салфеткой, смоченной в ацетоне, собирается технологический пакет из антиадгезионной пленки (фторопластовая, полипропиленовая), нагревателя, термопары, цулаги, теплоизолятора. С противоположной стороны укладывается (к обшивке) пористая резина и сверху на нее металлическая пластина. Устанавливаются струбцины с тарированной затяжкой и проводится соответствующий режим отверждения связующего или клея.

Устранение расслоений по полю обшивки осуществляется сверлением отверстий в зоне ремонта (рис.3). В отверстия устанавливаются гайки-пистоны, предварительно обезжиренные в бензине и ацетоне. Сушка после обработки каждым растворителем не менее 15 мин при комнатной температуре. Перед сборкой винт и пистон обмазываются клеем (например ВК-9). Излишки клея удаляются аккуратно. Длина винта должна быть меньше высоты сотового заполнителя в зоне ремонта. Через отверстия в гайке - пистоне зашприцовывается клей и устанавливается винт. Проводится режим отверждения клея.



Разметка зоны дефекта для установки гаек-пистонов

Рис.3. Ремонт расслоений с установкой гаек-пистонов

- 1 - ремонтируемый агрегат; 2 - клей, зашприцованный в зону ремонта;
- 3 - винт, установленный в гайку-пистон; 4 - расслоившаяся обшивка;
- 5 - гайка-пистон; 6 - расслоение

7.3. Устранение отслоений

В трехслойных конструкциях из ПКМ с сотовым наполнителем возможны следующие отслоения:

- отслоение обшивки от сотового наполнителя;
- отслоение сотового наполнителя от каркаса;
- отслоение обшивки от каркаса.

Технологические приемы по устранению указанных отслоений отличаются друг от друга, поэтому рассмотрим отдельно каждый вид отслоений. Однако общей технологической операцией, предшествующей любому виду ремонта, является удаление влаги из сотовых конструкций, что и будет рассмотрено ниже.

7.4. Удаление влаги из сотовых конструкций

Влага накапливается в местах агрегата, где имеются механические повреждения, а также в местах агрегата вблизи узлов навески и стыках нервюр с лонжером. После проведения контроля на наличие влаги в агрегате, в зонах, где она была обнаружена, а также в зонах механических повреждений и отслоений выполняется комплекс работ по удалению влаги. Технологические приемы и оснащение незначительно отличаются друг от друга независимо от того, в какой зоне производится удаление влаги (обшивка - сотовый наполнитель; каркас - сотовый наполнитель). При удалении влаги из зоны "каркас - сотовый наполнитель" вскрываются технологические отверстия в деталях каркаса, а при наличии анкерных или колпачковых анкерных гаек в каркасе через их отверстия протыкается или просверливается вспенивающаяся клеевая композиция на глубину в сотах не более 10 мм (диаметр отверстия составляет 2-2,5 мм). При удалении влаги из зоны "обшивка - сотовый наполнитель" рассверливаются отверстия диаметром $3,6 \div 3,8$ мм в шахматном порядке с шагом 60 мм. На технологические отверстия и в анкерные гайки устанавливаются штуцеры (рис.4) для подключения к вакуумной системе. Штуцеры на агрегате закрепляются с помощью герметика (ВИКСИНТ У-2-28, ВГО-1 и т.п.) или резиновых уплотнительных колец. Штуцеры могут быть изготовлены из прозрачных материалов для визуального наблюдения за процессом удаления влаги.

Агрегат помещается в дренажные слои из ткани, и собирается вакуумный мешок (рис.5). Собранный технологический пакет помещается в термокамеру или устанавливается снизу система нагрева. Создается под мешком, в дефектной зоне, разрежение $0,03 \text{ МПа}$ ($0,3 \text{ кгс/см}^2$) и поднимается температура в зоне ремонта до $(90 \pm 5)^\circ\text{C}$ со скоростью 2 градуса в минуту. Выдерживается агрегат под разрежением и нагревом в течение 6...8 часов, сняв вакуум, охлаждается агрегат до 40°C . Повторно проверяется агрегат на наличие влаги. При повторном обнаружении влаги выпаривание влаги повторяется, а при ее отсутствии можно приступить к ремонту агрегата.

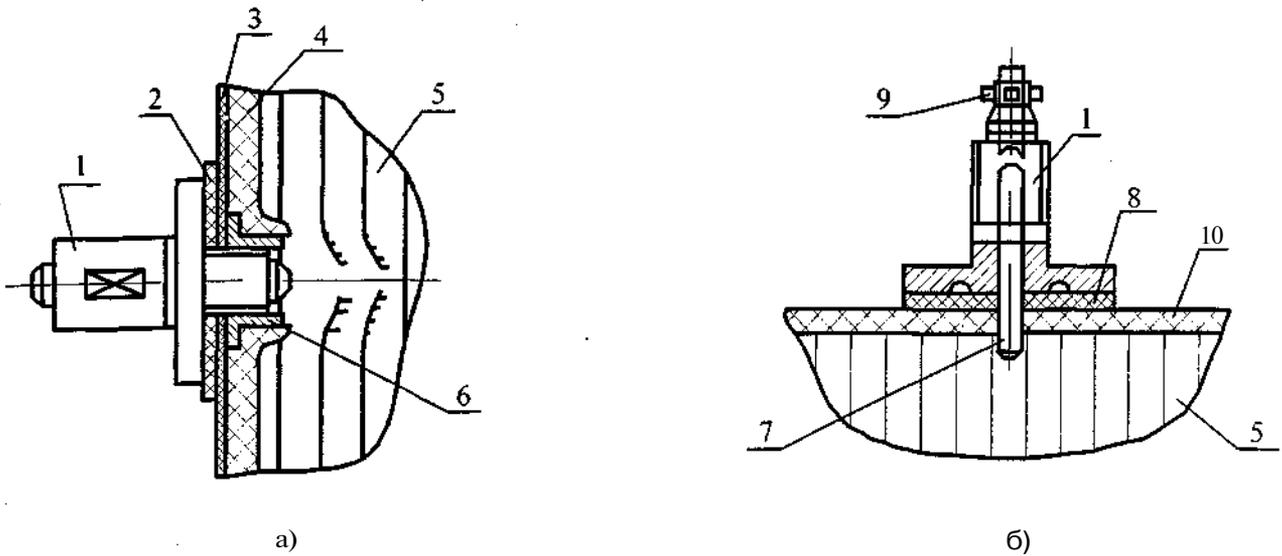


Рис.4. Установка штуцеров в детали каркаса и обшивку для удаления влаги : а) в каркас агрегата; б) в обшивку

1 - штуцер для удаления влаги; 2 - резиновая прокладка;
 3- стенка лонжерона; 4 - вспенивающаяся композиция;
 5 - сотовый наполнитель; 6 - анкерная гайка; 7 - ось;
 8 - герметик; 9 - гайка; 10 - обшивка с отверстием

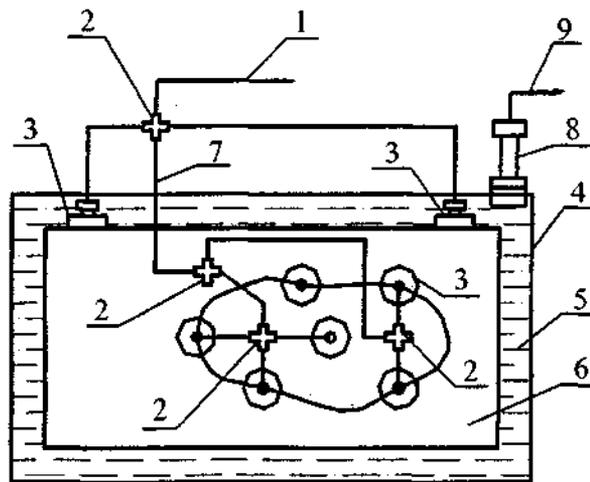


Рис.5.Схема подключения вакуумных насосов для удаления влаги
 1 - трубка, соединённая с вакуумным (или ЭЖЕКТОРНЫМ)
 НАСОСОМ; 2 - стандартные элементы (крестовина, тройник),
 3 - штуцер, прикрепленный к отверстию в дефектной зоне;
 4 - вакуумный мешок; 5 - дренажный слой; 6 - ремонтируемый
 агрегат; 7 - трубки для отсасывания паров воды; 8 - штуцер,
 установленный на вакуумный мешок; 9 - трубка, подсоединяю-
 щаяся к вакуумному насосу

7.5. Устранение отслоений обшивки от сотового заполнителя

Отслоение обшивки от сотового заполнителя на агрегатах, не испытывающих акустических и вибрационных нагрузок и не имеющих специального назначения, устраняется зашприцовкой клея в дефект и установкой заглушек из алюминиевого сплава (если обшивка из стеклопластика) или из титана (рис.6). Отверстия под зашприцовку клея и установку заглушек сверлятся в шахматном порядке с шагом 20 мм, если дефект шире 40 мм. Глубина сверления 3-5 мм. После сверления отверстий удаляется из зоны обработки пыль и стружка пылесосом.

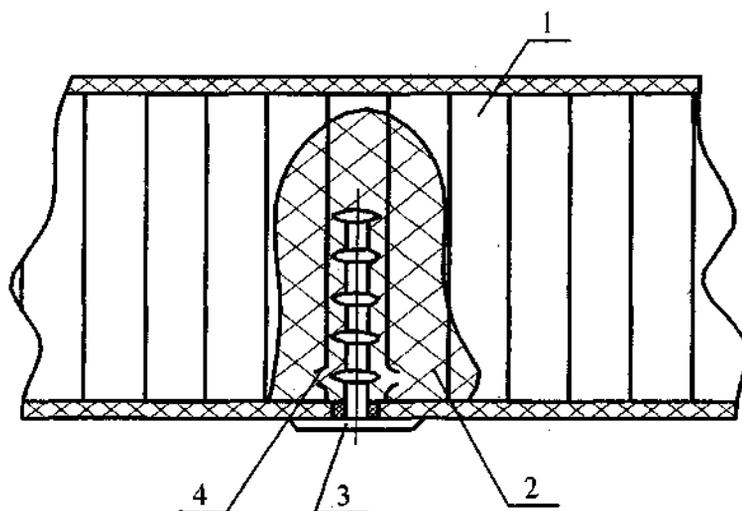


Рис.6. Ремонт отслоений с установкой заглушек типа "Винт"

1 - ремонтируемый агрегат; 2 - клей, зашприцованный в зону ремонта; 3 - заглушки; 4 - отверстие в стенке сот для затекания клея

При ремонте агрегатов, находящихся в зоне возможного попадания на них нагретых газов от двигателя, зашприцовка производится с использованием **клеев, имеющих** повышенную теплостойкость.

Заглушки в условиях стоянки самолета можно устанавливать только на нижние поверхности, т.к. их установка проводится одновременно с зашприцевкой клея в дефект. При необходимости установки заглушек на верхних поверхностях агрегата он должен быть демонтирован с самолета. Для обеспечения равномерного и полного распределения клея по всей поверхности дефекта между обшивкой и сотовым заполнителем, выполняется дренажирование стенок сотового заполнителя специальным приспособлением (рис.7). Отверстия в стенках сот должны иметь круглую форму и располагаться на расстоянии 0,5 ... 1,5 мм от просверленной обшивки.

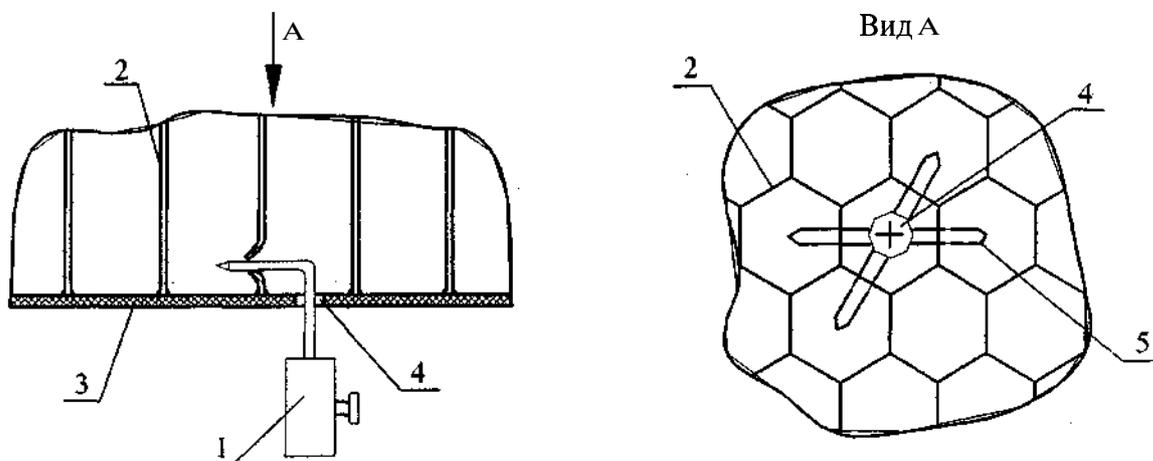


Рис.7. Схема дренажа сотового заполнителя перед зашприцовкой клея

- 1 - приспособление для дренажирования; 2 - сотовый заполнитель;
3 - обшивка ремонтируемого агрегата; 4 - отверстие; 5 - дренажные каналы в сотовом заполнителе

Подготавливается заглушка к установке в агрегат (укорачивается, обезжиривается), и производится зашприцовка клея в отверстие в агрегате. Для ремонта в основном применяются пастообразные клеи типа ВК-9, ВК-27. Они обладают высокой **ВЯЗКОСТЬЮ**, и для нагнетания их в агрегат должны применяться специальные шприцы. Наибольшее применение нашёл шприц с винтовым штоком, обеспечивающий нагнетание холодных пастообразных клеев (рис.8). Он заполняется свежеприготовленным клеем, затем наконечник шприца вводится в отверстие **дефекта**, и клей выдавливается поворотом рукоятки. Зашприцовка клея прекращается при резком возрастании давления (усилия) шприцевания или при появлении клея из соседних отверстий. После окончания работы шприц должен быть обязательно промыт от остатков клея.

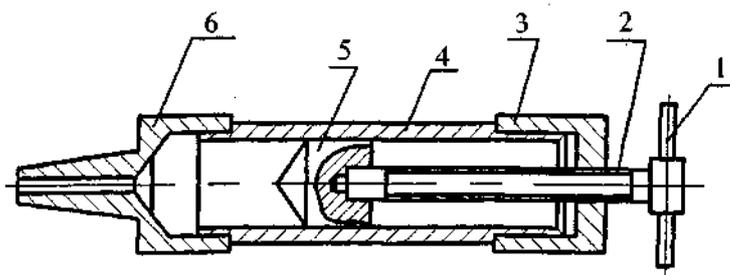


Рис.8. Шприц с винтовым штоком

- 1- рукоятка; 2 - винтовой шток; 3 - накидная гайка; 4 - корпус шприца; 5 - поршень; 6 - наконечник

алмазных зерен шлифовальными брусками типа БКВ, БП на керамических связках с абразивным зерном карбида кремния зеленого 63С, зернистостью 16,12, твердостью СМ при рабочей скорости.

Для обеспечения более высокой прочности соединения восстанавливаемой обшивки толщиной более 0,4 мм выполняется скос под углом $1-3^\circ$ в ней по всему периметру. Вырезка скосов в обшивке производится с применением пневмомашин и абразивных кругов (рис.9). Для обеспечения заданного угла скоса на поверхности пневмомашин укрепляются хомутики из мягкого материала, толщина которого определяется по формуле (22) [14]

$$h = \frac{L}{20 - (R' - R)}, \quad (22)$$

где h - толщина хомутика;

L - расстояние от конца абразивного круга до хомутика;

R' - радиус окружности абразивного круга;

R - радиус окружности корпуса пневмомашин.

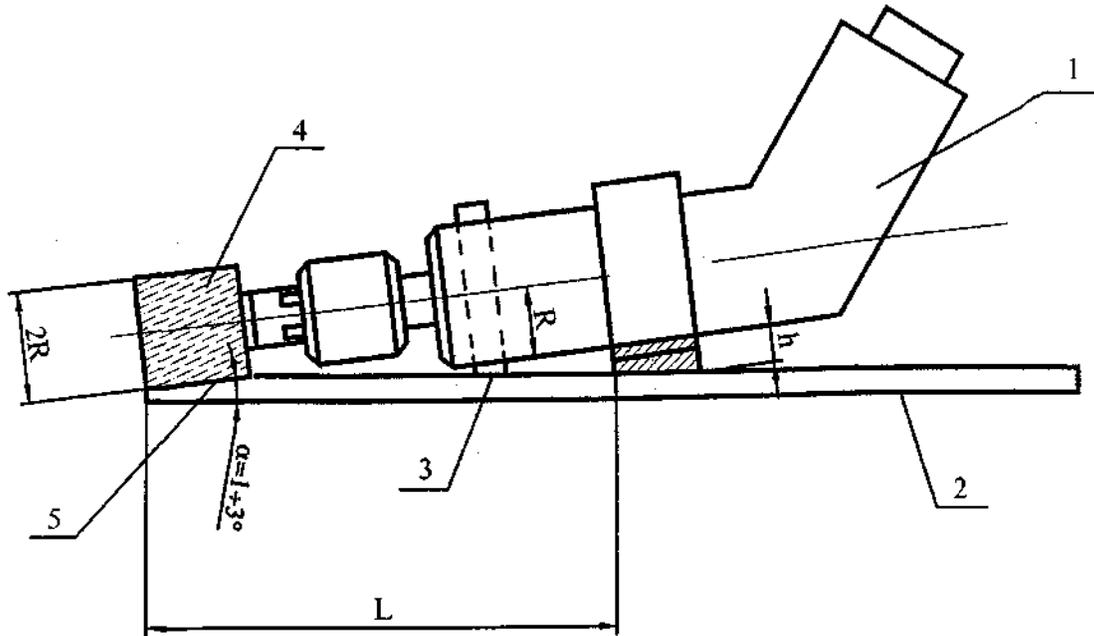


Рис.9. Обеспечение заданного угла скоса α в обшивках:

1 - пневмомашинка; 2 - обрабатываемая обшивка;

3 - дополнительный упор; 4 - абразивный круг;

5 - внутренняя кромка выреза в обшивке

При выполнении скоса не допускается смещение внутренней кромки отверстия в обшивке. Для более точной обработки скосов желательно на поверхности дрели укрепить дополнительные упоры.

