

УДК 620.22-419.8:629.7+629.735.33.083.02

*Кива Д.С., Двейрин А.З., Василевский Е.Т., Петропольский В.С., Горбеец П.И., Гаврилюк С.Е.,
Гайдукова С.М., Величко В.В.*

Государственное предприятие «Антонов». Украина, г. Киев

МЕТОДЫ РЕМОНТА АГРЕГАТОВ ПЛАНЕРА САМОЛЕТОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ТРУБЧАТЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

Рассмотрены вопросы разработки методов поддержания летной годности конструкций из КМ с трубчатым наполнителем с учетом требований прочности, надежности и технологичности в условиях авиационно-технической (ремонтной) базы эксплуатанта авиационной техники (АТ). Отработаны несколько конструктивно-технологических решений (КТР) по выполнению ремонтов. Проведены экспериментальные работы по проверке выбранных конструктивно-технологических решений с учетом влияния окружающей среды. Сформирован комплект необходимого оборудования для проведения ремонтов панелей с трубчатым наполнителем в условиях эксплуатанта АТ.

Ключевые слова: композиционные материалы, трехслойная структура с трубчатым наполнителем, ремонт, конструктивно-технологические решения, комплект оборудования для выполнения ремонта.

В настоящее время в авиационной отрасли всего мира остро стоит вопрос ремонта агрегатов и элементов конструкций из композиционных материалов в условиях эксплуатации самолета. Это связано с быстрым ростом объемов применения композиционных материалов в конструкциях самолетов.

Например, объем применения КМ в планере самолетов В-787 и А-350 превышает 50% по массе. Авиаперевозчикам и провайдерам ТОиР необходимо иметь технологию ремонта и данные по силовой конструкции агрегатов из КМ, однако производители защищают эту информацию, как интеллектуаль-

ную собственность. Фирмы Airbus и Boeing планируют в сжатые сроки разрабатывать рекомендации по ремонту, которые пока не описаны в руководствах, используя технологии 3D-моделирования и данные о конструкции самолета [1].

Целью настоящей работы является разработка конструктивно-технологических решений и технологий по ремонту трехслойных конструкций с трубчатым наполнителем из КМ, формирование оборудования, инструментария и материалов для проведения ремонтов в условиях эксплуатирующих организаций при относительно небольших затратах на их приобретение.

Примерно так же, как для металлических конструкций устанавливаются критические размеры трещин, для композиционных элементов определяются критические размеры повреждений (включая зону скрытого расслоения), превышение которых приводит к быстрому (всего за несколько циклов нагружения) исчерпанию несущей способности.

В пределах от «порога обнаружения» до упомянутого критического размера устанавливаются несколько уровней «допустимости» дефектов или повреждений. Эти уровни «допустимости» дефектов можно рассматривать и как техническую, и как экономическую категорию. Действительно, технически возможно разбирать и проверять самолет вплоть до последнего винтика буквально перед каждым полетом, — подобная эксплуатация будет чрезвычайно надежной, но абсолютно экономически провальной.

Для композиционных конструкций характерно то, что здесь большее внимание уделяют не скорости развития повреждений, а сохранению остаточной прочности конструкции, в том числе и за счет резервирования путей передачи нагрузки. Как видно из рис. 1 конструкция из КМ с повреждением обеспечивает остаточную прочность при нагрузках не ниже эксплуатационных [2]. Периодичность контроля

композиционных конструкций в эксплуатации устанавливается с учетом вероятности возникновения повреждений. После выполнения ремонта прочность конструкции восстанавливается до максимальной расчетной нагрузки.

Наряду с традиционными методами визуальных осмотров с обязательным обеспечением доступа ко всем основным силовым элементам заметно возрастает роль надежных высокопроизводительных средств инструментального неразрушающего контроля (НК). Это вызвано теми обстоятельствами, что, во-первых, для современных самолетов речь идет уже об очень значительных контролируемых площадях, и, во-вторых, только инструментальные методы позволяют обнаруживать скрытые дефекты, которые для композиционных конструкций как раз и являются наиболее опасными.

Для выявления макродефектов наиболее часто применяются акустические и ультразвуковые методы неразрушающего контроля, а также рентгенография. Наиболее популярный из этих методов — метод свободных колебаний, вернее даже его частный случай — простое простукивание. Однако при том, что этот метод весьма доступен в силу своей простоты, он довольно субъективен, требует высокой квалификации оператора и может служить лишь основой для углубленного исследования с помощью, например, ультразвуковых методов. Все варианты ультразвукового метода НК, будучи менее производительными по сравнению с методом свободных колебаний, имеют значительно более высокую чувствительность и, кроме того, позволяют достаточно точно установить границы дефекта и его местоположение по толщине пакета.

