

# КОНТРОЛЬ КЛЕЕНЫХ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ САМОЛЕТОВ ГА С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Н.Т.Азаров, Ю.А. Миколайчук, В.Н. Цирг

Самолеты Ту-204 и Ил-96 стали первыми гражданскими воздушными судами (ВС), эксплуатируемым на регулярных пассажирских линиях с 1995г., в конструкциях которых нашли широкое (около 30% по площади фюзеляжа и крыла) применение сотовые конструкции из полимерных композитных материалов (ПКМ). На этапе разработки конструкторской документации и в дальнейшем при стендовых и эксплуатационных испытаниях АНТК им. А.Н. Туполева ( в настоящее время - ОАО "Туполев") совместно с другими организациями (ГосНИИ ГА, ВИАМ, НИАТ и др.) активно проводило работы по обеспечению конструкций из ПКМ самолета ТУ-204 эффективными методами и средствами обнаружения непрочности и отслоений в этих конструкциях на стадиях производства и дальнейшей эксплуатации.

В первую очередь был проанализирован опыт применения отечественных импедансных дефектоскопов (ИАД-3, АД-40И, АД-42И), применяемых для обнаружения дефектов типа "непрочности" в металлических сотовых конструкциях самолетов ИЛ-86, ЯК-42. Стало очевидным, что в связи с наличием в конструкциях из ПКМ самолета ТУ-204 обшивок с широким диапазоном толщин, а также отличием чертежных значений толщин от реальных, возникнут определенные трудности при использовании импедансного контроля. Импедансный метод контроля основан на предварительной настройке дефектоскопа по контрольным образцам той же конструкции, что и контролируемые зоны из ПКМ. Однако наличие большого набора толщин материалов привело бы к необходимости использования большого количества стандартных образцов и, что самое главное, при наличии отклонений реальных толщин обшивок от чертежных, могло бы привести к ошибкам при оценке качества ПКМ (возможна как перебраковка, так и недобраковка - пропуск дефектов).

Вследствие этого ОАО "Туполев" был разработан и впервые в практике контроля авиационных конструкций из ПКМ, применен принцип "безэталонной" настройки импедансных дефектоскопов. Для реализации метода были рекомендованы малогабаритный импедансный дефектоскоп ИД-91М, который в 1991г., а затем ДАМИ -С в 2002 г., прошли межведомственные испытания и были включены в ведомственный реестр средств контроля.

В разделе 2 статьи рассмотрен опыт применения прибора ИД-91М, а также приведены примеры применения импедансного дефектоскопа нового поколения "ДАМИ-С", имеющего более широкие возможности по дефектоскопии конструкций из ПКМ и документированию результатов контроля.

Дефектоскоп ДАМИ-С является современным цифровым акустическим прибором и обеспечивает новые возможности импедансного контроля:

- автоматическую настройку на объект контроля, что упрощает процесс подготовки прибора к работе.
- построение проекций дефекта на поверхности контроля в виде пороговых и полных С-scan изображений;
- определение площади дефектов с помощью полученных С-изображений;
- слежение за траекторией движения преобразователя в процессе контроля;
- одновременный контроль с тремя настройками (для 3-х клеевых слоев контролируемого изделия), что повышает производительность контроля;
- накопление и сохранение результатов контроля с целью последующей их перезаписи в компьютерный банк данных и представления в виде цифрового и бумажного документа.

В приборе реализован **импедансный амплитудно-фазовый метод** звукового и ультразвукового контроля в частотном диапазоне 1...40kHz с применением сухого точечного контакта при одностороннем доступе.

ДАМИ-С применяется для звукового и ультразвукового контроля клеевых и паяных соединений между элементами многослойных конструкций. ДАМИ-С обеспечивает обнаружение зоны нарушения соединений между обшивками и внутренними элементами для следующих конструкций;

- сотовых конструкций с неметаллическими обшивками и сотами из полиамидной бумаги или других материалов;
- сотовых конструкций с металлическими обшивками (в том числе перфорированными) и сотами из алюминиевых или других сплавов;
- конструкций с различными заполнителями, в том числе типа ТЗП;
- объектов с грубой сотовой структурой, когда трудно выявить разницу между дефектными и бездефектными участками объекта;

Проведенное в процессе ведомственных испытаний сравнение чувствительности дефектоскопа ДАМИ-С с аналогичными характеристиками акустического дефектоскопа ИД-91М, который уже несколько лет используется в ГА, показали высокие технические характеристики ДАМИ-С (см. Таблицы 1 и 2):