После удаления дефектной обшивки проверяется состояние сотового заполнителя. Обращается особое внимание на наличие следов коррозионного поражения алюминиевого сотового заполнителя, отсутствие повреждения торцов граней ячеек сотового заполнителя, разрывов в местах стыковки сотового заполнителя и т.п. При несоответствии требованиям, предъявляемым к сотовому заполнителю, его удаляют. Для этого вырезается ножом поврежденный участок сотового заполнителя, линия реза по возможности должна быть простой формы. При использовании металлического сотового заполнителя прикатываются по линейке боковые поверхности в вырезе сотоблока согласно рис.10.

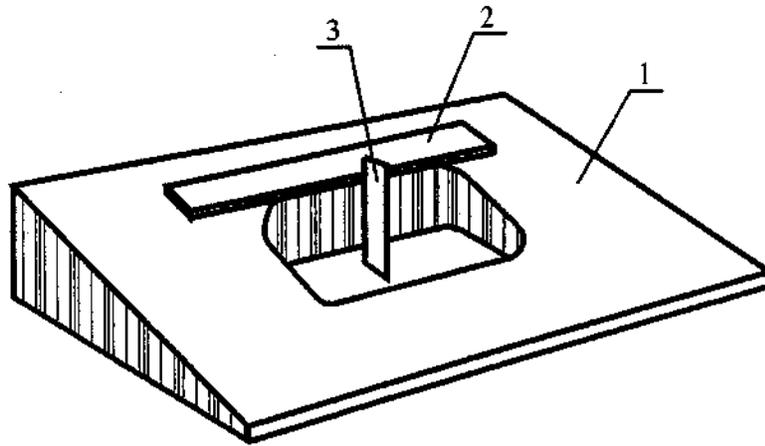


Рис.10. Прикатка граней металлического сотового заполнителя
1- ремонтируемый агрегат; 2 - линейка; 3 - пластина

Удаляются с поверхности противоположной обшивки остатки сотового заполнителя, вспенивающегося и пленочного клея **осторожно**, не повредив обшивку.

Проводятся работы по удалению влаги (независимо от того, была ли разгерметизация агрегата), т.к. в неметаллических деталях в процессе эксплуатации накапливается влага (до 1% по массе). Удаление влаги проводится лампами накаливания или медицинскими рефлекторами. Расстояние от нагревательных устройств до зоны ремонта выбирается требованием обеспечения на поверхности температуры 60-70°C, а время нагрева рассчитывается из расчета 1 час на каждые 0,3мм толщины материала обшивки.

Дополнительные работы по замене поврежденного сотового заполнителя заключаются в подборе и подгонке сотового заполнителя и его последующей вклейки в дефектную зону. Подбор сотового заполнителя зависит от того, из какого материала он изготовлен (алюминиевые заполнители, соты ПСП или ССП).

При замене металлического сотового заполнителя увеличивается размер заготовки на 5–8 мм на величину подмятая, а для неметаллического сотового заполнителя **ПОДМЯТИЕ** не производится, а размер заготовки строго соответствует контуру удаленного участка. Кроме **ТОГО**, учитывается направление расположения листов фольги, бумаги или стеклоткани в ремонтируемом сотоблоке. При ремонте клиновидных агрегатов высота вставки сот принимается на 1–2 мм больше, чем высота удаляемого участка (для последующей подгонки), а для панелей постоянной высоты высота сотовой вставки равняется высоте удаляемого заполнителя или больше на толщину удаленной обшивки. Соты ПСП и ССП перед использованием просушиваются при температуре 110°C в течение 1 часа.

После подгонки вставки сотового блока выполняется обезжиривание склеиваемых поверхностей, причем обезжириваются только металлические поверхности и сотовый заполнитель из алюминиевых сплавов. Обезжиривание сотового заполнителя производится в специальной ванне чистой жесткой волосяной кистью, смоченной в бензине, а затем в ацетоне, с сушкой после обработки каждым растворителем не менее 15 минут. Обезжиривается также и боковая поверхность на металлическом сотовом заполнителе ремонтируемого агрегата, куда клеивается вставка сот.

Раскраивается заготовка пленочного клея и прикатывается в зону ремонта к обшивке, удалив первоначально защитную бумагу, а после прикатки защитную полиэтиленовую пленку, а к боковой поверхности сотового заполнителя вставки прикатывается вспенивающаяся клеевая пленка **ВКВ-3**. Установив вставку сотозаполнителя в дефектную зону, прогревается через сотовый заполнитель пленочный клей с помощью рефлектора до температуры $50\text{--}60^{\circ}\text{C}$, и максимально вдавливаются соты в клей нажатием руки. Не допускается смятие заполнителя вставки. Фиксируется вставка липкой лентой, устанавливая ее на обшивке крест-накрест. Если агрегат имеет сложный контур или значительный размер дефекта, то желательно предварительно приклеить сотовый заполнитель, проверить наличие его **ВЫСТУПАНИЯ** над поверхностью агрегата, и если это наблюдается, то удалить согласно разделу 7.13. После выполнения подготовительных работ по клеиванию и подгонке вставки сотоблока можно приступить к изготовлению заплаты из отдельных слоев препрега. Для изготовления заплаты используются как предварительно изготовленный препрег на связующем, так и клеевой препрег, изготовленный из пленочных клеев горячего отверждения или пастообразных клеев холодного отверждения. Изготовление препрегов на связующих рассматривается в специальных курсах, посвященных технологии изготовления конструкций из **ПКМ**, а мы рассмотрим изготовление препрегов из клеев непосредственно на месте ремонта. Для изготовления препрегов используется сухая углеродная лента, стекло- и органоткани, переложенные пленочными клеями **ВК-36**, **ВК-41** или **ВК-51** с соотношением слоев ленты (ткани) и клеевой пленки **2:1**. Полученный препрег выкладывается на ремонтируемый агрегат через слой пленочного клея и формируется по режиму **отвержде-**

НИЯ пластиков (см.табл.2). Режимы отверждения препрегов соответствуют режимам отверждения клеев, использованных для их изготовления. Возможно получение препрега путем нанесения расплава соответствующего клея на сухую ленту или ткань, а также опрессовкой ленты, ткани соответствующим клеем, путем прокладки ткани, ленты и клеевой пленки между слоями пленки (полипропиленовой или фторопластовой). Режим опрессовки:

давление - 1,0 ... 2,0 МПа;

время - 10 минут;

температура - 80°C (клеи ВК- 41, ВК - 51) или 100°C (клей ВК-36).

При этом ориентировочное содержание связующего в препреге составляет 35 - 40% по массе.

Для изготовления препрега холодного отверждения один слой ткани, ленты укладывается на антиадгезионную пленку (полиэтиленовую). На ленту или ткань наносится неметаллическим шпателем свежеприготовленный клей до тех пор, пока наполнитель не пропитается клеем со стороны антиадгезионной подложки.

Заплата из отдельных слоев препрега, изготавливаемая на месте **ремонта**, состоит из двух частей: внутренней заплаты и внешней заплаты. Внутренняя заплата имеет форму круга или овала и предназначена для выравнивания заподлицо обшивки агрегата в зоне ремонта. Внешняя заплата в виде правильного или вытянутого восьмиугольника, дополняющая внутреннюю, предназначена для обеспечения работы под нагрузкой волокон наполнителя обшивки агрегата. Нахлест внешней заплаты по отношению к внутренней составляет от 30 до 350 мм в зависимости от **нагруженности** агрегата и величины зоны ремонта, при этом обеспечивается плавный сход слоев внешней заплаты с шагом 5-15 мм. Раскрой заготовок заплаты (внутренней и внешней) производится по выкройкам из плотной бумаги. По выкройкам из бумаги вырезаются слои заплаты из препрега. Защитные слои с препрега удаляются непосредственно перед выкладкой препрега. Количество слоев внутренней заплаты рассчитывается по формуле (23):

$$n = \frac{\delta_{од}}{\delta_M} , \quad (23)$$

где n - количество слоев препрега;

$\delta_{од}$ - толщина обшивки;

δ_M - толщины монослоя ткани или ленты, используемой для ремонта (без учета толщины клея, если используется клеевой препрег).

Последующий слой препрега должен отличаться от предыдущего на величину, учитывающую наличие скоса выемки в обшивке. Сборка заплаты производится отдельно на антиадгезионной пленке, теплостойкость пленки должна соответствовать температуре отверждения используемого клея или препрега.

Схема сборки и установки заплата из слоев препрега показана на рис.11. Размер наименьшей заготовки не менее чем на 2,5 мм превышает наименьший размер отверстий в ремонтируемой обшивке.

Равномерность НАХЛЕСТА слоев препрега рассчитывается по формуле (24):

$$b = \frac{l}{n}, \quad (24)$$

где b - величина нахлеста;

l - длина скоса углубления в обшивке;

n - число слоев, образующих внутреннюю заплату.

Направление нитей основы наполнителя определяется по чертежу на агрегате, а при отсутствии данных выдерживается симметричная выкладка, например, 0° , 90° , $\pm 45^\circ$, $+45^\circ$, 90° , 0° и т.д.

Направление 0° вдоль лонжерона или вдоль длины агрегата.

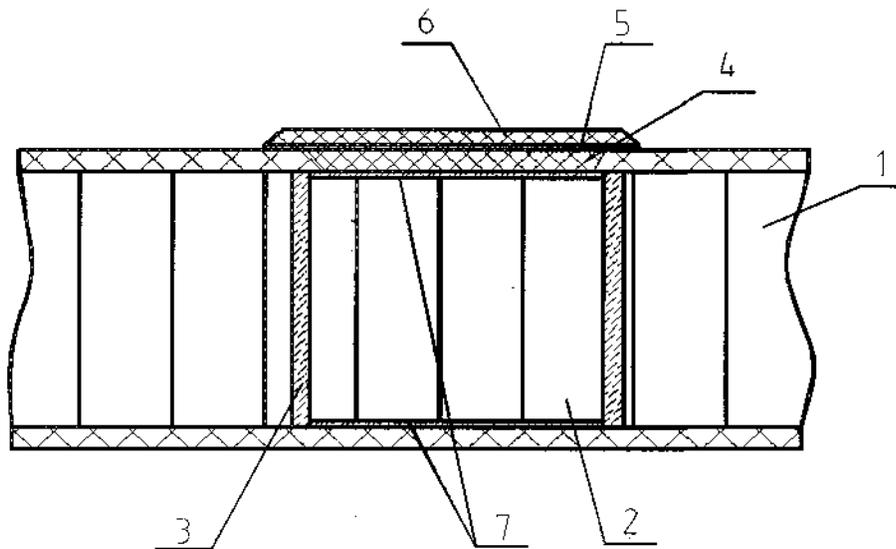


Рис. 11. Схема сборки и установки заплаты

- 1- ремонтируемый агрегат; 2 - вставки сотоблока;
- 3 - вспенивающийся клей; 4 - слой внутренней заплаты (пломба);
- 5 - пленочный армированный клей; 6 - слой внешней заплаты;
- 7 - пленочный клей

Перед установкой заплаты на зону ремонта укладывается пленочный клей, совместимый со связующим, которым пропитан препрег (например, клеевая пленка ВК-51 и связующее ЭДТ-69Н), использованным для изготовления заплата. После сборки и изготовления заплата проводится технологический процесс отверждения заплата и приклеивания их к сотовому наполнителю при температуре и избыточном давлении.

7.7. Расчет конфигурации косо́го соединения

При косо́м соединении внутренней заплата́ с ремонтируемой обшивкой нагрузка передается через клеящий материал со сдвигом, поскольку длина косо́го соединения велика по сравнению с толщиной слоистого материала. С уменьшением толщины одной составляющей сборки (например, исходного материала конструкции), толщина другой составляющей (пломбы) возрастает. Для анализа передачи нагрузки возможно применение метода, основанного на предположении, что в любом месте каждой составляющей сборки нагрузка пропорциональна продольной жесткости. Этот метод учитывает различную природу слоистых материалов и дает удовлетворительное описание сдвига в месте соединения, в конце каждого слоя со стороны соединения. Рассмотрим косо́е соединение, выполненное вровень с поверхностью, что очень важно для обеспечения аэродинамических качеств мест ремонта, и состоящее из идентичного материала с таким же количеством слоев. На рис.12 показано косо́е соединение и распределение нагрузок относительно сдвига в 16-СЛОЙНОМ материале с укладкой $[(0/\pm 45/90)_2]_2$ и в исходном материале конструкции.

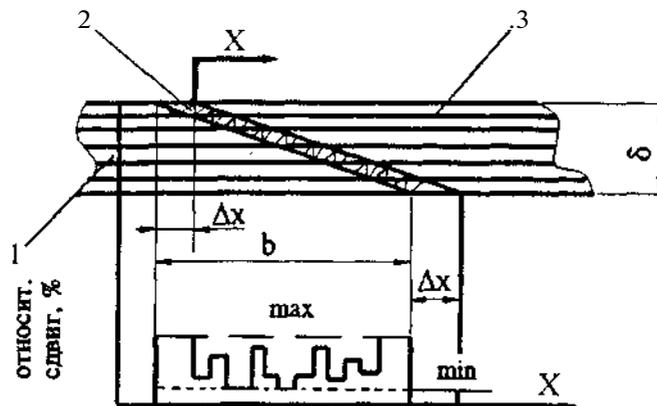


Рис.12. Анализ распределения сдвига для косо́го соединения

- 1- исходная обшивка конструкции; 2 - клеевой материал;
3- пломба; 5- толщина материала, b - ширина косо́го соединения,
 Δx - приращение косо́го соединения

Распределение жесткости в обоих слоистых материалах является функциями распределения слоев материала и упругих свойств слоя. Если принять за толщину слоя единицу, то можно определить относительное значение жесткости E_n для каждой составляющей сборки суммированием относительных значений E в каждой точке косо́го соединения; при этом толщина на приращение соединения возрастает на один слой. Зная E_n каждой составляющей сборки, найдем полное E_n и определяем относительную нагрузку в одной из составляющих на основе предположения о том, что нагрузка в каждой составляющей пропорциональна частному от деления E_n составляющей сборки на полное значение E_n . Разница в нагрузке в двух смежных точках определяется как среднее относительное сдвигающее нагружение F для приращения, а именно(25):

$$F_{i,i-1} = \left(\frac{L}{T}\right)_i - \left(\frac{L}{T}\right)_{i-1}, \quad (25)$$

где L_i - E_n левой составляющей в точке i ;
 T_i - E_n полное значение в точке i .

На диаграмме относительного сдвига (рис.12.) видно, что более сильный сдвиг появляется на тех "ступеньках" косоого соединения, которые образованы слоями более тонкой составляющей, ориентированными в направлении 0° . Прочность соединения обратно пропорциональна максимальному относительному сдвигу:

$$\sigma = \frac{\tau \cdot \Delta X}{F_{\max}}, \quad (26)$$

где m - предельная прочность на сдвиг клеящего материала;
 ΔX - приращение косоого соединения;
 F_{\max} - максимальный относительный сдвиг.