Ремонты композиционных конструкций в зависимости от назначения и нагруженности поврежденного элемента, а также от размеров самой поврежденной зоны можно разделить на «косметические» и силовые.

Первые служат главным образом лишь для восстановления внешней поверхности самолета и восприятия местной аэродинамической нагрузки. Как правило, подобным ремонтам подвергаются обшивки с явными повреждениями, но не превосходящими по размеру допустимые дефекты (например, пробоины или «проколы» обшивки). Силовые ремонты — это ремонты высоконагруженных элементов, участвующих в передаче нагрузок, а также ремонты обширных повреждений (превосходящих допустимые размеры) тонкостенных элементов конструкций.

Ремонтные и вспомогательные материалы как для «косметических», так и для силовых ремонтов должны быть доступными и хорошо сохраняющими свои свойства при длительном хранении. Техпроцессы и технические средства, включая устройства для создания местного давления и местного подогрева должны позволять

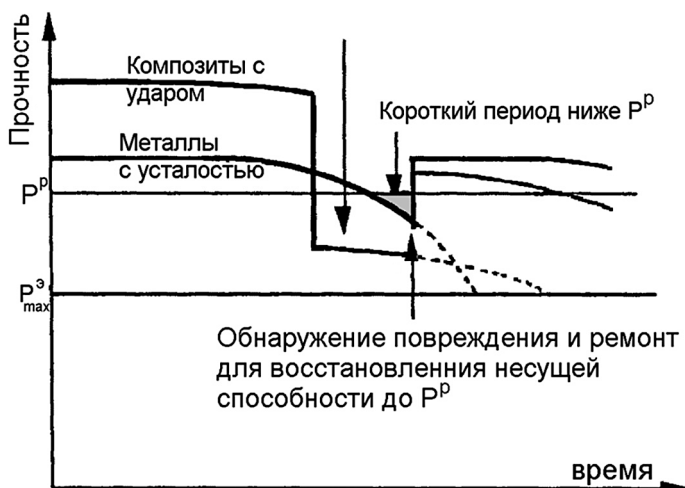


Рис. 1. Остаточная прочность конструкции из КМ в сравнении с металлической

их применение не только в заводских, но и в аэродромных условиях с помощью мобильного оборудования. В целом ремонты должны обеспечивать полное восстановление статической прочности конструкций, а также их надежность и долговечность на весь оставшийся срок службы самолета. В отдельных случаях допускаются «полевые» ремонты с ограниченной долговечностью, служащие, как правило, для краткосрочного восстановления агрегатов самолета либо для обеспечения возможности перелета самолета на ремонтную базу, где в последующем выполняется полноценный ремонт конструкции.

Материалы и технологии восстановительных ремонтов еще на этапе разработки конструкций должны быть максимально типизированы и, как и сама конструкция, пройти необходимые сертификационные процедуры, подтверждающие их годность.

Представленные далее технология и оборудование разработаны с учетом возможностей выполнения ремонтов в условиях авиационно-технической (ремонтной) базы эксплуатанта АТ с участием разработчика воздушного судна (ВС), которое представляется необходимым в связи с тем, что, в отличие от традиционных металлических конструкций, эксплуатирующие авиакомпании, как правило, не располагают полной информацией об устройстве ламинатов композиционных элементов планера самолета.

Для оценки возможности проведения ремонтов с применением клея проведен анализ существующих видов ремонта конструкций из КМ, в частности один из наиболее сложных случаев ремонта с односторонним доступом, и установлено, что наиболее

широко применяемым способом соединения ремонтных элементов (накладок) с основной неповрежденной конструкцией является соединение с помощью клея.

Проведены испытания на срез ремонтных образцов на клее ВК-9 с полимеризацией при температуре до 70 °С и умеренном давлении склейки, создаваемом за счет применения вакуума в зоне ремонта. Выполнено сравнение прочности ремонтных образцов с прочностью исходных неповрежденных соединений и проверена устойчивость ремонтных соединений к долговременному воздействию влаги.

Ниже приводятся эскизы образцов (рис. 2), их описание, а также результаты их испытаний. Показатели прочности оценивались как по усредненным данным, так и по В-базису (т.е. с вероятностью 90% при 95-процентном доверительном интервале). Исследования проводились на образцах:

- вариант А (базовый) – типовое односрезное нахлесточное соединение (рис. 2а), примененное при изготовлении каркасов киля и стабилизатора и моделирующее поэтапный техпроцесс вакуум-автоклавного формования;

- вариант Б (ремонтный) – односрезное нахлесточное соединение, выполненное с применением клея ВК-9 (рис. 2б).