Реальное соединение не похоже на изображенное на рис.12, самое важное заключается в том, что пломба отверждается вместе с исходным материалом конструкции, и поэтому скос пломбы выполняется ступеньками, при этом каждый последующий слой ДЛИННЕЕ предыдущего. Совместное термоотверждение позволяет решить проблему подгонки пломбы, поскольку слои легко принимают форму выемки несмотря на то, что слои пломбы не скашиваются, равномерная передача нагрузки происходит через конец слоя длиной " ΔX ". Косоое соединение, выполненное точно с обеими поверхностями, короче длины скоса на $2(\Delta X)$. При определении конфигурации скоса необходимо решить задачу снижения максимального относительного сдвига с целью увеличения прочности соединения. Одним из способов является увеличение длины скоса, т. к. более длинный скос уменьшает среднее напряжение сдвига на любой ступеньке соединения, поскольку ступенька будет длиннее. Однако фактическое пиковое напряжение в конце самого длинного слоя пломбы, ориентированного в направлении 0° , СНИЗИТСЯ лишь немного, т.к. длина ступеньки в 15 - 20 раз превышает номинальную толщину слоя и это достаточно для напряжения слоя. Если дополнительно уложить на каждую поверхность с обеих сторон пломбы (не пересекая ее середину) слои в направлении 0° , то пломба оканчивается четырьмя слоями. Причем конечные слои ровно и перпендикулярно продольной оси обрезаны. Это позволит обеспечить более ВЫСОКУЮ прочность допустимого растяжения исходного материала в отличие от полученной в предыдущем варианте схемы пломбы. Особый интерес представляет изготовление пломбы с конечными слоями с вырезанными по краю зубцами. Форма вырезки края слоя показана на рис.13, обес-

печивает $\sim 100\%$ допустимого растяжения исходного материала. Зубцы можно вырезать с помощью обычных фигурных ножниц. Самый длинный слой исходного материала может фактически распределить нагрузку на клеящий материал значительно лучше, чем самый длинный слой пломбы, поскольку слой исходного материала скошен. На практике самый длинный слой скашивается не всегда. Если скос фактически пересекает внутреннюю поверхность (как и должно быть), край будет выглядеть немного неровным, но его не надо подравнивать, чтобы он казался ровным. Другой способ улучшения передачи нагрузки в конце скоса заключается в сдвиге нагрузки через две поверхности, а не через одну. При этом самый длинный слой пломбы удлинен, а с обратной стороны наложена одна небольшая заплатка из слоя, ориентированного в направлении 0° . Край обоих слоев вырезаны зубцами. Этих дополнений достаточно, чтобы изменить характер разрушения (при растяжении слоистого материала пломбы) и поднять эффективность соединения. Материал пломбы имеет меньшую прочность, а маленькая заплатка с обратной стороны вызывает эксцентриситет. Наиболее перспективным является размещение дополнительного слоя в каждом из трех направлений ($0, \pm 45^\circ$) с обеих сторон сложного образца с учетом допущения, что на исходный материал действуют нагрузки сдвига, продольного растяжения и сжатия.

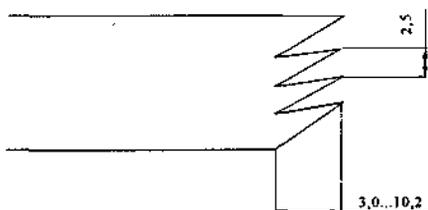


Рис.13. Вырезка края слоя

7.8. Устранение отслоений сотового заполнителя от каркаса

Для устранения данного дефекта после проведения работы по определению границ дефекта, засверливается в противоположных концах дефектной зоны два отверстия диаметром 3,8 мм (рис.14). Вначале отверстия сверлятся на глубину 1,5-2,0 мм так, чтобы не просверлить насквозь слой вспенивающейся композиции, изнутри прилегающей к каркасу. При сверлении отверстий давление на сверло (подача) минимально во избежание разрушения внутренних слоев пластины.

Удаляется стружка из агрегата пылесосом, и закрываются отверстия липкой лентой. В одном из отверстий протыкается липкая лента иглой для выхода воздуха при зашприцовке клея. Для исключения самопроизвольного вытекания клея устанавливается агрегат так, чтобы ремонтируемая стенка находилась в верхнем горизонтальном положении. Приготавливается вспенивающийся пастообразный клей холодного отверждения, и заполняется клеем шприц. Протыкается липкая лента второго отверстия, и зашприцовывается клей. Зашприцовку

клея производят до тех пор, пока клей не начнет самопроизвольно выдавливаться из противоположного отверстия. Удаляется липкая лента с отверстия, и закручивается винт М4 из титана или стали в одно отверстие, при установке винтов не допускаются контакты винтов с алюминиевым сотовым наполнителем из-за возможности контактной коррозии. Для этого винт при необходимости укорачивается. Повторяется операция установки винта во второе отверстие. Для обеспечения герметичности клеевого соединения оклеивается место ремонта 1-2 слоями стеклоткани Т-10-80 холоднополимеризующимся клеем. После выполнения указанных работ производится режим отверждения клея.

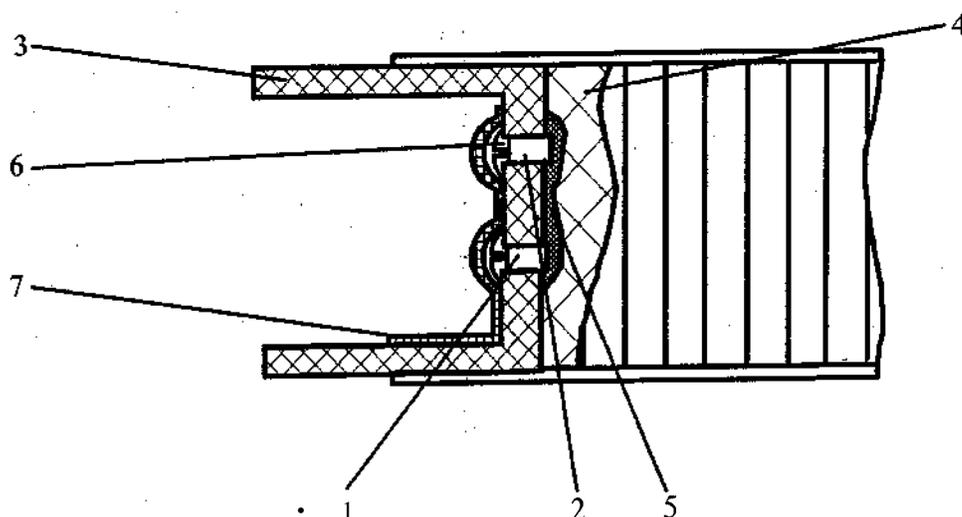


Рис.14. Ремонт отслоений "соты - каркас"

1 - отверстие для зашприцовки клея; 2 - отверстие для выхода излишков клея; 3 - деталь каркаса; 4 - "старый" вспенивающийся клей; 5 - клей, зашприцованный в дефект; 6 - винт-заглушка; 7 - ткань, пропитанная клеем

7.9. Устранение отслоений обшивки от каркаса

Данный вид дефекта бывает двух разновидностей:

с выходом отслоения на наружный контур и возможным введением клея в зазор между обшивкой и каркасом;

без выхода отслоения обшивки от каркаса на наружный контур.

Вторую разновидность дефекта устраняют **удалением** части обшивки и восстановлением ее путем одновременного формования из препрега и приклеивания к каркасу, что было описано в разделе 7.6.

Устранение отслоений обшивки от каркаса с выходом на наружный контур производится следующим образом. Первоначально необходимо убедиться в том, что отслоение не достигло сотового наполнителя, а в противном случае перед проведением работ проверяется отсутствие влаги в агрегате. Ремонт производится введением клея в зазор с помощью тонкой пластины либо зашприцовкой клея в том случае, когда ширина отслоения (зазор) превышает 1мм. Зашприцовку клея выполняют медицинскими иглами диаметром 1,0...1,5 мм с

помощью спецшприца, в котором клей может быть нагрет, чтобы значительно уменьшить его вязкость. Весь дальнейший ход выполнения ремонта описан в разделе 7.2 "Устранение расслоений".

7.10. Устранение трещин

Способ устранения трещин зависит от **требований**, предъявляемых к ремонтируемому агрегату. Если требования высоки, то необходимо выполнить работы по удалению части обшивки и восстановлению ее путем одновременного формования из препрега и приклеивания к заполнителю и каркасу агрегата.

Если возможно установить накладную заплату, то ремонт выполняется следующим образом. Первоначально учитывается местоположение трещины на агрегате. Трещина выходит на край обшивки, но не заходит или заходит на сотовый заполнитель и трещина не выходит на край обшивки. В том случае, когда трещина заходит на сотовый **заполнитель**, **возможно**, что в него попала влага, проводится проверка наличия влаги, а при ее присутствии дополнительно **проверяется**, **нет** ли отслоений обшивки от сотового заполнителя из-за замерзания влаги. В данном случае перед ремонтом трещины удаляется влага из агрегата и устраняется отслоение. Засверливается край трещины на всю толщину обшивки до клеевой композиции сверлом диаметром **2,0...2,5** мм с углом заточки **150...170°**, а в случае выхода трещины на край обшивки - сверлом диаметром **3,8** мм. В **случае**, **если** трещина не выходит на край **обшивки**, **сверлится** отверстие диаметром **3,8** мм, и затем контролируется наличие влаги в агрегате в зоне трещины. Сверление производится осторожно, чтобы не повредить деталь под обшивкой. После выполнения операции по сверлению отверстий и операции по контролю отсутствия влаги и удалению ее, если эта операция выполнялась, производят приклеивание накладной заплаты. Технология подготовки и приклеивания заплаты отличается специальными требованиями и будет рассмотрена в следующем разделе.

7.11. Выбор, подготовка и приклеивание заплаты

Наиболее предпочтительной формой заплаты является круглая или овальная формы. Нахлест заплаты определяется в зависимости от толщины ремонтируемой обшивки, но соотношение размера дефекта и размера заплаты не более чем 1:2.

Готовая заплата вырезается из листа пластика того же типа (марки), что и ремонтируемая **обшивка**, **равной** с ней толщины. Материал, из которого вырезается **заплата**, **должен** иметь "жертвенный слой" на склеиваемой поверхности для исключения возможности загрязнения поверхности и необходимости **зашкуривания** перед склеиванием. Заплата толщиной более 0,5 мм должна иметь скосы под углом от 3 до 10°. Для исключения проникновения влаги в заплату через торцы перерезанных волокон композита, которые образовались при

мехобработки, линия обреза и скоса заплата предварительно специально обрабатывается соответствующим связующим или клеем и термообрабатывается. При приклеивании заплата с применением пастообразных эпоксидных клеев типа ВК-9, ВК-27 и др., на склеиваемую поверхность заплата наносится слой фенолкаучукового клея ВК-25 (жертвенный слой предварительно удаляется). Клей ВК-25 наносится на заплата кистью в три слоя с промежуточной выдержкой:

после 1-го слоя - 30...60 минут при 18-30°C;

после 2-го слоя - 30...60 минут при 18-30°C;

после 3-го слоя - 3 часа при 18-30°C.

Слой клея наносится равномерно, без пузырей (для чего кисть должна двигаться только в одну сторону), обеспечивая 100% укрывистость.

После выдержки слоев ВК-25 на открытом воздухе проводится отверждение его при температуре $(125 \pm 5)^\circ\text{C}$ в течение 4-х часов. Скорость набора температуры не более 2°C в минуту. Перед приклеиванием заплата подслоем клея ВК-25 подлежит зашкуриванию без обезжиривания, продукты зашкуривания удаляются чистой сухой волосяной кистью. Заплаты, покрытые подслоем клея ВК-25, хранятся в течение 1 года при нормальной температуре в упакованном виде в пленку или бумагу. Загрязнение подслоя не допускается.

Перед приклеиванием заплата на агрегате за зоной приклеивания заплата наносятся координатные оси, зашкуривается ремонтируемая поверхность агрегата до равномерной шероховатости. По периметру зоны дефекта на расстоянии 8-10 мм от заплата укладывается липкая лента ЛТ для предохранения от потеков клея. Приготавливается пастообразный клей или вырезаются из клеевой пленки заготовки для выкладки по поверхности склеивания заплата с агрегатом. Наносится пастообразный клей или укладывается клеевая пленка (освободив ее от защитных Подложек), и устанавливается заплата в соответствии с осями координат.

Собирается на заплате технологический пакет, нагреватель, теплоизолятор согласно рис. 15.

В конструкции технологического пакета применяются различные слои, имеющие следующие функциональные назначения :

антиадгезионная пленка - разделительный слой между препрегом и подкладным листом, обеспечивает качество наружной поверхности заплата. Теплоустойчивость антиадгезионной пленки не менее чем на 20°C выше наибольшей температуры отверждения;

подкладной лист из алюминиевого сплава - исключает резкий перепад температур в обшивке из ПКМ на краю нагревателя, т.е. способствует недопущению коробления и поводок обшивки и заплата. Обеспечивает высокое аэродинамическое качество формируемой заплата;

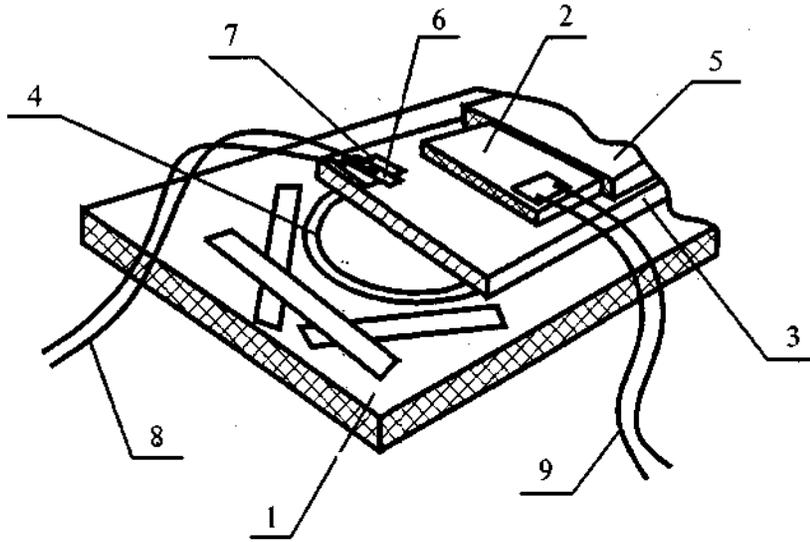


Рис.15. Схема технологического пакета при приклеивании заплат

1 - ремонтируемая обшивка агрегата; 2 - нагреватель; 3 - подкладной лист из алюминиевого сплава толщиной 0,4...0,6 мм, размер листа больше нагревателя на 40 ... 50 мм кругом; 4 - контур формуемой заплата; 5 - теплоизолятор; 6 - липкая лента ЛТ; 7- антиадгезионная пленка (фторопласт или полипропилен); 8 - термопара; 9 - выводные проводники нагревателя

теплоизолятор - ограничивает распространение тепла (т.е. потери тепла) из зоны ремонта, защищает воздушный или вакуумный мешок от тепловых повреждений. В качестве одного из слоев теплоизолятора могут использоваться соты ПСП или ССП.

Термопары располагаются на расстоянии до 10 мм от края заплата, и над ней размещаются два слоя пленки, а затем она фиксируется липкой лентой.

После сборки технологического пакета производится отверждение клеевого материала по регламентированным режимам.

В дальнейшем проводится контроль качества приклеивания заплата, предварительно разобрав технологический пакет, и восстанавливается лакокрасочное покрытие. Как было отмечено ранее, если требования, предъявляемые к ремонтному агрегату высоки, то необходимо удалить часть дефектной обшивки и восстановить её путем формования из препрегов. Поэтому первой технологической операцией будет изготовление препрегов, если нет возможности использовать предварительно изготовленный на специальных установках. После изготовления препрега производят изготовление заплата. Изготовление и установку заплата производят аналогично описанному способу в разделе 7.6 .

7.12. Устранение вмятин, проколов, односторонних пробоин размером до 40 мм

Данные дефекты устраняются заливкой поврежденного участка клеем и установкой заплаты. Может быть использован вспенивающий клей, а также эпоксидные клеи, содержащие различные наполнители (микросферы, микрокорунд, рубленое стекловолокно). Технологический процесс выполняется следующим образом:

первоначально проводится мехобработка обшивки в зоне дефекта, удаляются заломы, загибы, трещины в обшивке и скругляются резкие переходы в углах;

проводится контроль наличия влаги в зоне дефекта с помощью полимерных трубочек или жгутиков из фильтровальной бумаги, а при наличии влаги она удаляется с выполнением ранее описанной технологии;

обезжиривается сотовый наполнитель из алюминиевых сплавов в пробоине кистью, смоченной **БЕНЗИНОМ**, а затем ацетоном, обрабатываемая поверхность должна располагаться внизу (к поверхности земли);

приготавливается клей для заполнения пробоины в сотовом наполнителе, вырезается из пленочного вспенивающего клея заготовка для выкладки в дефект заподлицо с наружной поверхности обшивки;

заливается свежеприготовленный клей в пробоину на полную её глубину, устанавливается сотовый наполнитель в место дефекта, на дефектную зону укладывается фторопластовая пленка, а сверху неё пластина из алюминиевого сплава толщиной **0,3..0,5** мм, нагреватель, термопара, теплоизолятор, груз и проводится отверждение клея;

заключительным действием по ремонту является формование или приклеивание заплаты сверху вклеенного сотового наполнителя.

7.13. Устранение вмятин и односторонних пробоин размером более 40 мм

Данный вид дефекта устраняется удалением повреждений обшивки и сотового наполнителя, вклеиванием вставки из нового сотового наполнителя и приклеиванием или формованием заплаты.

Удаление повреждений обшивки было уже рассмотрено нами ранее и ничем не **отличае**тся от ранее описанного. **Сейчас** будет рассмотрена технология удаления повреждений сотового наполнителя и **вклеивания** вставки из нового сотового наполнителя. Наиболее сложным является выполнение данных операций на клиновидных агрегатах в отличие от агрегатов с постоянной высотой сотового наполнителя. После удаления повреждений обшивки приступают к удалению повреждений сотового наполнителя. Оно производится с помощью специальных приспособлений, состоящих из упоров, фиксируемых на агрегате,

к которым прикреплены направляющие, предназначенные для перемещения ПНЕВМОМАШИНЫ. Фиксируя в определенных координатах по осям X, Y направляющие, мы обеспечиваем заданное перемещение пневмомашин в соответствии с размерами дефекта. Глубина мехобработки должна быть минимально необходимой. В некоторых случаях вырезка сотового заполнителя производится с поднутрением. Для этого случая используется инструмент (рис.16), закрепляемый в сверлильной пневмомашине типа СМ 21-9-1000, установленный на штативе приспособления. Сверлильная машина опускается на глубину H_1 , а вылет инструмента обеспечивает выборку сотового заполнителя на глубину D.

В случае удаления сотового заполнителя до противоположной обшивки остатки заполнителя и клея удаляют борфрезой, закрепленной в ПНЕВМОМАШИНУ, или наждачной бумагой, укрепленной на деревянном бруске. После обработки высота неровностей не должна превышать 0,5 мм.

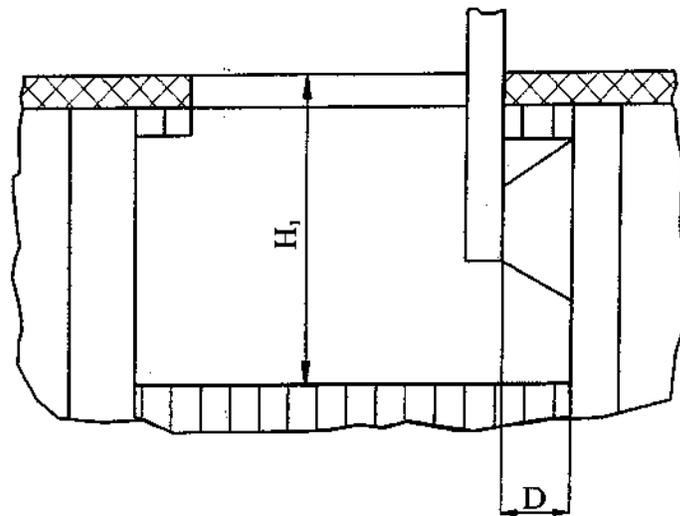


Рис.16. Вырезка поднутрений в сотовом заполнителе

Углубление в сотовом заполнителе на 70 - 80% глубины повреждения обрабатывается торцевой фрезой или борфрезой, а выравнивание дна сотового заполнителя производится ножевой фрезой (рис.17)

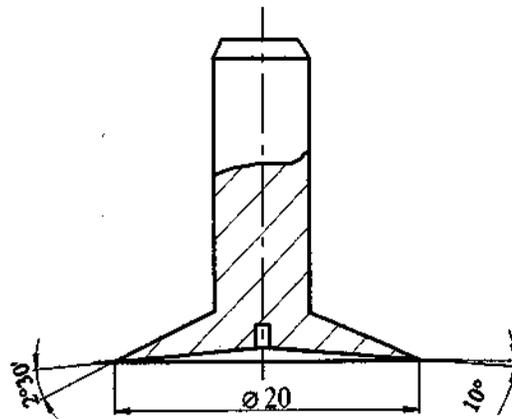


Рис.17. Ножевая фреза для удаления припуска сотового заполнителя

Выполнение работы по изготовлению и подгонке сотового заполнителя производится согласно разделу 7.6 с вклеиванием вставки сотового заполнителя. Как было отмечено ранее, в конструкции агрегатов применяются сотовые заполнители из алюминиевых сплавов, а также полимерсотопласт ПСП и стеклосотопласт ССП. Общим условием вклеивания сотового заполнителя является обеспечение температурного нагрева зоны вклеивания. Однако при ремонте агрегатов с алюминиевым сотовым заполнителем нагрев можно производить со стороны обратной дефекту, но при условии **неперегрева** обшивки под нагревателем. При ремонте агрегатов с сотозаполнителем ПСП и ССП прогрев производится с обеих сторон полости агрегатов, в которые вклеиваются вставки сотозаполнителя.

При ремонте агрегатов, эксплуатируемых при температуре до 80°C , используют клей холодного отверждения (ВК - 9; ВК - 27; ВКВ - 9) с обеспечением прогрева до 70°C в течение 1 ч, а при ремонте агрегатов, эксплуатируемых при температуре до 150°C , вклеивание вставок проводится с использованием пленочного вспенивающего клея ВКВ - 3 с температурой нагрева не ниже 120°C .

При использовании клеев пастообразных ими пропитывают ткань толщиной 0,2 ... 0,3 мм, а при использовании пленочного клея ВКВ-3 к нему с обеих сторон через фторопластовую пленку прикатывается утюгом (температура не более 80°C) стеклоткань. То есть в обоих случаях мы предварительно изготавливаем прокладку, с помощью которой будут состыкованы сотовый заполнитель в агрегате по месту дефекта и вставка из нового сотового заполнителя.

В дальнейшем вырезаются из прокладок заготовки необходимых размеров и устанавливаются на дно дефекта, предварительно обезжирив его (в случае алюминиевого сотового заполнителя), при этом стеклоткань, пропитанную клеем с одной стороны, укладывают слоем клея к сотовому заполнителю. Наносится слой клея на другую сторону. При использовании пленочного клея ВКВ-3 он прикатывается к боковой поверхности вставки сотового заполнителя (защитная подложка удаляется с клея непосредственно перед склеиванием). Устанавливается вставка сотового заполнителя в дефектную зону (не допускается смятие заполнителя вставки), приготавливается вспенивающийся пастообразный клей и заполняется им стык между вставкой и сотовым заполнителем агрегата. Нажатием руки максимально вдавливаются вставка сотового заполнителя и прокладка в дефектную зону. Фиксируется вставка липкой лентой крест-накрест, устанавливая её на обшивке. В зону отверждения клея помещается термopа, а сверху вставки сотового заполнителя устанавливается теплоизолятор и воздушный мешок (см. рис.18). Обеспечивается в обоих мешках давление не менее 0,01 МПа ($0,1 \text{ кгс/см}^2$). Проводится отверждение клея. Контроль за температурой производится по обоим термopам. После выполнения отверждения клея выполняются работы по удалению припуска сотового заполнителя заподлицо с поверхностью обшивки. Для выполнения этой операции при-

КАТЫВАЮТ липкую ленту вокруг удаляемого припуска, ширина полосы ленты не менее 50 ММ, и с помощью ручного инструмента или приспособления, аналогично используемому при удалении дефектного сотового ЗАПОЛНИТЕЛЯ, производится удаление припуска заполнителя (см. рис.19). В процессе удаления контролируется величина превышения заполнителя над обшивкой с помощью металлической линейки и щупа (см. рис.20). При ВЫСТУПАНИИ сотового заполнителя линейка устанавливается на пластину, а величина зазора определяется между линейкой и сотами, при западании сотового заполнителя линейка устанавливается на обшивку, величина зазора определяется между заполнителем и линейкой. При выявлении западания сот можно его ликвидировать путем подкладывания дополнительных слоев материала заплата и пленочного клея или стеклоткани, пропитанной пастообразным клеем.

Таким образом, выполнив операцию вклеивания и подгонки вставки сотового заполнителя к контуру агрегата, можно выполнить операцию приклеивания или формования заплата; технология изготовления и приклеивания (приформовывания) заплата рассматривалась ранее.

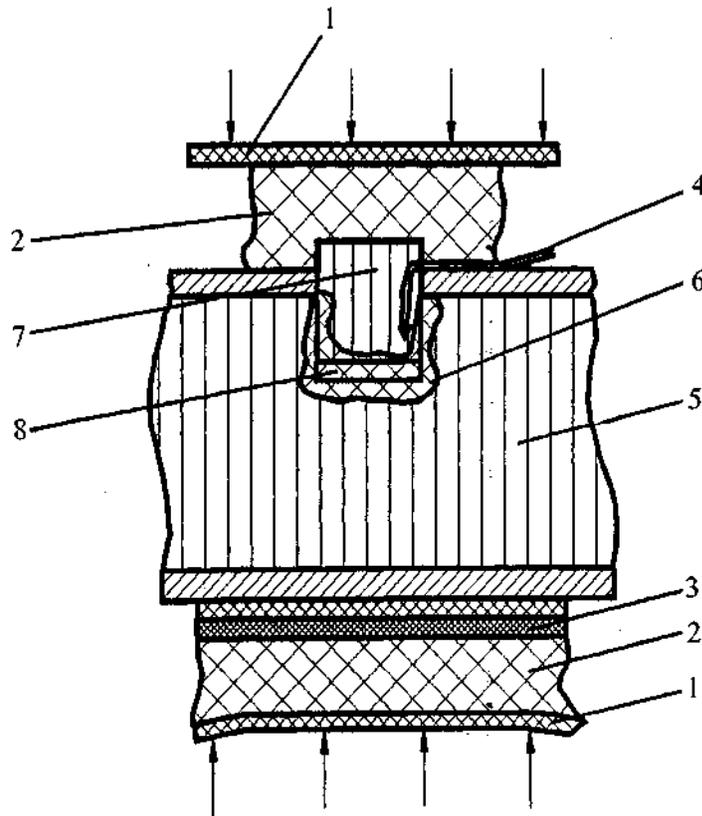


Рис.18. Вклеивание прокладки и вставки сотового заполнителя

- 1- оболочка воздушного мешка; 2 - теплоизолятор; 3- нагреватель;
4 - термопара; 5 - ремонтируемый агрегат; 6 - вспенивающийся клей; 7- вставка сотового заполнителя; 8 - прокладка

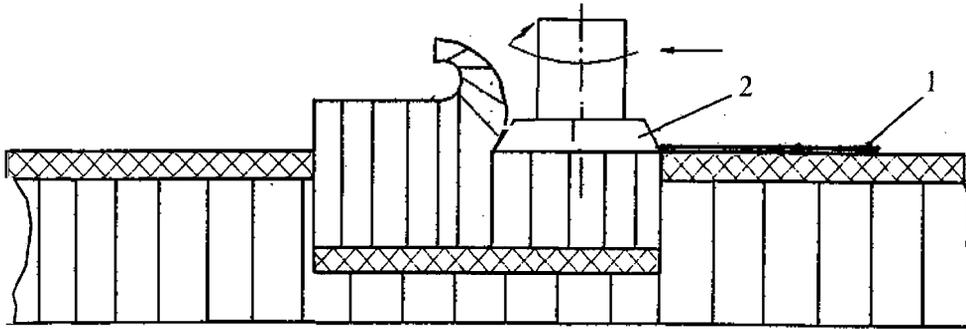


Рис.19. Удаление припуска сотового заполнителя
1- липкая лента; 2 - ножевая фреза

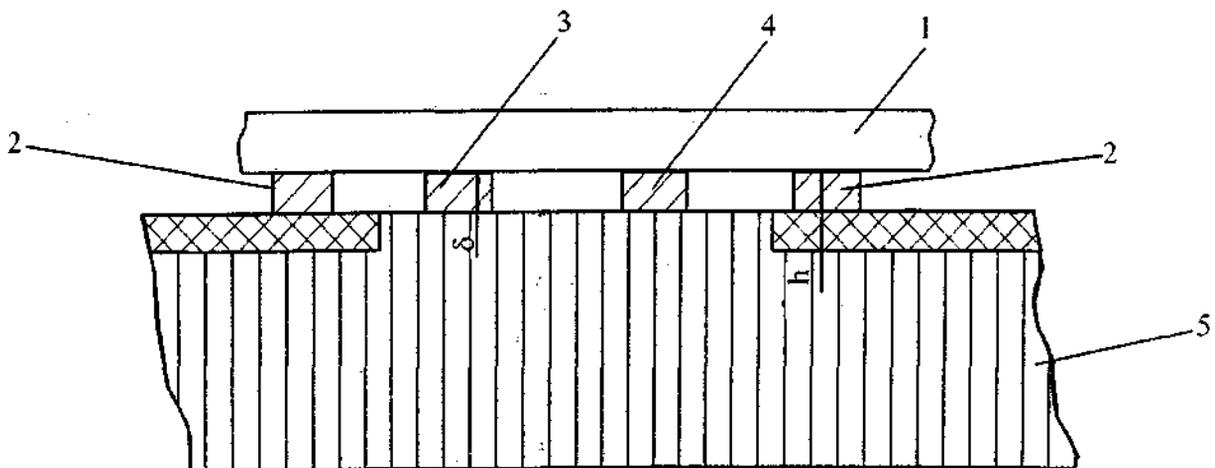


Рис.20. Определение величины выступа сотового заполнителя
Величина выступа сотового заполнителя равняется $(h - 8)$.
1- линейка металлическая; 2 - опорная пластина; 3 - щуп
пластинчатый; 4 - клиновидный щуп; 5 - ремонтируемый агрегат

7.14. Ремонт сквозных пробоев

Подготовительные операции, а именно: мехобработка зоны ремонта, подготовка вставки сотового заполнителя и подготовка накладной внешней заплата или слоев препрега нами были рассмотрены ранее. Наибольший интерес с точки зрения оригинальных технологических решений представляет технологическая операция вклеивания вставки сотового заполнителя, т.к. отверстия в обшивках (после мехобработки зоны дефекта) могут быть одного или разного

размеров. Кроме ТОГО, ДОЛЖНА быть решена задача обеспечения температурного режима в зоне склеивания и формования заплат. Первоначально при вклеивании сотового заполнителя в случае одинаковых отверстий в обшивках изготавливается вставка сотового заполнителя.

Высота вставки равна высоте удаленного сотового заполнителя при формировании внутренней заплаты или превышает на 1,5 - 2,0 мм при приклеивании готовой заплаты. Затем выполняется операция обезжиривания вставки сотового заполнителя (в случае использования алюминиевого сотового заполнителя) и наносится вспенивающийся пастообразный или пленочный вспенивающийся клей прикатывается на боковую поверхность вставки. Устанавливают вставку в дефект и собирают технологический пакет (см.рис.21). Обязательно устанавливаются термопары по одной с каждого конца вставки и одна непосредственно в клеевую композицию на расстоянии 7-10 мм вглубь заполнителя. Укладывается на нижнюю поверхность ремонтируемого участка пленка из фторопласта толщиной 0,02-0,04 мм, сверху пленки технологическая пластина толщиной 0,5-0,9 мм из алюминиевого сплава (пластина и пленка фиксируются липкой лентой). Размер пластины и пленки больше размера вставки сотового заполнителя на 15-20 мм кругом. Укладывается пленка из фторопласта толщиной 0,02-0,04 мм с верхней стороны дефектной зоны, сверху пленки алюминиевая фольга или лист из алюминиевого сплава толщиной не более 0,3 мм. Устанавливаются с обеих сторон нагреватели, технологические пакеты и создается давление 0,01-0,015 МПа. В случае, если высота заполнителя из алюминиевого сплава в зоне ремонта менее 100 мм (сотозаполнители из ПСП или ССП соответственно 20 мм), используется один нагреватель, укладываемый снизу (для удобства последующей мехобработки), что подтверждено автором при проведении ремонтных работ на реальных агрегатах. Давление создается с использованием вакуумных мешков или воздушных мешков.

Зона создания давления задается больше размеров участка нагрева не менее чем на 20 мм кругом. В дальнейшем проводится режим отверждения клея и выполняется восстановление обшивок.