Технологические особенности изготовления образцов:

Вариант А:

Пластины 1 и 2 предварительно отформованы вакуум-автоклавым методом, пластина 2 приформована к пластине 1 при помощи четырех слоев пре-

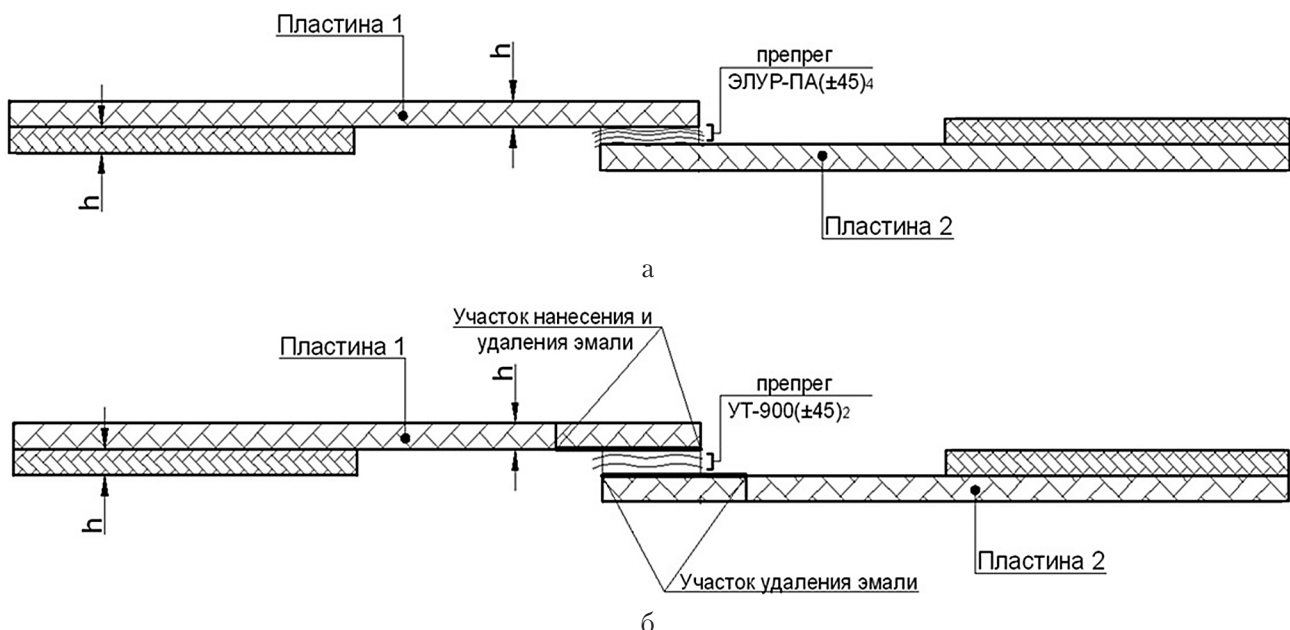


Рис. 2. Образцы для испытаний соединений заранее отформованных пластин из КМУ:

а) типовое односрезное нахлесточное соединение, моделирующее поэтапный техпроцесс вакуум-автоклавного формования;
б) ремонтное односрезное нахлесточное соединение с прокладкой, формируемой одновременно со склейкой пластин



прега ЭЛУР-ПА на связующем ЭДТ-69Н (угол укладки ± 45) вакуум-автоклавным методом по режиму для связующего ЭДТ-69Н.

Вариант Б:

Пластины 1 и 2 предварительно отформованы вакуум-автоклавным методом по аналогии с вариантом А. После полимеризации на пластины 1 и 2 нанесено 2 слоя эмали ЭП-140 темно-зеленого цвета по схеме 186 ОСТ190055-85, после высыхания эмаль удалена зачисткой на расстоянии 20 мм от краев пластин (в зоне склейки). Пластина 2 приформована к пластине 1 при помощи двух слоев препрега УТ-900 на клее ВК-9 с приложением вакуумного давления 0,5 атм. по ПИ1.2.178-81, угол укладки слоев УТ-900 (± 45).

Результаты испытаний представлены в табл. 1, где в соответствующих столбцах указаны:

τ_{cp} — средние значения разрушающих напряжений в соединении;

$\tau_{«В»}$ статистически «надежные» значения разрушающих напряжений, рассчитанные по «В»-базису.

Разрушающие напряжения для обоих вариантов определялись как на свежизготовленных образцах (с выдержкой в условиях лаборатории в течение более 72 ч для полной полимеризации), так и после влагонасыщения образцов в дистиллированной воде при температуре лаборатории в течение 30 суток. На основных образцах (вариант А) разрушение происходило по границе между предварительно отформованными пластинами и слоями препрега ЭЛУР-ПА на

связующем ЭДТ-69Н, использованным для приформовки. Ремонтные образцы (вариант Б) разрушались по границе между предварительно отформованными пластинами и ремонтными слоями препрега УТ-900 на клее ВК-9.

Из табл. 1 видно, что прочность ремонтных образцов, выполненных с помощью клея (вариант Б), оказалась выше образцов, соединение которых выполнено вакуум-автоклавным формованием (вариант А). Таким образом, ремонт с использованием клея ВК-9 может быть применен как в условиях авиационно-технической базы, так и, с определенными ограничениями, непосредственно в аэродромных условиях.

Ремонт дефектов трехслойных панелей с трубчатым наполнителем выполнялись одним из следующих способов:

1. Ремонт с удалением блока трубчатого наполнителя (рис. 3) и установкой блока из пенопласта ЭТР1 и ремонтной накладки на клее ВК-9 (рис. 4). При этом во вкладыше из пенопласта выполнялись каналы вдоль трубчатого наполнителя для обеспечения циркуляции воздуха.

2. Ремонт с установкой механического крепежа внутри объема трубчатого наполнителя для более высокой прочности соединения показан на рис. 5.

При проведении ремонта панелей с трубчатым наполнителем работы проводились в следующем порядке:

- оценка дефектов — осмотр и проведение неразрушающего контроля агрегатов, нанесение контуров поврежденных мест (границ расслоений);

Таблица 1.

Образец	Кол.-во образцов	τ_{cp} , кг/мм ²	k	SD	$\tau_{«В»}$, кг/мм ²
Пластины — заранее отформованные из углепластика ЭЛУР-ПА/ЭДТ-69Н. Соединение — вакуум-автоклавная приформовка препрегом ЭЛУР-ПА [± 45] ₄ на связующем ЭДТ-69Н. Состояние — свежизготовленные.	8	8,91	2,583	0,911	6,56
Пластины — заранее отформованные из углепластика ЭЛУР-ПА/ЭДТ-69Н. Соединение — вакуум-автоклавная приформовка препрегом ЭЛУР-ПА [± 45] ₄ на связующем ЭДТ-69Н. Состояние — после влагонасыщения.	8	8,74	2,756	1,275	5,23
Пластины — заранее отформованные из углепластика ЭЛУР-ПА/ЭДТ-69Н. Соединение — склейка препрегом УТ-900 [± 45] ₂ на клее ВК-9. Состояние — свежизготовленные.	7	12,3	2,583	1,242	9,09
Пластины — заранее отформованные из углепластика ЭЛУР-ПА/ЭДТ-69Н. Соединение — склейка препрегом УТ-900 [± 45] ₂ на клее ВК-9. Состояние — после влагонасыщения.	8	14,31	2,756	1,771	9,43