Если отверстия в обшивках разной величины, то ремонт проводится вклеиванием вставки сотового заполнителя, а затем установкой со стороны меньшего отверстия заплаты и приклеиванием (формованием) заплаты с большей стороны (см.рис.22). Первоначально обозначается на плотной бумаге контур большего и меньшего отверстий. По контуру отверстия, обозначенного на бумаге, вырезается клеевая пленка, с помощью которой склеивается сотозаполнитель вставки с зоной (очищенной от сот) обшивки **В-БЛИЗИ** меньшего отверстия. Изготавливается вставка сотозаполнителя по контуру большего отверстия. Наносится пастообразный или пленочный **НЕ-ВСПЕНИВАЮЩИЙСЯ** клей на внутреннюю поверхность обшивки **В-БЛИЗИ** меньшего отверстия, устанавливается вставка в зону дефекта. В случае ремонта агрегатов с односторонним подходом вставка сотозаполнителя предварительно подгоняется по глубине дефекта и вклеивание вставки производится одновременно с приклеиванием заплаты

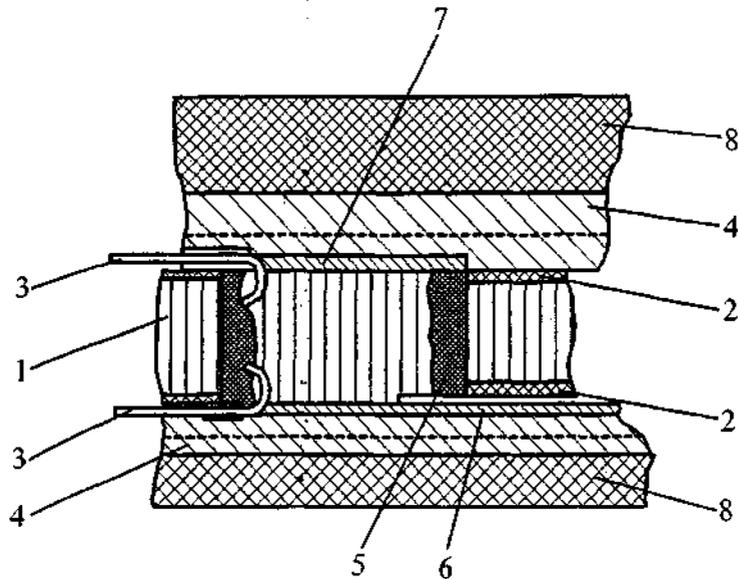


Рис.21. Вклеивание вставки сотового заполнителя

1 - сотовый заполнитель ремонтируемого агрегата; 2 - обшивка ремонтируемого агрегата; 3 - термопары; 4 - нагреватель; 5 - вспенивающийся клей; 6 - подкладная пластина; 7 - накладка; 8 - теплоизоляция

с доступной стороны агрегата. При использовании пастообразного вспенивающего клея заполняется стык вставки и сотового заполнителя агрегата. Обеспечивается на вставку технологическое давление $0,01\text{МПа}$ со стороны большего отверстия, собирается технологический пакет и проводится режим склеивания. В дальнейшем выполняется операция по восстановлению обшивок.

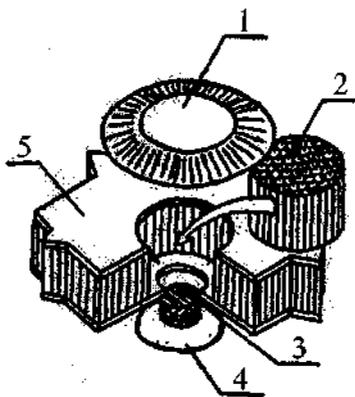


Рис.22. Устранение сквозной пробоины (отверстия в обшивках разной величины):

1 - заплата (готовая или изготавливаемая на месте ремонта формованием); 2 - вставка сотового заполнителя; 3 - прокладки из ткани, пропитанные клеем (толщина равна толщине ремонтируемой обшивки); 4 - заплата; 5 - ремонтируемый агрегат

7.15. Ремонт ЗАКОНЦОВОК агрегатов

ЗАКОНЦОВКИ агрегатов могут быть выполнены различными способами: с **КОНЦОВОЧНЫМ** стрингером, без стрингера, с неразъемной обшивкой (типа книжки). Ремонт данных агрегатов из-за необходимости выполнения операции механической обработки вставки сотового заполнителя очень сложен. Предпочтительно вставку сотового заполнителя изготавливать без припусков на станочном оборудовании, а затем клеивать по месту ремонта. Ремонт стрингера и клеивание вставок производят с использованием клеев холодного отверждения. В случае, если нет возможности предварительно изготовить вставку сотового заполнителя, то возможно произвести ее клеивание, а затем выполнить мехобработку вставки непосредственно на агрегате. В этом случае последовательность технологических операций будет **СЛЕДУЮЩАЯ**, и она показана на рис.23. Первоначально удаляется поврежденный участок агрегата. Вырез выполняется по возможности простой формы для обеспечения подгонки вставки сотового заполнителя и **ЗАПЛАТ**. При этом неповрежденные концы стрингера освобождаются не менее чем на 40 мм с обеих сторон, причем концы стрингера обрезаются под прямым углом. Из конструкционного материала (например, **КАСТА**) изготавливается недостающая часть стрингера. Контур вставки стрингера соответствует ремонтируемой детали. Для обеспечения прочности клеевого соединения, склеиваемые поверхности стрингера покрываются клеем **ВК-25** с последующей термообработкой при 125°C по соответствующему режиму.

Затем приступают к изготовлению вставки сотового заполнителя. Заполнитель **ПСП** и **ССП** вырезается из сотового блока с припуском 3-5 мм на каждую сторону, обрабатываемую после клеивания в агрегат, а для металлического сотового заполнителя - припуск по высоте не более 2 мм. Металлический сотовый заполнитель изготавливается с припуском на сторону с учетом последующей прикатки боковых граней. Для обеспечения клеивания вставки сотового заполнителя в **агрегат** используется технологическая накладка прямоугольной формы с размером на 50...100 мм больше зоны приклеивания заплата. При наличии неровностей на наружной поверхности обшивки накладка должна их **КОМПЕНСИРОВАТЬ** (путем сборки из нескольких слоев). Наиболее удобное положение **агрегата** при ремонте — вертикальное положение, обеспечивающее **ДОСТУП** с двух сторон к зоне ремонта. Агрегат устанавливается вертикально, наносится на склеиваемые поверхности сотового блока в агрегате и на стрингер, а также на вставку стрингера и пластину предварительно приготовленный пастообразный клей. Вставка сотового заполнителя устанавливается в дефект, а **ЗАТЕМ** устанавливается по месту приклеивания вставка стрингера и пластина. С одной стороны (базовой) закрепляется антиадгезионная пленка липкой лентой, затем устанавливается технологическая пластина, чтобы вставка сотового заполнителя находилась заподлицо с внешней поверхностью обшивки (с **базовой** стороны). Проводится технологический режим отверждения клея. После этого удаляется припуск сотового заполнителя. Для обеспечения фиксации обрабатываемого заполнителя укладывает -

ся на его поверхность с базовой стороны вместо технологической наклейки лист резины толщиной 1...2 мм вместе с фанерой, размер листа резины и фанеры на 100...150 мм больше с трех сторон размера дефекта. Лист фанеры прижимается к агрегату и фиксируется липкой лентой так, **чтобы** он препятствовал деформации заполнителя под действием сил резания. Припуск сотового заполнителя удаляют с помощью пневмоинструмента заподлицо с обшивкой агрегата (превышение на толщину липкой ленты, приклеенной к обшивке, около 20-25 мкм). После подгонки сотового заполнителя к контуру разбирается технологическая сборка и выполняется операция по восстановлению и приклеиванию заплат.

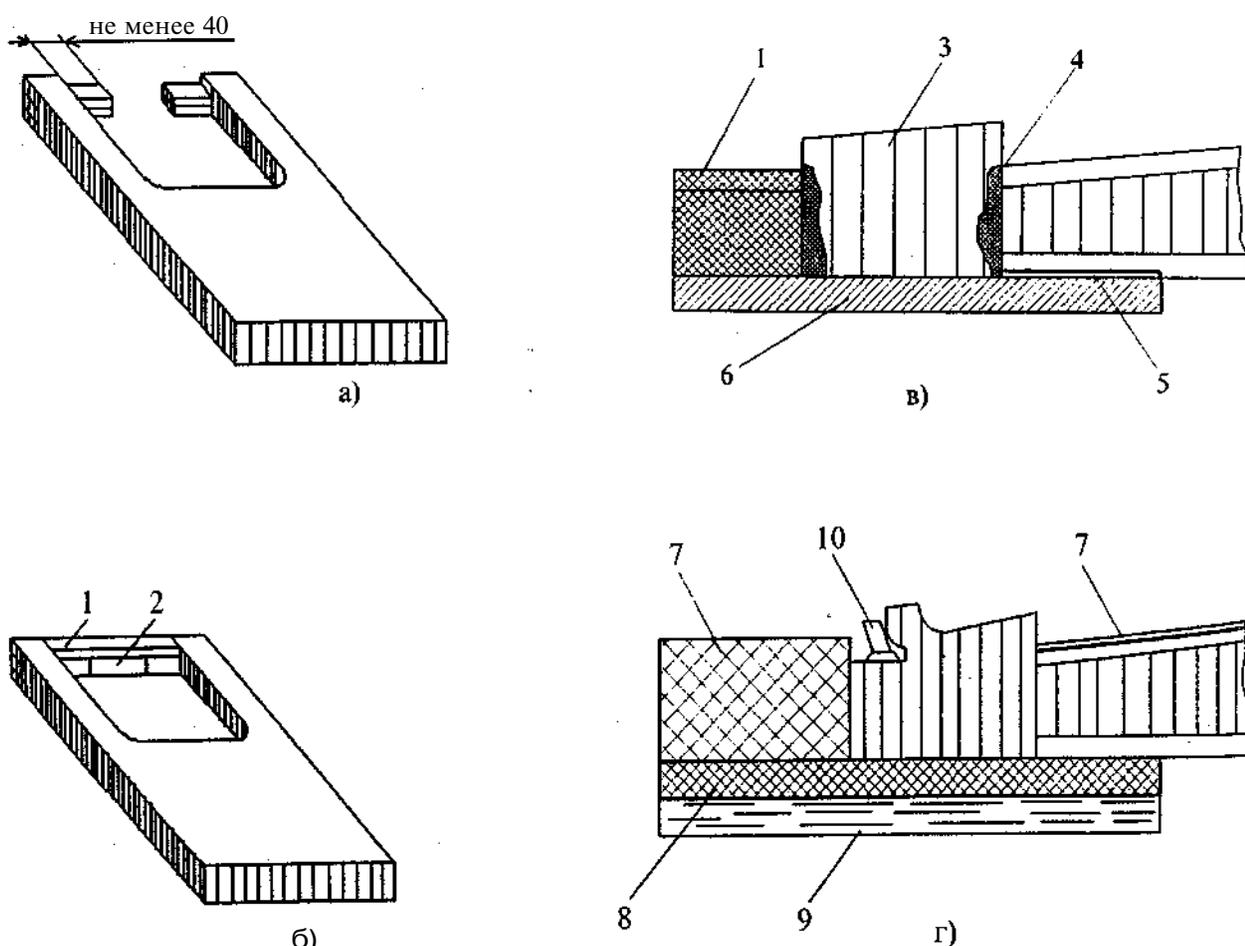


Рис.23.Ремонт агрегатов с законцовочным стрингером :

- а) вырез контура стрингера; б) подгонка и приклеивание вставки стрингера; в) вклеивание вставки сотового заполнителя; г) мехобработка вставки сотового заполнителя

- 1 - пластина (накладка на ремонтируемую часть стрингера);
 2 - вставка в стрингер; 3 - вставка сотового заполнителя; 4 - клей;
 5 - антиадгезионная пленка; 6 - технологическая наклейка;
 7 - липкая лента; 8- пластина из резины; 9- пластина из фанеры;
 10 - ножевая фреза

7.16. Ремонт отслоений в ВОЗДУХОЗАБОРНЫХ каналах звукопоглощающих конструкций (ЗПК)

Звукопоглощающие конструкции представляют собой сотовые панели из ССП со стороной ячейки 10 мм, внутренняя обшивка которых имеет перфорацию. При эксплуатации данных конструкций возможно отслоение обшивок от сотового заполнителя. Наиболее технологически сложным является ремонт отслоения внутренней перфорированной обшивки от сотового заполнителя, т.к. часть отверстий закрыта клеем **при** изготовлении конструкции, а также при эксплуатации происходит загрязнение панели ЗПК через отверстия.

Ремонт выполняется зашприцовкой клея (пастообразного) согласно рис.24.

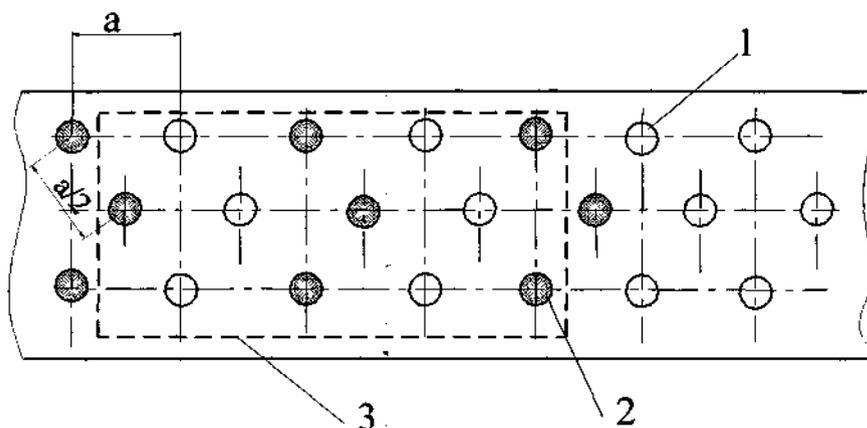


Рис.24. Схема зашприцовки клея при ремонте отслоений в ЗПК

- 1 - отверстия, в которые клей не зашприцовывается;
- 2 - отверстия, в которые клей зашприцовывается;
- 3 - контур дефекта

При выполнении ремонта агрегат выставляется в положение, чтобы дефектный участок перфорированной обшивки располагался отверстиями вниз. Зона ремонта обрабатывается пылесосом с высоким разряжением или струей сжатого воздуха. Затем зашприцовывается клей в отверстия дефектной зоны из расчета не менее 2 см на одно отверстие (зашприцовка в закрытые клеем отверстия на заводе-изготовителе не производится). Зашприцовка производится до повышения давления в шприце. В дальнейшем необходимо прогреть дефектную зону до температуры 60-70°C до полного отверждения клея и шилом или сверлом диаметром 1,8 мм прочистить отверстия, залитые клеем при ремонте.

8. НАГРЕВ ЗОНЫ РЕМОНТА

Нагрев зоны ремонта при формовании заплат из препрегов и приклеивании сотового заполнителя пленочными клеевыми материалами является обяза-

тельным условием проведения качественного ремонта. Кроме того, при применении жидких пастообразных клеев (типа ВК-9, ВК-27 и др.) желательно проводить горячее отверждение (хотя данные клеи могут **отверждаться** и при комнатной температуре), т.к. прочностные характеристики композиций, **отвержденных** без нагрева, как правило, значительно ниже, чем композиций горячего отверждения [9].

Для выполнения нагрева используются различные методы нагревания. Нагревание можно проводить в камерах, автоклавах, однако при этом необходимо осуществлять нагрев всей конструкции, что может привести к изменению формы и снижению прочностных свойств, а также требует значительных капитальных затрат.

Нагрев конструкций из ПКМ до температуры более 60°C для отверждения клеев и связующих, а также для выпаривания влаги при ремонте должен выполняться при условии вакуумного или избыточного давления на всю поверхность агрегата с целью исключения коробления и повреждения.

В настоящее время широкое применение находят методы контактного нагревания. Для этого пригодны ленты из металла, **токопроводящие** ткани из угольных или графитовых волокон. Нагреватели укладывают на ремонтируемую зону агрегата и нагрев осуществляют электрическим током.

Применение данных нагревателей позволяет выполнять ремонт непосредственно на самолете (не снимая агрегат с самолета) или в полевых условиях.

Для обеспечения заданной температуры и осуществления ее регулирования получила распространение установка УРП-2М, которая может работать от сети переменного тока напряжением 36В, 115В, 220В с частотой 50Гц или 400Гц. Данная установка обеспечивает автоматическое проведение выбранного режима нагрева (одного из **шестидесятичетырех**) любым из двух каналов регулирования независимо от температуры окружающей среды в пределах от $(-10^{\circ}\text{C}$ до $+40^{\circ}\text{C}$). При этом преобразователь слаботоочного сигнала термопар вынесен в зону ремонта, поэтому расстояние от места ремонта до блока регулирования не ограничено. Контрольная система установки УРП-2М, регулирующая температуру, ориентируется на среднеарифметические значения температуры, полученные от 3-х термопар. Эти термопары располагают в отдалении друг от друга в пределах ремонтируемой зоны.

Термопары ХК для контроля температур предпочтительно изготавливать из провода ФТЭ, выпускаемого в оболочке из фторопласта и экранированного.

Нагреватель изготавливается из ленты нержавеющей стали толщиной 0,1-0,15мм и **заформовывается** в оболочку из теплостойкой резины типа ИРП-1338 или стеклоткани, пропитанной силиконовым герметиком. Удельная мощность, передаваемая нагревателем поверхности изделия, составляет $0,5 \text{ Вт/см}^2$ при температуре окружающей среды -15°C , когда зона ремонта прогревается до 125°C , и $0,7 \text{ Вт/см}^2$, когда зона ремонта прогревается до 175°C [8].

Мощность электронагревателя для нагревания поверхности до температуры 125°C подсчитывается по формуле (27):

$$P = 0,5\pi R^2, \quad (27)$$

где R - радиус круглой зоны.

Сопротивление электронагревателя рассчитывается по формуле (28) и оно должно соответствовать допускаемому напряжению U , определяемому по формуле (29).

$$r_H = 0,5\pi \cdot R^2 / I^2, \quad (28)$$

где I - сила тока.

$$U = I \cdot r_H \quad (29)$$

Ширина полосы и число полос круглого плоского электронагревателя определяют методом подбора по зависимости (30)

$$l_{\Sigma} r_{yq} (b\delta) = 0,5 \cdot \pi \cdot R, \quad (30)$$

где l_{Σ} - суммарная длина полос электронагревателя;

r_{yq} - удельное сопротивление;

b - ширина полосы;

δ - толщина полосы;

R - радиус электронагревателя.