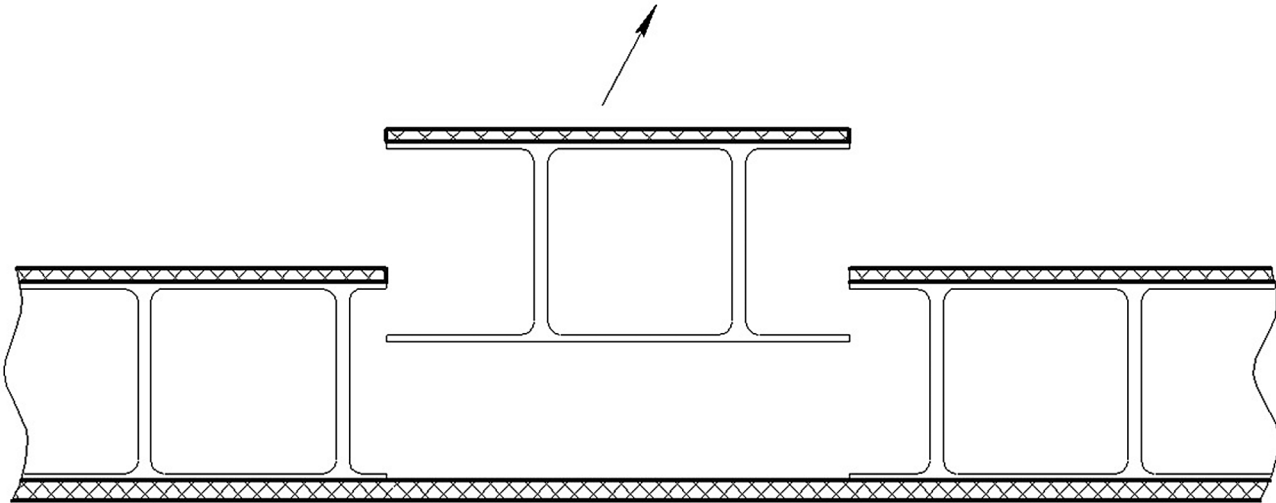


Рис. 3. Удаление трубчатого заполнителя и обшивки

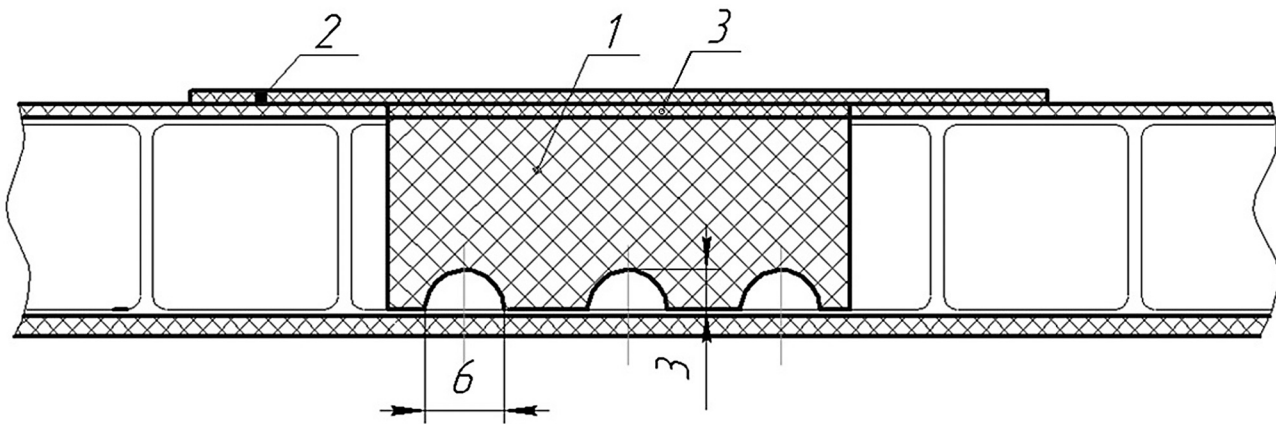


Рис. 4. Ремонт с удалением трубчатого заполнителя и установкой пенопласта ЭТ-Р1 и наклейки на клею ВК-9:
1 – вкладыш из пенопласта ЭТ-Р1; 2 – ремонтная наклейка из ЭЛУР-0,08П ± 80₂ (или УТ-900-2,5А 0,90) на клею ВК-9;
3 – прокладка

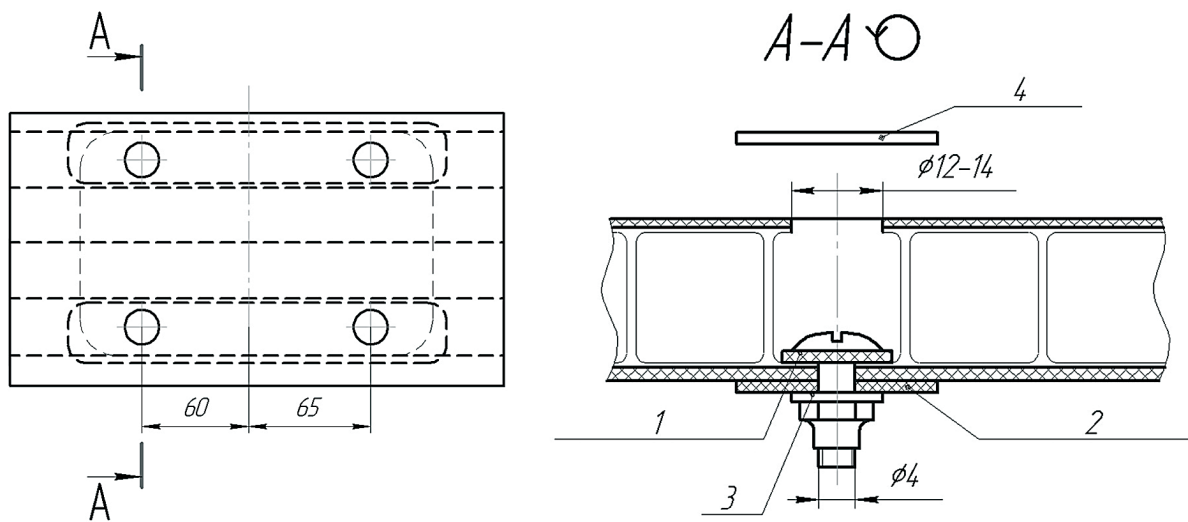


Рис. 5. Ремонт с установкой механического крепежа:
1 – прокладки из отформованного углепластика (УТ-900); 2 – ремонтная наклейка (УТ-900); 3 – крепеж титановый (стальной): Винт М4×25 ОСТ31528-80(3166А); Шайба ОСТ 34505-80; Гайка М4 ОСТ 33017-80 (3301А); 4 – наклейка из углепластика (УТ-900 + ВК-9)



Рис. 6. Комплект оборудования

- определение местоположения стенок трубчатого заполнителя в зонах ремонта;
- разметка контуров дефектов. Перенесение контуров дефектов внутренних обшивок на наружную обшивку. Разметка положения стенок трубчатого заполнителя на наружной обшивке. Разметка осей установки крепежных элементов. Выполнение рабочих шаблонов;
- удаление ЛКП и подготовка поверхности для обеспечения надлежащего соединения между первичной структурой и ремонтными композитными заплатками;
- удаление поврежденных слоев;
- неразрушающий контроль для определения наличия или отсутствия дефектов в зоне удаленных слоев;
- установка прокладок в зоне ранее удаленных слоев, а также установка ремонтных накладок для восстановления несущей способности.

При формировании комплекта необходимого оборудования для проведения ремонтов были учтены следующие тре-

бования: доступность, возможность применения в условиях АТБ и простота использования, при которой не требуется высокая квалификация рабочего персонала. Учитывая данные требования, на основе принятых КТР и разработанных методик выполнения ремонтов конструкций из КМ с трубчатым наполнителем в условиях авиационно-технической ремонтной базы эксплуатанта АТ был сформирован комплект необходимого оборудования (рис. 6) для выполнения ремонтных работ:

- портативный инъекционный блок;
- вакуумметр со штуцером;
- промышленный фен;
- миниатюрный резец LWA 70 KF (Алмазный диск DS 22×0,8) (для механической обработки в зонах ремонта);
- машинка плоскошлифовальная LSO31;
- машинка шлифовальная угловая LBC16;
- ультразвуковой дефектоскоп (типа ИД91М).

Ниже приведены несколько примеров типовых ремонтов конструкций с трубчатым наполнителем.

Ремонт дефектов внутренней обшивки. При ремонте обшивок вместо удаленных слоев укладывались прокладки из однонаправленных лент и углеродной ткани. Для обеспечения необходимой прочности соединения укладывались слои ремонтной накладки внахлест со смещением. Пропитка тканей и лент из углеродных волокон осуществлялась путем нанесения по поверхности клея ВК-9 (рис. 7). Полимеризация ремонтной заплатки потребовала тщательного контроля температуры на ремонтируемой зоне для клея ВК-9: 24 час при $t = 18-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ либо 1 час при $t = 60-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, а также создания давления (на уровне вакуумного давления $0,5-0,8\text{ кг/см}^2$). Для выполнения этих требований к клеевым работам было приме-



Рис. 7. Нанесение клея ВК-9 при установке слоев ремонтной накладки

нено специальное оборудование: портативный инъекционный блок и промышленный фен (рис. 6). В качестве нагревателя также можно применять электрические термоодеяла. Постоянный контроль давления под мешком осуществлялся с помощью вакуумметра, подсоединенного к вакуумному мешку.

Ремонт с установкой крепежа в зоне дефектов внутренней обшивки. Дополнительные трудности для проведения клеевых работ возникли при ремонте агрегатов в случае наличия двойной кривизны поверхности, поэтому дополнительно для повышения прочности и надежности соединения устанавливались крепежные элементы. Отверстия под установку крепежных элементов вскрывались по центру трубчатого заполнителя (рис. 8). Для этого, с помо-

щью полученных рентгеновских снимков и плазменных шаблонов, границы трубчатого заполнителя и центры отверстий под крепеж были перенесены на внешнюю обшивку. Далее, центробором с алмазным напылением $\varnothing 12$ мм, вскрывались отверстия в наружной обшивке. На следующем этапе на внутренней поверхности устанавливалась ремонтная накладка из углеткани УТ-900-3А, вскрывались отверстия $\varnothing 4,1$ мм во внутренней обшивке и устанавливался крепеж. (рис. 9).

Далее в зоне крепежа устанавливались на клей ВК-9 пенопластовые заглушки. На наружную поверхность укладывались ремонтные накладки из ткани УТ-900-3А и молниезащитное полотно (рис. 10).