Схема электронагревателя показана на рис.25.

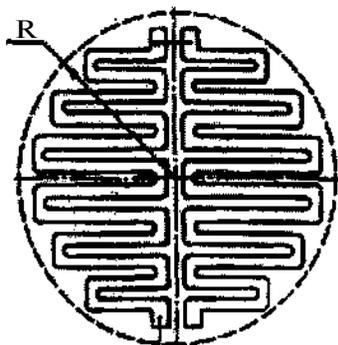


Рис.25. Схема электронагревателя
R- радиус нагревателя

Размер нагревательного элемента должен превышать размер заплаты в 1,3-1,5 раза. Нагрев зоны ремонта производится со скоростью 1-2°С в минуту. При достижении нижнего предела температуры отверждения используемого материала увеличение температуры прекращается, и проводится режим в соответствии с заданным регламентом. Охлаждение клеевого соединения проводится со скоростью не более 3°С в минуту до температуры окружающей среды. При отверждении вспенивающихся пастообразных клеевых композиций термопары **ДОЛЖНЫ** устанавливаться непосредственно в клей. Для чего необходимо термопару обмотать липкой лентой за спае, а поверх липкой ленты и клея плотно обмотать конец термопары 1-2 слоями алюминиевой фольги, чтобы получался конический наконечник. Обжать наконечник на спае, и после окончания процесса отверждения термопары удаляются из клея, а наконечник из фольги может остаться в клеевом соединении. При ремонте конструкций из ПКМ величина температуры в глубине материала в значительной степени зависит от толщины ремонтируемой конструкции, поэтому необходимо вводить поправки на температурный режим с учетом температуры окружающего воздуха, толщины и диаметра монолитной заплаты.

9. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ И РАЗРЯЖЕНИЯ В ЗОНЕ РЕМОНТА

При ремонте повреждений сотовых конструкций и монолитных конструкций из ПКМ должно быть обеспечено давление не менее 0,08 МПа (0,8 кгс/см²). Однако при одностороннем создании давления на агрегат величина давления определяется из условия исключения выпучивания конструкции и ее повреждения [17]. Избыточное давление может быть обеспечено винтовыми струбцинами, нагружающими зону ремонта через жесткие прокладки и губчатую резину, воздушными многослойными мешками, оснащенными вакуумной присоской и прижимом с камерой избыточного давления (рис.26).

Число присосок для создания давления при приклеивании определяется по формуле (31) с учетом схемы действия сил:

$$n = \frac{P_M \cdot S' \cdot L}{0,6\pi \cdot R^2 \cdot p_n \cdot l} \quad (31)$$

где n - число присосок;

S' - площадь, на которую оказывается давление;

L - расстояние от опоры до середины воздушного мешка;

R - радиус вакуумной присоски;

P_M - давление в воздушном мешке;

p_n - давление в присоске;

l - расстояние от опоры до середины присоски.

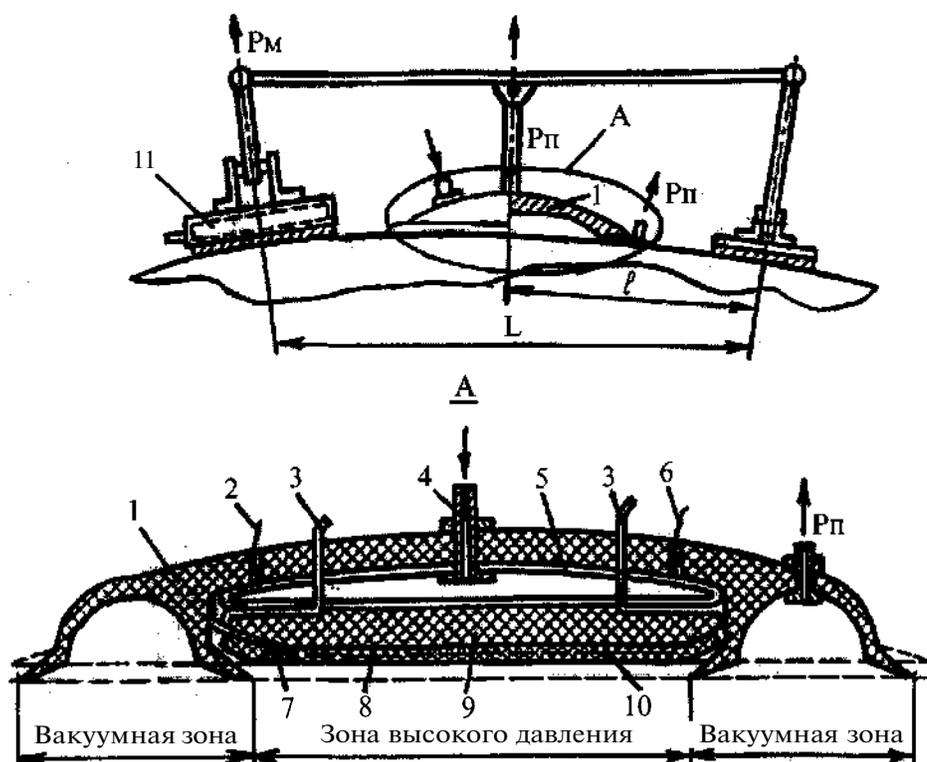


Рис.26. Схема вакуумного прижима с вакуумной присоской и камерой избыточного давления

1 - присоска вакуумная; 2 - выводы терморезистора; 3 - выводы нагревателя; 4 - штуцер воздушного мешка; 5 - мешок воздушный; 6 - выводы термопары; 7 - терморезистор; 8 - нагреватель; 9 - теплоизолятор; 10 - термопара; 11 - камера воздушная; P_M - давление в воздушном мешке; $P_П$ - давление в воздушной присоске; / - расстояние от опоры до середины присоски; L - расстояние от опоры до середины воздушного мешка

Вакуумное давление используют при технической невозможности обеспечить избыточное давление. Клеевые соединения и заплаты из ПКМ, формируемые под действием вакуумного давления, имеют повышенную пористость и влагопроницаемость. Не рекомендуется использовать пастообразные клеевые композиции для склеивания под вакуумным давлением, если возможен доступ воздуха внутрь агрегата либо агрегат не может быть помещен целиком в вакуумный мешок. Вакуумное давление до 0,09 МПа (0,9 кгс/см²) в зоне ремонта может быть обеспечено эжекторным или вакуумным насосами. При использовании вакуумного давления при формировании заплат из ПКМ их толщина увеличивается на 15-20% по сравнению с другими способами создания давления. Вакуумный мешок изготавливается непосредственно на месте ремонта агрегата в отличие от воздушного мешка (камеры избыточного давления). Мешок изготавливается из прозрачной полиамидной пленки типа ППН-Т. Для герметизации мешка используется герможгут типа "Герлен 51Г-27", который состыковывается только в нахлест при укладке на агрегат. Размеры вакуумного мешка определяются размерами дефекта или технологического пакета под нагревателем при приклеивании или формировании заплат. Вакуумный мешок выбирается на 150...200 мм кругом больше дефекта или технологического пакета. Для обеспечения равномерного разряжения по всему объему вакуумного мешка внутри него укладывается дренаж из нескольких слоев разреженной ткани (холст, стеклоткань). Провода от нагревателей, термопары, выходящие за пределы мешка, герметизируются герможгутом.

Изготовление вакуумного мешка осуществляют в следующей последовательности:

- освободить от загрязнений зону выкладки вакуумного мешка;
- уложить герможгут по периметру вакуумного мешка;
- вырезать из пленки полотнище для вакуумного мешка. Размеры полотнища должны превышать размеры вакуумного мешка настолько, чтобы оно выкладывалось на зоне ремонта с учетом всех неровностей без натяга, свободно;
- примерить полотнище к уложенному герможгуту, определить место установки штуцера для отсоса воздуха и штуцера для установки контрольного прибора, вырезать отверстие и установить штуцеры;
- уложить полотнище на герможгут и плотно прижать;
- проверить герметичность мешка, подключить к нему вакуумный насос и создать разряжение до 0,08 МПа, и перекрыть вакуум. Мешок считается герметичным, если увеличение давления под мешком на 0,01 МПа происходит более чем за 1 минуту.

10. ГЕРМЕТИЗАЦИЯ МЕСТ РЕМОНТА И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЛАКОКРАСОЧНОГО ПОКРЫТИЯ

Герметизации подлежат заплаты, установленные на агрегате. При ремонте изделий, работающих при температуре (-60...+80)°С, применяется герметик

ВИТЭФ-1. Герметик наносится шпателем равномерным слоем с образованием зоны герметизации по 5...10 мм на поверхности ремонтируемого агрегата и заплата. При ремонте изделий, работающих при температуре $(-60...+150)^{\circ}\text{C}$, применяются герметики **ВИКСИНТ У-2-28** и **ВИКСИНТ У-4-21**. После герметизации обязательно на ремонтируемый участок наносится лакокрасочное покрытие в соответствии со схемой окраски агрегата. Герметики **ВИТЭФ-1**, **ВИКСИНТ У-2-28** и **ВИКСИНТ У-4-21** относятся к группе герметиков, вулканизирующихся при комнатной температуре [15]. Герметик **ВИТЭФ-1** - тепло- и топливостойкий герметик на основе жидких тиоколов, а герметики **ВИКСИНТ У-2-28** и **ВИКСИНТ У-4-21** - теплостойкие герметики на основе **СИЛОКСАНОВЫХ КАУЧУКОВ**.

Герметики состоят из **Герметирующей** пасты и вулканизирующих агентов, которые смешиваются непосредственно перед применением. Герметизирующие пасты состоят из жидких каучуков (**тиоколы, силоксановые каучуки**) и наполнителей. Перед применением герметика герметизирующая паста смешивается с вулканизирующей пастой (и катализаторами) в соответствии с рецептурой каждого герметика. При получении небольшой массы (до 500 г) смешение производится вручную в специальной таре. Герметик **ВИТЭФ-1** применяется без подслоя, а герметики **ВИКСИНТ У-2-28** и **ВИКСИНТ У-4-21** с подслоем П-11 в сочетании с протирочной пастой № 2 для обеспечения адгезии герметика к металлам. Жизнеспособность герметиков, а также продолжительность вулканизации зависят от температуры и относительной влажности окружающей среды, содержания вулканизирующего агента и ускорителя и колеблются от 0,5 до 6 часов. Как правило, все герметики **отверждаются** в течение 12-24 ч, но показатели их свойств достигают максимальных значений только через 3-7 суток.

Лакокрасочные покрытия (**ЛКП**) - покрытия, получаемые из многокомпонентных составов, способных при нанесении тонким слоем на поверхность изделий высыхать с образованием пленки, удерживаемой силами адгезии [16]. ЛКП состоит из нескольких слоев, формируемых различными лакокрасочными материалами: к ним относятся **Грунтовки, шпатлевки, эмали и лаки**.

Основное их назначение состоит в следующем:

Грунтовки - применяются для нанесения нижних слоев покрытия, которые обеспечивают прочную адгезию с окрашиваемой поверхностью и обладают хорошими антикоррозионными свойствами.

Шпатлевки - применяются для выравнивания поверхности, заполнения пор и раковин. Они имеют значительно более высокую вязкость, чем остальные лакокрасочные материалы.

Эмали - применяются для получения верхних слоев покрытий по слою грунтовки или шпатлевки. Они придают покрытию требуемый цвет, **укривистость** и стойкость в условиях эксплуатации.

Лаки - предназначены для получения прозрачных покрытий и для нанесения поверхностного слоя по слою эмали для увеличения блеска и улучшения эксплуатационных свойств покрытия.

Лакокрасочные материалы наносятся на окрашиваемые поверхности с помощью специальных распылителей (воздушных или безвоздушных), а шпатлевки шпателем или распылением при разведении до соответствующей вязкости согласно технической документации на них.

11. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА РЕМОНТА

Формирование клеевого соединения при ремонте отслоений обшивки от сотового заполнителя, установки **усиливающих** заплат требует обязательной механической обработки места повреждения как для удаления микро- и макроконцентраторов напряжений, так и для подготовки поверхности под склеивание. Проведенный анализ и выполненные исследования [5] показали, что наилучшие результаты получены при обработке инструментом типа конической зенковки. Рабочая поверхность инструмента однослойная из синтетических алмазов марки АС 15 зернистостью 500/400 и 800/630 на гальванической связке. Шероховатость поверхности ПКМ зависит от подачи и скорости резания, причем скорость резания оказывает меньшее влияние, чем подача и зернистость абразива. Снижение высоты микронеровностей при скоростях резания больших 15-18 м/с и подачах больше 300-400 мм/мин объясняется термомеханической деструкцией связующего. Аналогичное явление было обнаружено при малых скоростях резания - до 3 м/с, что происходит по причине упругого поведения волокна на таких скоростях воздействия, в отличие от хрупкого разрыва при большой скорости. На *рис.21* показано влияние подачи и скорости на шероховатость поверхности материала КМУ-4Э.

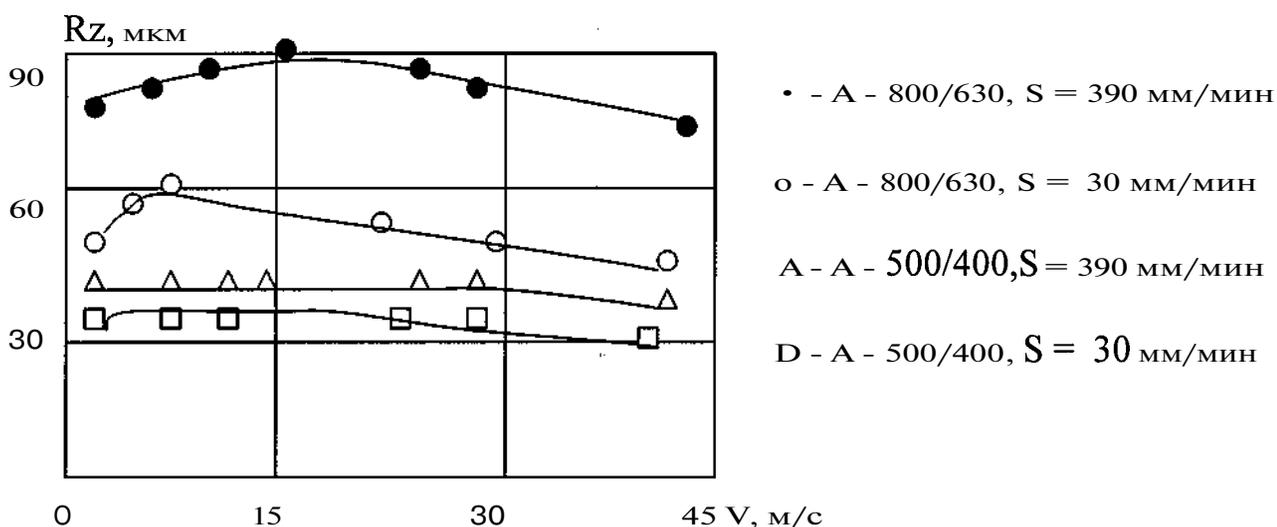


Рис.27. Влияние параметров резания на шероховатость поверхности КМУ-4Э

Адгезионная прочность клеевого соединения зависит не только от шероховатости поверхности, но и от количества активных функциональных групп на ней, которые образуются за счет механохимической деструкции полимера. Количество активных групп зависит от скорости резания [5], повышение концентрации активных групп при больших и малых скоростях резания подтверждает увеличение степени деструкции полимерного связующего. Применение ацетона для обезжиривания приводит к снижению активных групп на поверхность на 20-30%. Влияние скорости резания и способа подготовки поверхности на количество активных групп показано на рис.28.



Рис.28. Влияние скорости резания и способа подготовки поверхности на количество активных групп

Таким образом выполненное клеевое соединение на "ус" при обработке поверхности предложенным инструментом на режимах, обеспечивающих шероховатость поверхности 60-80 мкм, является равнопрочным.

Повышение качества клеевых соединений при выполнении ремонтных работ может быть достигнуто с помощью ультразвукового воздействия. В проведенной работе [18] было установлено, что в результате подвода высокочастотных механических колебаний к клеевому шву происходит, во-первых, увеличение площади сцепления клеевой прослойки с поверхностью композита за счет звукокапиллярного эффекта, который представляет собой явление аномального возрастания глубины и скорости проникновения жидкости в капиллярные каналы под действием ультразвука. Давление, создаваемое ультразвуком и действующее на жидкость в капилляре, растет с увеличением поверхностного натяжения и уменьшением вязкости жидкости. Наибольшее влияние на повышение прочности клеевого соединения оказывает амплитуда колебаний концентратора. Оптимальные ее параметры лежат в пределах 4...7 мкм. При меньших амплитудах резко увеличивается время ультразвуковой обработки (рис.29), при амплитуде выше 7 мкм происходит частичное разрушение армирующих волокон композиционного материала, возникновение мощного кавитационного процесса, что в сумме приводит к резкому снижению прочности как основного материала, так и всего клеевого соединения (рис.30).