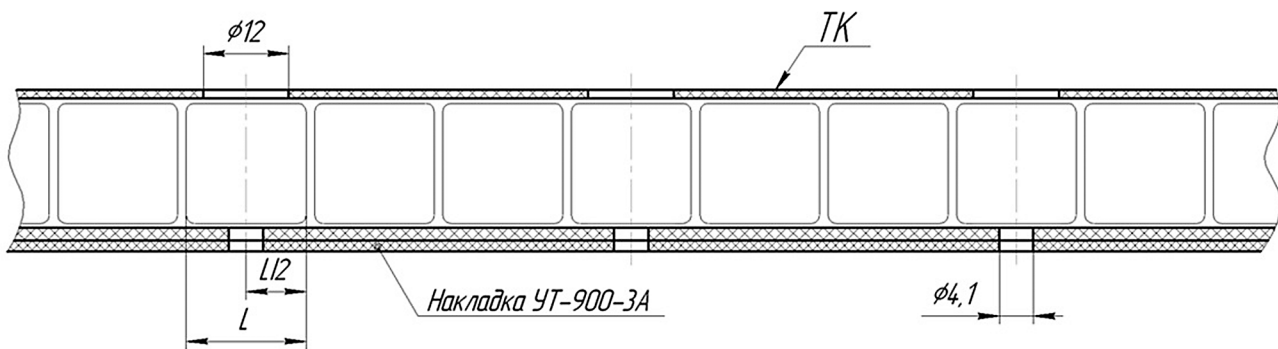


Рис. 8. Вскрытие отверстий под крепеж

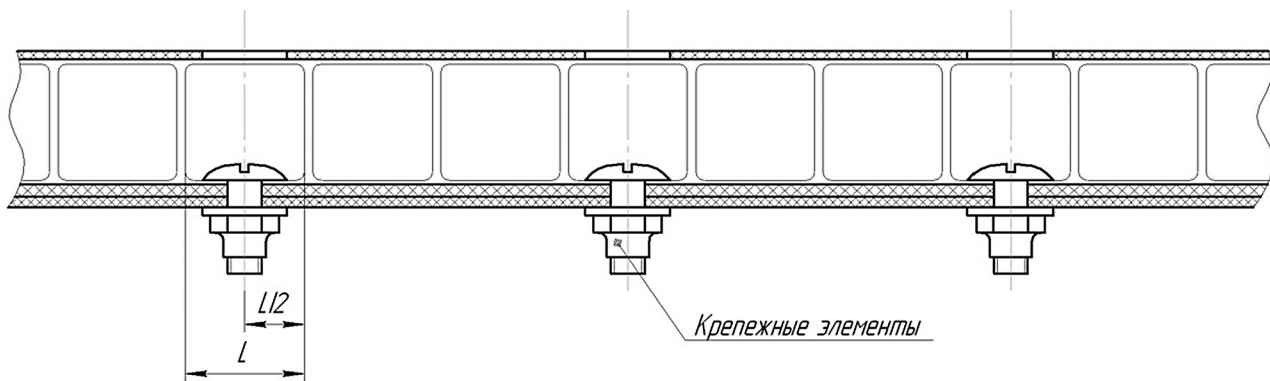


Рис. 9. Установка механического крепежа

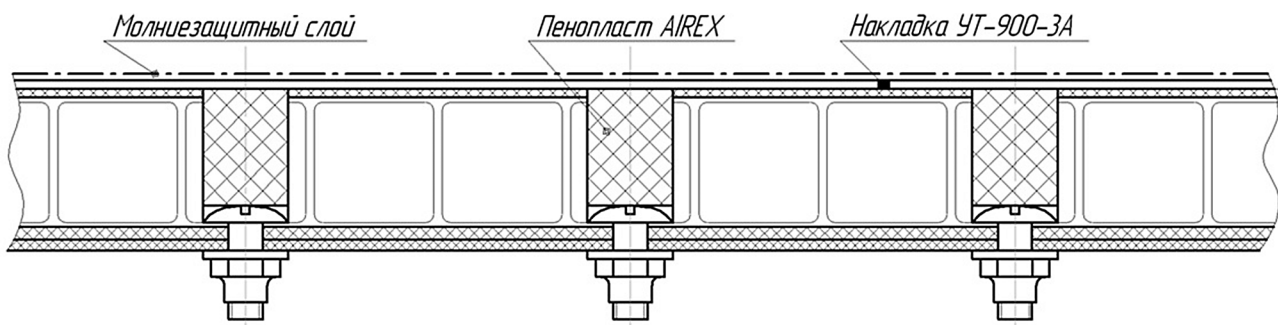


Рис. 10. Установка накладок из углеродной ткани на наружные обшивки

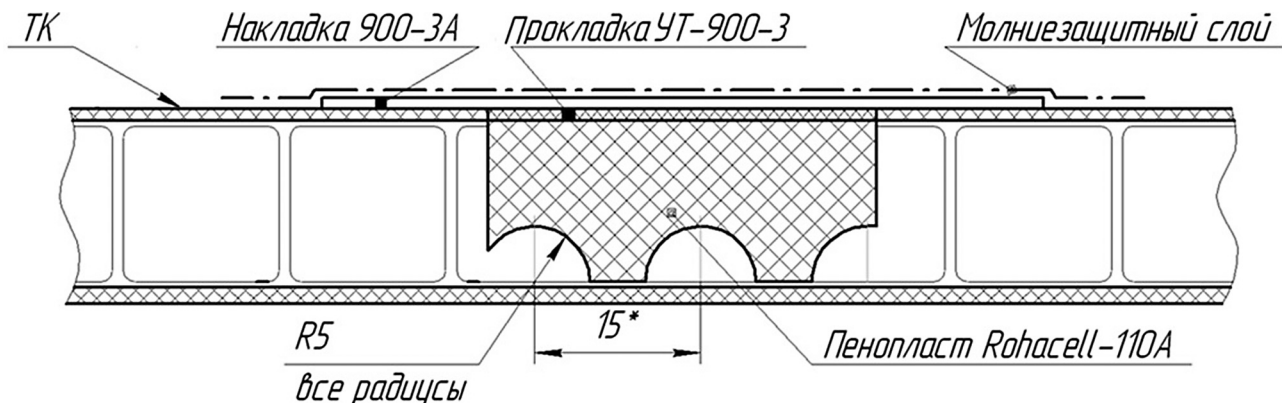


Рис. 11. Ремонт отслоений наружной обшивки от трубчатого заполнителя

Ремонт дефектов наружной обшивки и трубчатого заполнителя. Поврежденная часть обшивки и заполнителя удалялась из конструкции. Вместо удаленного трубчатого заполнителя устанавливался пенопласт Rohacell-110А на клею ВК-9 (рис. 11). На рис. 12 показан момент установки пенопласта при ремонте трубчатого заполнителя. В пенопласте были выполнены каналы для обеспечения перетекания воздуха и конденсата, при этом все поверхности пенопласта покрывались клеем, во избежание впитывания влаги пенопластом во время эксплуатации. Далее в зоне установки пенопласта устанавливалась



Рис. 12. Установка пенопласта при ремонте трубчатого заполнителя

ливалась прокладка из УТ-900-3А заподлицо к ТК. Далее устанавливалась ремонтная накладка из УТ-900-3А и молниезащитное полотно.

Для каждого вида ремонта проводился поэтапный неразрушающий контроль в процессе ремонта, и окончательный после завершения ремонта. Результаты контроля показали отсутствие непрочных и других дефектов, что подтверждает качество и надежность выполненных ремонтов. Таким образом, продемонстрирована эффективность проведенных ремонтов с помощью выбранного оборудования и принятых конструктивно-технологических решений.

На основании проведенных работ можно сделать следующие выводы:

Разработаны конструктивно-технологические решения и технология выполнения ремонтов трехслойных конструкций из КМ с трубчатым заполнителем.

Подобрано оборудование, инструментарий и материалы для выполнения ремонтов в условиях эксплуатирующих организаций.

Выполнена оценка прочности ремонта на клею ВК-9 в сравнении с приформовкой в автоклаве.

По разработанной технологии выполнены ремонты агрегатов опытного транспортного самолета.

Литература

- [1] ТОиР для Boeing 787 и Airbus A350: вопросы без ответов. Aviation Week.
- [2] ICAS proceedings. 17th congress of the international council of the aeronautical sciences. 1990.

*Kiva D. S., Dveirin A. Z., Vasylevskiy E. T., Petropolskiy V. S., Gorobets P. I., Gavriluk S. Y.,
Haidukova S. M., Velychko V. V.*

ANTONOV, State-owned Enterprise. Ukraine, Kiev

REPAIRING METHODS OF AIRFRAME COMPOSITE SANDWICH STRUCTURES WITH TUBULAR CORES

Developing methods of supporting flight availability and repairing sandwich tube composite structures were discussed. Request of durability, reliability and processability during operation activity in operator's air-base conditions were taken into account. A few structural and technological decisions of making repair were worked out. Experimental verification of structural and technological decisions including environment influence were executed. equipment package for tube composite structures repairing was made up.

Keywords: composite materials, sandwich structures with tubular cores, repairing, structural and technological decisions, equipment package for repairing.

References

- [1] Boeing 787 and Airbus A350 maintenance: questions without answers. Aviation Week.
- [2] ICAS proceedings. 17th congress of the international council of the aeronautical sciences. 1990.