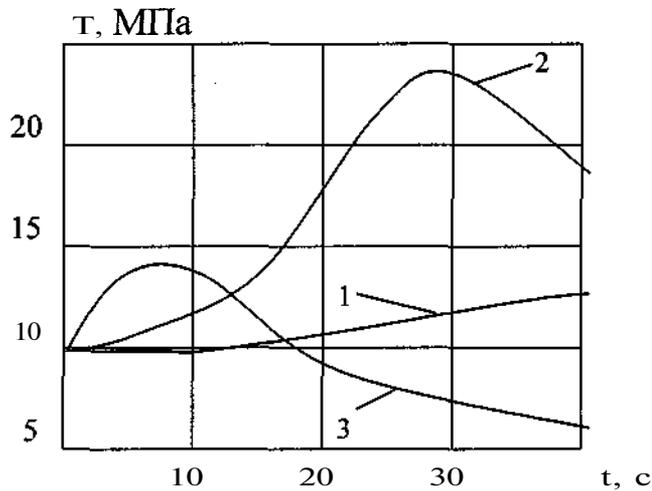


Рис.29. Зависимость прочности клеевого шва от времени обработки
1- амплитуда 3 мкм; 2- амплитуда 5 мкм; 3 - амплитуда 15 мкм

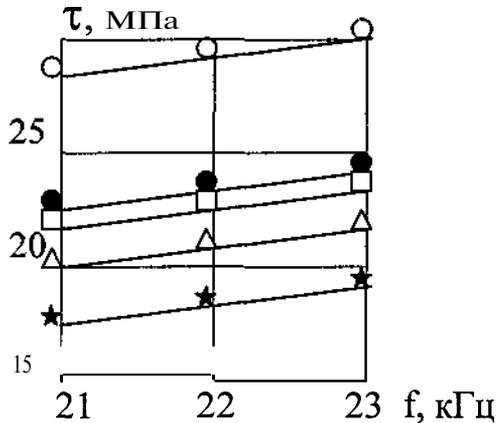


Рис.30. Влияние генерируемой частоты на прочность соединения

После обработки высокочастотными колебаниями можно снизить давление в процессе полимеризации клеевого шва, т.к. оно необходимо только в случае некоторой неплоскостности соединяемых поверхностей относительно друг друга. Кроме того, ультразвуковая обработка позволяет исключить зашкуривание поверхности соединяемых деталей и обезжиривание с помощью легковоспламеняющихся жидкостей. Эти технологические процессы заменяются на один - промывка растворами синтетическими моющими средствами, что сокращает длительность подготовительных операций и исключает возможность повреждения поверхностного слоя волокон.

Формирование клеевого слоя одна из наиболее ответственных стадий ремонта конструкций из ПКМ, особенно когда применяются клеи ВК-9, ВК-27, отличающиеся высокой, нарастающей за короткое время вязкостью. Поэтому актуальным является определение оптимальных значений технологических параметров для клеемеханических соединений.

Проведенные исследования [19] динамики изменения пластической вязкости клея ВК-27 на ранних стадиях его полимеризации показывают, что клей

ВК-27 представляет вязкопластическую жидкость, динамика изменения пластической вязкости (рис.31), описывается уравнением (32) :

$$\eta = \eta_0 \cdot t^k - 490 \cdot e^{1.94 \cdot 10^{-4} \cdot t}, \quad (32)$$

где η_0 - вязкость клея в момент окончания его приготовления;

k - тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс;

t - время приложения нагрузки.

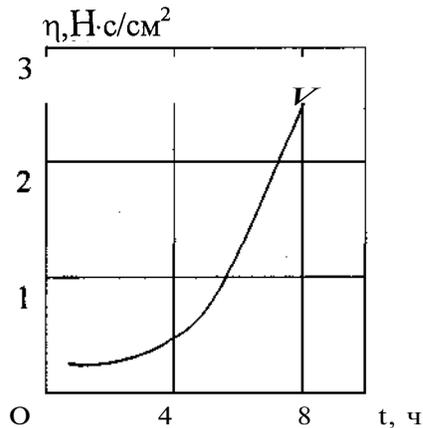


Рис.31. Изменение коэффициента динамической вязкости клея ВК-27 в процессе его полимеризации

Авторами [19] в качестве используемой модели выбрано было соединение двух деталей из сплава Д16Т толщиной 1,5 мм, длиной 400 мм с шириной нахлестки 55, 60, 65 мм, сжимаемое десятью фиксаторами суммарным усилием от 0,5кН до 16кН. Между соединяемыми деталями наносился клей ВК-27 толщиной $2h_0=0,4$ мм. Принятое функциональное ограничение по конечной толщине клеевого слоя $2h_{\min} = 0,1$ мм и $2h_{\max} = 0,2$ мм обусловлено оптимальными прочностными характеристиками клеевого соединения. По результатам работы сформирован график (рис.32), по которому можно найти усилие сжатия пакета десятью фиксаторами для получения заданной толщины клеевого слоя.

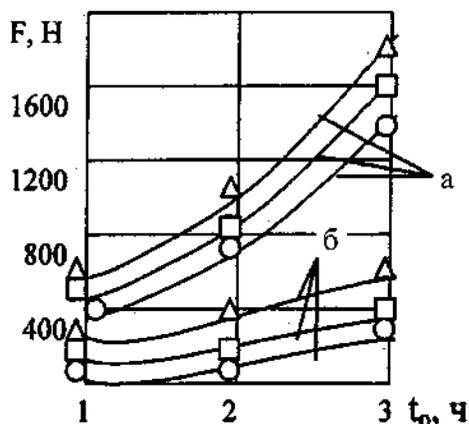


Рис.32. Изменение усилий сжатия пакета с толщиной клеевого слоя 0,1 мм (а) и 0,2 мм (б) пружинным фиксатором при ширине нахлестки 65 мм (Δ), 60 мм (\square), 55 мм (\circ)

Таким образом, возможно реально при проведении технологического процесса ремонта конструкций из ПКМ клеем ВК-27, широко применяемым в настоящее время, определять параметры технологического процесса формирования слоя клея оптимальной толщины в соединениях с заданными конструктивными требованиями. Особенно это важно при проведении ремонта непосредственно на изделии, когда создание большого избыточного давления затруднено из-за конструктивных особенностей агрегата и технологических ограничений в условиях ремонта.

Наиболее часто встречаются в слоистых полимерных композиционных материалах дефекты типа расслоения. К ним можно отнести непроклеи, воздушные макровключения, попадания разделительной пленки, имеющей низкие адгезионные свойства по отношению к полимерному связующему. Если в зоне дефекта возникают сжимающие, сдвиговые или изгибающие нагрузки, то наличие дефекта (расслоения) может вызвать снижение локальной или общей жесткости конструкции, изменение внешних обводов конструкции при выпучивании отслоившихся слоев или развитие (увеличение) зоны расслоения и разрушение конструкций. Ранее нами были рассмотрены несколько методов доработки конструкций с дефектами типа расслоения. Одним из перспективных способов доработки конструкций является прошивка зоны дефекта нитями, пропитанными связующим, или штифтами из ПКМ (полностью отвержденными или в виде препрега) [20], изготовленными методом пултрузии из пропитанных однонаправленных нитей (рис.33).

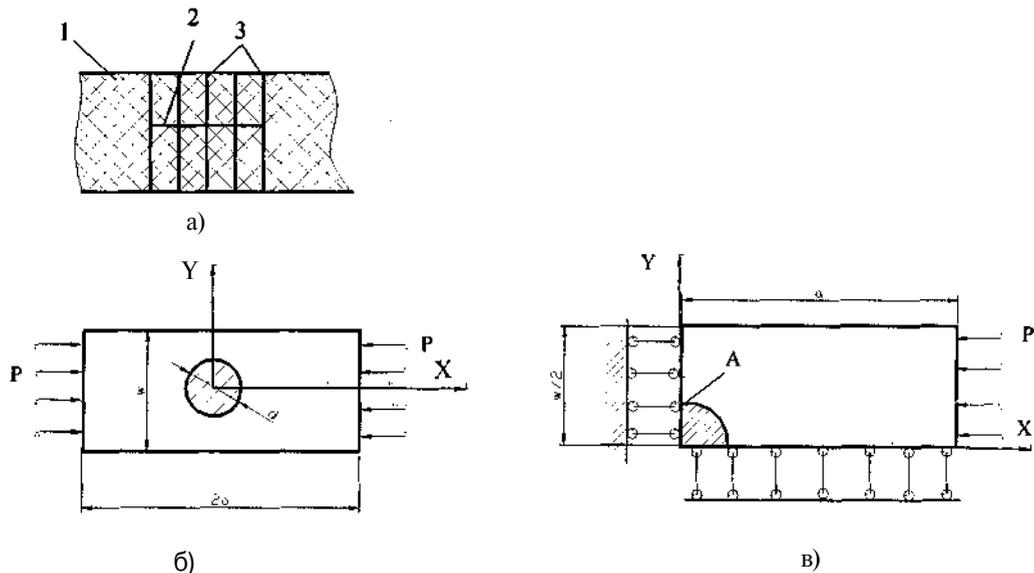


Рис.33.Схема установки сшивных элементов (а) в зоне расслоения, расчетная модель (б) и схема разбиения контура расчетной модели на элементы (в): 1 - пластина; 2 - расслоение; 3 - сшивные элементы

Применение прошивки, по МНЕНИЮ авторов, позволяет снизить величину коэффициентов интенсивности напряжений в вершине расслоения, а также значительно повысить величину критической сжимающей нагрузки, соответствующей потере устойчивости отслоившихся слоев. Кроме того, при изготовлении сшивных элементов из материала, аналогичного материалу конструкции, отпадает необходимость в решении вопроса коррозионной совместимости крепежных элементов. Однако использование прошивки приводит к образованию концентраторов напряжений в зоне установки сшивных элементов, что, как известно, оказывает влияние на несущую способность конструкции. Авторами [20] было исследовано влияние различных параметров сшивных элементов и их установки на величину коэффициента концентрации напряжений и выработаны определенные рекомендации по выбору величин этих параметров. При этом в качестве упругих **Параметров** пластины были приняты характеристики углепластика КМУ-4л с укладкой слоев $(0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ)_s$, а для сшивного элемента - характеристики однонаправленного стеклопластика на основе эпоксидного связующего ЭДТ-10 и стеклянных волокон из высокомодульного стекла ВМ-1. Расчет напряженного состояния по контуру модели произведен оценкой изменения коэффициента концентрации напряжений (ККН) в точке А (рис.33в), как наиболее опасной точке при изменении относительных размеров модели ($w/d = 2a/d = 1$). Процент изменения ККН определяется по выражению (33):

$$\frac{k_\sigma^e - k_\sigma^{e-1}}{k_\sigma^e} \cdot 100\%, \quad (33)$$

где k_σ^e - коэффициент концентрации напряжений при $1 = w/d$;

k_σ^{e-1} - коэффициент концентрации напряжений при $1 = (w-d)/d$.

Оценка изменения ККН производилась для трех различных диаметров сшивного элемента (1; 3 и 5 мм). Анализ результатов расчета [20], представлен на рис.34 в виде графиков, показывает, что при относительных размерах модели $1 \geq 6$ изменение ККН для всех диаметров не превышает 2%.

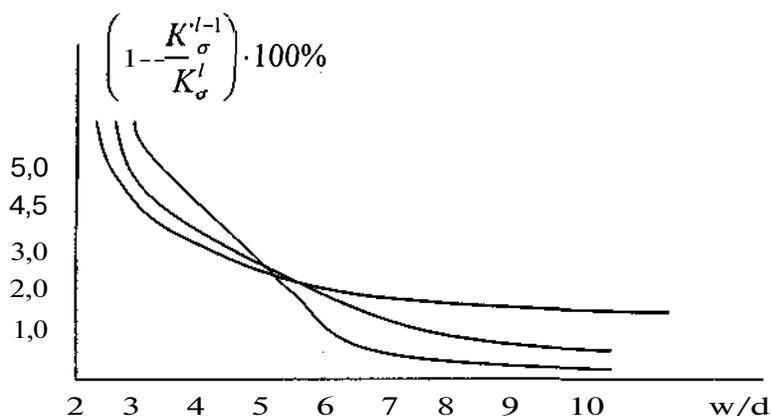


Рис.34 Влияние относительных размеров пластины и диаметра сшивного элемента на величину изменения коэффициента концентрации напряжений. Диаметры: 1 - 1 мм, 2 - 3 мм, 3 - 5 мм

Таким образом, можно сделать вывод, что при ремонте конструкций из ПКМ, имеющих дефект в виде расслоения, данным методом необходимо отверстие под шшивные элементы возможно минимальных размеров с учетом технологических особенностей выполнения шшивки. Увеличение коэффициентов анизотропии между материалами ведет к увеличению ККН, поэтому для шшивных элементов необходимо подбирать материалы, упругие характеристики которого лишь незначительно отличаются от упругих характеристик материала конструкции в соответствующих направлениях.

При выполнении ремонта трехслойных конструкций в случае замены части обшивки приходится выполнять одновременное формование заменяемой части обшивки непосредственно на сотовом заполнителе с приклеиванием ее к нему. Этот технологический прием позволяет исключить неточности, вызванные обработкой сотоблока и изготовлением обшивки, поводки и закрутки отвержденных обшивок, что приводит к появлению непроклеев и монтажных напряжений, в значительной степени влияющих на несущую способность и ресурс трехслойных конструкций.

Вместе с тем при совмещенном способе доработки трехслойных конструкций формование и полимеризация обшивок проводится на сотовом заполнителе, а не на жестком основании, поэтому возможные при этом изгибы волокон в прилегающих к сотам слоях и неоднородность макроструктуры материала могут отрицательно сказаться на механических характеристиках ПКМ.

Были проведены исследования [21] влияния способа изготовления трехслойных конструкций на прочность углепластиковых обшивок при нормальной и повышенной температурах в условиях растягивающих и сжимающих усилий. Образцы, предназначенные для испытаний на растяжение (рис.35), вырезали из двух плоских панелей под различными углами ($\beta = 0, 10, 20, 30, 45, 90^\circ$) по отношению к главной технологической оси, ориентированной в 0° .

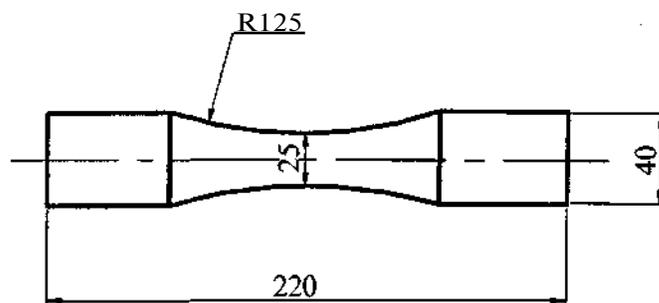


Рис.35. Образцы для испытаний на одноосное растяжение

Одна панель формовалась на жесткой плите, другая -на сотовом заполнителе высотой 10 мм из алюминиевой фольги толщиной 0,04 мм со стороной шестигранной ячейки 2,5 мм. Схема армирования обшивки - $[0^\circ_2/90^\circ_2/\pm 45^\circ/0^\circ_2/\pm 45^\circ]_s$. Испытания образцов на растяжение при нормальной температуре

(рис.36) показали, что для каждого типа укладки слоев при определении средних значений предела прочности σ_B по результатам испытаний 3-5 образцов коэффициент вариации $y_{\sigma} = 1,7...7,3\%$. Поверхность разрушения была ориентирована перпендикулярно оси **нагружения**, что соответствует характеру разрушения углепластика, когда исчерпана прочность несущих слоев, ориентированных в направлении 0° . Поскольку при повороте продольной оси образца по отношению к главной технологической оси панелей на угол β изменится ориентация прилегающих к сотам слоев, то можно оценить степень повреждения этих слоев в процессе формования и ее влияние на предел прочности σ_B углепластиковой обшивки. Повреждение слоев, ориентированных в 0° ($\beta=0^\circ$), приводит к снижению σ_B на 9% по сравнению с формованием на жесткой плите, а слоев, ориентированных в направлениях $\pm 45^\circ$ ($\beta=45^\circ$), - на 7%.

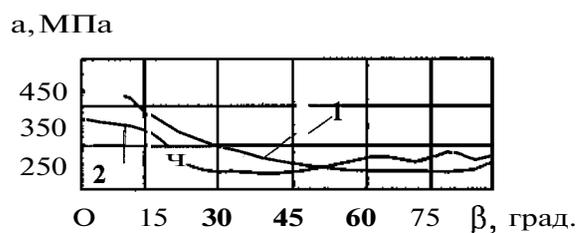


Рис.36. Результаты испытаний на растяжение образцов, сформованных на жестком основании (1) и на сотовом заполнителе (2)

Если к сотам прилегают слои с $\beta=90^\circ$, то прочность обшивки не уменьшается. Полученные данные показали, что при формовании **УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ** обшивок на сотовом заполнителе повреждается не более двух слоев, непосредственно прилегающих к обшивке. В противном случае для вырезанных под углами $\beta=45^\circ$; 90° образцов, в которых число несущих слоев, ориентированных в направлении 0° , составляет соответственно 2 и 3, снижение прочности должно быть более значительным.

Полученные результаты показывают, что при отверждении углепластиковых обшивок на сотовом заполнителе с одновременной **склейкой**, **выбор** схем армирования должен осуществляться с учетом возможного повреждения слоев. Как было исследовано в данном случае, повреждение происходит у двух слоев, прилегающих к сотам, то их расположение под углом 90° по отношению к оси нагружения позволяет избежать снижение прочности обшивок при растяжении и сжатии как в нормальных условиях, так и при умеренном нагреве до 120°C , что необходимо обязательно предусматривать при формировании схемы армирования обшивки в ремонтной зоне трехслойных агрегатов.

12. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РЕМОНТНЫХ РАБОТ

При проведении работ по ремонту конструкций из ПКМ возникают опасные и вредные производственные факторы, а именно:

повышенная загазованность и запыленность воздуха рабочей зоны;

повышенное значение тока в цепи источника питания нагревательного устройства, а также устройств для нагрева зоны ремонта;

локальная вибрация и шум, превышающие допустимые значения при работе с пневмоинструментом;

расположение рабочего места на высоте;

отклонение параметров микроклимата в производственном помещении от оптимальных значений;

недостаточная освещенность рабочего места;

возникновение зарядов статического электричества;

пары токсичных веществ;

повышенная пожаро- и взрывоопасность некоторых применяемых материалов.

Характеристики применяемых веществ по токсикологическим показателям, классу опасности и предельно допустимая концентрация содержания вредных веществ в воздухе указаны в табл.3.

При проведении ремонтных работ обязательно соблюдают требования ОСТ 1.42199-84 "ССБТ. Работы клеевые. Общие требования безопасности", "Правила техники безопасности и промсанитарии при работе с эпоксидными смолами и материалами на их основе" и другие нормативные материалы, действующие на предприятиях авиационной промышленности.

Таблица 3

Характеристики применяемых веществ в воздухе рабочей зоны

Вещество	Вредные компоненты	Агрегатное состояние	ПДК, мг/м ³	Класс опасности	Токсикологическая характеристика
1	2	3	4	5	6
Бензин	Бензин	Пары	100	4	Наркотик, действует на органы дыхания
Растворитель Р-5	Ксилол	Пары	50	3	Наркотик, раздражает слизистые, действует на кровь
Этилацетат	Этил-ацетат	Пары	50	3	Наркотик, раздражает слизистые, действует на кровь

1	2	3	4	5	6
Стекло- ткань	Стекло- пыль	Пыль	4	4	Раздражающее, фиброгенное действие; вызывает экземы, дерматиты
Гексафтор- силикат натрия	Фтористый водород	Пары Аэрозоль	0,5	2	Раздражающее действие на кожу, слизистые оболочки глаз, верхних дыхательных путей
Алюминие- вая пудра	Алюминие- вая пудра	Пыль	2	4	Фиброгенное действие
Клей ВК-25	Фенол	Пары	0,3	2	Яд, действующий на нервную систему, проникает через неповрежденную кожу
	Формаль- дегид	Пары	0,5	2	Яд, вызывает острые хронические отравления, сильно раздражает слизистые глаз и дыхательных путей
Ацетон	Ацетон	Пары	200	4	Наркотик, раздражающий слизистые оболочки
Эпоксидная смола	Эпихлор- гидрин	Пары	1	2	Аллерген, раздражает слизистые оболочки, поражает печень и почки

При работе с ЛВЖ всегда существует опасность взрыва, возникновения пожара и связанных с ним разрушений, опасность получения ожогов. Главными мерами предотвращения опасности воспламенения и взрыва является исключение применения открытого огня вблизи места работы с ЛВЖ, образование искр, проливание ЛВЖ и их подтеков. При возникновении небольших очагов пламени быстро изолируют их от притока воздуха - засыпают песком или накрывают асбестовым одеялом, а большие очаги огня тушат огнетушителем. Применять воду для тушения ЛВЖ нельзя, т.к. при контакте с водой они разбрызгиваются, увеличивая очаг пламени, будучи легче воды, всплывают и продолжают гореть. Хранение ЛВЖ осуществляется в специальных помещениях, оборудованных приточно-вытяжной вентиляцией и средствами пожаротушения.

При эксплуатации электрооборудования соблюдают "Правила устройства электроустановок". Все устройства и приборы, работающие под напряжением более 36В, должны быть надежно заземлены. Освещенность рабочей зоны не менее 200 лк. При отсутствии естественного освещения освещенность на рабочем месте обеспечивается с помощью переносных светильников напряжением не более 12 В или системой общего освещения.

При работе с **ПНЕВМОИНСТРУМЕНТАМИ** руководствуются требованиями безопасности, изложенными в “ Санитарных нормах и правилах при работе с машинами и оборудованием, создающими локальную вибрацию , передающуюся на руки работающих” СН 3041-84, а также ГОСТ 12.2.010 “ ССБТ. Машины ручные пневматические. Общие требования безопасности ”. Глаза работающего защищают от попадания пыли и стружек. Для защиты глаз используют защитные очки в соответствии с ГОСТ 12.4.013.

При проведении клеевых работ хранение, нанесение клеев и растворителей проводится в помещении, имеющем **ПРИТОЧНО-ВЫТЯЖНУЮ** вентиляцию. Все работы, связанные с подготовкой поверхности, приготовлением клеев и препрегов, раскромом и укладкой препрегов, проводят в перчатках трикотажных и резиновых. Тщательное мытье рук проводят не только во время перерывов и окончания работы, но и немедленно после случайного загрязнения рук смолой и отвердителем.

При эксплуатации, **транспортировке** и хранении баллонов со сжиженными, сжатыми и растворенными газами руководствуются “ Правилами устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением ”, действующими в авиационной промышленности.

При выполнении ремонтных работ непосредственно на изделии необходимо обязательное его заземление. Участок, расположенный под ремонтируемым агрегатом (при проведении работ на высоте от земли более 1,5 м), огораживается щитами с предупредительными надписями. При проведении ремонтных работ на высоте более 1,5 м от уровня земли используют стремянки и страховочные приспособления, пояса безопасности.

Клеевые работы характеризуются следующими вредными производственными факторами [8]:

повышенным содержанием вредных паров и аэрозолей в воздухе рабочей зоны;

наличием статического электричества;

повышенным напряжением источников питания электрооборудования;

повышенным уровнем вибрации;

повышенным уровнем ультразвука контрольных установок;

повышенным уровнем шума на рабочем месте;

наличием электромагнитного поля;

повышенной температурой поверхности оборудования и приспособлений;

наличием подвижных частей оборудования;

наличием острых кромок и заусенцев на поверхностях деталей и оборудования.

Работа с пожароопасными и вредными веществами проводятся при включенных вентиляционных системах. При ручном обезжиривании поверхностей применяют хлопчатобумажные салфетки, тампоны и другие материалы, не способствующие накоплению статического электричества, а в используемый бензин добавляются антистатические присадки типа «Сигбол». Загрязненный

при обезжиривании и нанесении клея обтирочный материал, а также твердые отходы складываются в плотно **закрывающуюся** металлическую тару, которую по мере заполнения, но не реже одного раза в смену, удаляют из производственного помещения в специальные, определенные пожарной охраной, места.

Все применяемые вредные вещества должны иметь установленные предельно допустимые концентрации в воздухе рабочей зоны и токсикологическую характеристику, утвержденную органами здравоохранения.

Концентрация **ВЗРЫВО-** пожароопасных веществ в местах их наибольшего скопления не должна превышать предельно допустимых **взрывобезопасных** концентраций.

При разработке технологических процессов ремонта конструкций из ПКМ необходимо максимально устранять воздействия вредных и опасных производственных факторов, для чего:

ограничивать применение вредных и пожароопасных веществ и заменять их на менее вредные **Пожароопасные, исключив** применение органических растворителей;

заменять операции, связанные с возникновением опасных и вредных производственных **факторов, операциями**, при которых указанные факторы отсутствуют: создавать новые способы обезжиривания, уменьшать число операций по нанесению клея с помощью кистей, исключать операции по нанесению жидкого клея в качестве **Подслоя**; широко применять операции с использованием клеев, препрегов и по возможности заменять пастообразные клеи на пленочные, применять технологические слои из лавсана и других материалов для исключения операций зашкурирования поверхностей **ПКМ** перед склеиванием.

При проведении испытаний с использованием сбросов воздуха необходимо учитывать, что они относятся к числу наиболее **особосложных** и опасных [17]. Эти испытания могут сопровождаться разрушением испытуемых изделий, образованием осколков и взрывной волны. Безаварийная и безопасная работа при **пневмоиспытаниях** зависит от технической подготовленности рабочих и инженерно-технического состава, соблюдения ими технологического режима, правил и инструкций по технике безопасности.

Пневмоиспытания проводят на специальных установках-стендах, к которым предъявляют особые требования в отношении прочности и надежности. В зависимости от **произведения** испытательного давления на объем полости испытательного изделия пневматические испытания по степени опасности подразделяют на несколько групп.

Пневмоиспытания изделий при величинах $PV < 0,3 \text{ МПа} \cdot \text{м}^3$ проводятся на стендах, которые разрешается размещать в производственных зданиях при наличии других производственных процессов. Установки при $PV > 0,3 \text{ МПа} \cdot \text{м}^3$, но $< 2,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^3$, как правило, размещают в изолированных помещениях; при $PV > 2,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^3$ установки располагаются на испытательных станциях, удаленных от других производственных помещений.

Проектирование пневмоустановок (стендов) производится специальными проектными организациями или службами предприятия. Испытательные ПНЕВМОУСТАНОВКИ (стенды) принимаются в эксплуатацию специальной комиссией. Испытательные пневмостенды подвергаются периодическим освидетельствованиям, которые проводятся в соответствии с графиками не реже одного раза в год. Пневматические испытания на установках проводят с обязательным применением защитных устройств.

В зависимости от габаритных размеров испытываемых изделий и давления применяют следующие виды защит : бронеколпаки, **броннекамеры** и боксы.

К работе на пневмоустановках допускаются лица не моложе 18 лет, прошедшие медосмотр, техническое обучение и имеющие удостоверение на право работы со сжатым воздухом, с ежегодной переаттестацией.

Пневмоиспытания проводят строго по технологическим программам или процессам в соответствии со схемой испытаний под руководством ответственного за испытание, назначенного из числа **инженерно-технического** состава. Проводить испытания разрешается только на исправном и принятом в эксплуатацию оборудовании с **защитными** устройствами, системами блокировки и сигнализации при строгом соблюдении правил и требований техники безопасности: К подготовке и проведению **пневмоиспытаний** допускаются только работники, обслуживающие испытательную установку. Допуск посторонних лиц на пневмоустановку запрещен.

При выполнении ремонтных работ широко используется стационарное оборудование и пневмоинструмент, работа которого создает повышенные уровни шума, общей вибрации и локальной вибрации, передающейся на руки работающих. Поэтому необходимо проведение комплекса мероприятий по устранению этих вредных производственных факторов до допустимых значений. Одним из основных направлений является уменьшение шума и вибрации в источнике возникновения, что достигается следующими способами:

исключение ударных операций;

балансировка динамических вращающихся деталей и узлов;

исключение перекоса и эксцентриситета работающих деталей и узлов машин;

использование машин в строгом соответствии с паспортными требованиями;

применение звукопоглощающих материалов и конструкций;

применение виброизоляции, что снижает уровень вибрации, передающейся от оборудования на строительные конструкции здания;

применение вибропоглощения с" помощью специальных вибропоглощающих материалов с высоким внутренним трением.

Кроме того, интенсивный шум возникает от всасывания воздуха и выхлопов газов при работе компрессоров и пневматических инструментов и т.п. Он возникает вследствие виброобразования и пульсации давления . В этих случаях необходимо правильно **Производить** выбор типа глушителя. Основными типа-

ми глушителей являются активные и реактивные глушители шума, иногда применяют комбинированные глушители, работающие на принципе активного и реактивного глушения звуков. Работа активных глушителей шума основана на принципе поглощения звуковой энергии слоями звукопоглощающего материала, а работа реактивных глушителей основана на принципе акустического фильтра.

В тех случаях, когда общие технические методы снижения уровней шума и вибрации недостаточны, применяют индивидуальные средства защиты от шума и вибраций.

Индивидуальные средства защиты от шума в зависимости от способа применения бывают внутреннего и наружного типа и подразделяются на следующие группы :

- ушные вкладыши или наушники;
- шлемы;
- электронные средства защиты от шума.

Индивидуальные средства, защищающие от вибрации, подразделяются на группы :

средства защиты человека от общей вибрации (амортизирующие площадки, сиденья, специальная обувь и т.п.);

средства защиты от местной (локальной) вибрации (виброзащитные рукавицы, перчатки, наколенники и т.п.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захаров В.А. Конструирование узлов и деталей из композиционных материалов. М.: МАИ, 1992. 64 с.

2. Зайцев Г.П., Пашков В.А. и др. Прочность, упругость и трещиностойкость однонаправленного органопластика типа СВМ при растяжении // Вопросы прочности и долговечности элементов авиационных конструкций: Межвуз. сб. научных трудов. Куйбышев : КуАИ, 1980. С. 79-81.

3. Коновалов Б.А. Остаточная прочность трехслойной оболочки из композиционного материала с макродефектом в наружном слое // Вопросы прочности и долговечности элементов авиационных конструкций: Межвуз. сб. научных трудов. Куйбышев : КуАИ, 1990. С. 138-143.

4. Ванин Г.А. О разрушении волокнистых сред // Актуальные проблемы авиационной науки и техники : Сборник статей. М. : Машиностроение, 1984. С.58-66.

5. Дрожжин А.В. Влияние структуры поверхности полимерных композиционных материалов на прочность ремонтного клеевого соединения // Проблемы совершенствования ремонта авиационной техники: Сб. науч. тр./ МИИГА. М., 1989. С.52-55.

6. Кортен Х.Т. Разрушение армированных пластиков. М. : Химия, 1967. 165с.

7. Крысин В.Н. Слоистые клееные конструкции в самолетостроении. М.: Машиностроение, 1980. 228 с.

8. Крысин В.Н., Крысин М.В. Технологические процессы формования, намотки и склеивания конструкций. М.: Машиностроение, 1989. 240 с.

9. Кардашов Д.А. Синтетические клеи. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1976. 504 с.

10. Композиционные материалы: Справочник / В.В.Васильев, В.Д.Протасов, В.В.Болотин и др.; Под общ. ред. В.В.Васильева, Ю.М.Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.

11. Технологический неразрушающий контроль пластмасс / Потапов А.И., Игнатов В.М., Александров Ю.Б. и др. Л.: Химия, 1979. 288 с.

12. Производственная инструкция ПИ 1.4.1484-94. Контроль неразрушающий неразъемных соединений из полимерных композиционных материалов. М: НИАТ, 1994.

П. Мельников П.С. Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1991. 384 с.

14. Технологические рекомендации ТР 1.4.1831-88. Ремонт сотовых клееных конструкций из полимерных композиционных материалов. М.: НИАТ, 1984. 183 с.

15. Смыслова Р.А., Котляров С.В. Справочное пособие по герметизирующим материалам на основе каучуков. М.: Химия, 1976. 72 с.

16. Лакокрасочные материалы в машиностроении / Под редакцией Гольдберга М.М. М.: Машиностроение, 1974. 576 с.

17. Сборочные, монтажные и испытательные процессы в производстве летательных аппаратов: Учебник для студентов высших технических учебных заведений / В.А. Барвинок, В.И. Богданович, П.А. Бордаков, Б.П. Лешков, И.Н. Желтов, И.А. Докукина; Под редакцией проф. В.А. Барвинка. М.: Машиностроение, 1996. 576 с.

18. Захаров Н.Г. Влияние ультразвуковой обработки на свойства клеевой композиции / Проблемы совершенствования ремонта авиационной техники: Сб. науч. тр. М.: МИИГА, 1989.

19. Матвиенко В.А. и др. Использование метода многокритериальной оптимизации для определения параметров процесса формирования клевого слоя // Авиационная промышленность. 1992. № 5. С.36-37.

20. Сироткин О.С. и др. Влияние упругих параметров композиционных материалов на концентрацию напряжений в зоне сшивных элементов // Приложение к журналу "Авиационная промышленность". 1989. № 5. С. 3-6.

21. Ушаков А.Е., Акименко А.А. Влияние способа изготовления на статическую прочность трехслойных **СОТОВЫХ** конструкций с обшивками из углепластика КМУ-4Э // Авиационная промышленность. 1989. № 7. С.3-5.

Учебное издание

РИВИН Георгий Леонидович

Ремонт конструкций из полимерных
композиционных материалов летательных аппаратов
Учебное пособие

Редактор Н.А.Евдокимова

Изд. лиц. 020640 от 22.10.97 ,

Подписано в печать 30.12.99, Формат 60 x 84 / 16. Бумага писчая.

Усл.печ.л. 4,42, Уч.-изд.л. 4,50. Тираж 100 экз. Заказ 726.

Ульяновский государственный технический университет

432027. Ульяновск, Сев. Венец, 32.

Типография УлГТУ, 432027. Ульяновск , ул. Сев.Венец , 32.