Таблица 1

Выявляемость дефектов приборами ДАМИ-С и ИД-91М

| № обр.                 | Размеры образцов                    |                             | Материал   | Площадь дефекта «кв.мм», (размер «мм»)    | Выявляемость дефектов |        | Тип дефекта                            |
|------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|--|---|-----------------------|--------|--|
|                        | Общая толщина «Н»мм                 | Расстояние до дефекта «h»мм |  |   | ДАМИ                  | ИД-91М |  |
| Монолитные конструкции |                                     |                             |  |   |                       |        |  |
| 1                      | 1,9<br>1,9                          | 1,0<br>0,2                  | СВМ  | 400 (20x20)                               | +                     | +      | расслоение<br>расслоение               |
| 2                      | 3,75<br>3,75                        | 2,3<br>0,5                  | СВМ+ЭЛУР   | 625 (25x25)                               | +                     | +      | расслоение<br>расслоение               |
| 3                      | 4,5                                 | 2,8                         | СВМ  | 625 (25x25)                               | +                     | +      | расслоение                             |
| 4                      | 7,5                                 | 3,3<br>2,5<br>0,5           | СВМ+ЭЛУР   | 530 (23x23)<br>530 (23x23)<br>290 (17x17) | +                     | +      | расслоение<br>расслоение<br>расслоение |
| 5                      | 9,8 =<br>=2+7,8<br>«лист -<br>лист» | 2,0                         | Алюмини-<br>евый<br>сплав Д16                      | 100 (10x10)                               | +                     | +      | непроклей                              |
| 6                      | 4,5 =<br>1,5+3<br>«лист-<br>лист»   | 1,5                         | Алюминие-<br>вый сплав                             | 225 (15x15)                               | +                     | +      | непроклей                              |
| Сотовые конструкции    |                                     |                             |  |   |                       |        |  |
| 7                      | 42,3 вы-<br>сота сот                | 2,0<br>обшивка              | Обшивка -<br>СВМ, соты –<br>ССП, ячей-<br>ка 2,5мм | 177<br>(диаметр<br>15 мм)                 | +                     | +      | Отслоение<br>обшивки<br>от сот         |

В результате испытаний установлено, что дефектоскопом ДАМИ-С надежно выявляются все дефекты в клееных сотовых конструкциях, как из металлов, так и из КМ.

В приборе используются, как стандартные преобразователи акустических импедансных дефектоскопов типа ПАДИ, так и новые малогабаритные, разработанные специально для данного прибора (см. Таблицу 2).

Таблица 2

Результаты испытаний дефектоскопа ДАМИ-С с комплектом его преобразователей на образце из КМ толщиной 10,8мм на предмет выявления дефектов с различной глубиной залегания.

| № обр. | Глубина залегания дефекта "мм" | Типы преобразователей |         |               |               |          |        |              |
|--------|--------------------------------|-----------------------|---------|---------------|---------------|----------|--------|--------------|
|        |                                | ПАДИ-7С №1006         | ПАДИ-6А | ПАДИ-6А №2001 | ПАДИ-6М №2001 | ИПРС-6ЛС | ДИФ-2С | ДИФ-3С №2991 |
| 8      | 2,8                            | +                     | +       | +             | +             | +        | +      | +            |
|        | 3,2                            | +                     | +       | +             | +             | +        | +      | +            |
|        | 5,4                            | ***                   | +       | +             | ***           | +        | ***    | ***          |
|        | 7,4                            | ***                   | +       | +             | ***           | +        | ***    | ***          |

\*\*\* - диапазон не предусмотрен техническими данными преобразователя.

В приборе используется ультразвуковой метод определения положения преобразователя на поверхности объекта контроля. Благодаря наличию информации о текущем положении преобразователя, появляются совершенно новые возможности обработки данных и представления полученных результатов. Так в процессе построения изображения на экране ДАМИ-С помимо изображения дефектов, отмечается также и траектория движения преобразователя. Такое изображение повышает объективность оценки качества проведенного контроля. Размеры, площадь и конфигурация проекции дефекта соответствуют реальным параметрам дефекта и могут быть измерены. Изображение может быть сохранено в памяти прибора и передано в компьютер для дальнейшей обработки, хранения и документирования с помощью специального программного обеспечения. Таким образом, дефектоскоп ДАМИ-С предоставляет более широкие возможности по дефектоскопии конструкций из ПКМ и документированию результатов контроля (см. Таблицу 3).

Таблица 3

Сравнительный анализ технических возможностей дефектоскопов ИД-91М и ДАМИ-С

| Технические возможности                            | ИД-91М | ДАМИ-С |
|--|--------|--------|
| ‘Безэталонная настройка’ на объект контроля        | +      | +      |
| Автоматическая настройка на объект контроля        | -      | +      |
| Сигнализация дефекта                               | +      | +      |
| Построение ‘С-scan’ изображений дефекта            | -      | +      |
| Слежение за траекторией движения преобразователя   | -      | +      |
| Архив настроек                                     | -      | +      |
| Архив результатов контроля                         | -      | +      |
| Связь с РС и документирование результатов контроля | -      | +      |



Рис. 1. Процесс контроля с помощью дефектоскопа ДАМИ-С

Наличие отслоений в сотовых конструкциях связано, прежде всего, с попаданием воды внутрь сотового агрегата. Попавшая внутрь сотовых агрегатов вода снижает прочность клеевых соединений, вызывает разрушение клеевого слоя и сотового наполнителя, приводит к увеличению массы и изменению центровки агрегатов, отслоению обшивок от сот, а при замерзании воды - к отрыву обшивки от сотового наполнителя, или разрушению агрегата в полете.

НЦПЛГВС ГосНИИ ГА и "ОАО Туполев" накоплен определенный опыт применения методов и средств неразрушающего контроля конструкций из ПКМ на самолете Ту-204 и представляется полезным рассмотреть его в рамках данной статьи.

### **Акустический импедансный контроль отслоений в сотовых агрегатах самолета Ту-204**

Сотовые конструкции самолета Ту-204 выполнены из ПКМ двух типов:

1. «Органит» (обшивка) и ПСП (бумажные соты) – неэлектропроводящие материалы. Из указанных материалов выполнены сотовые клинья рулей высоты, руля направления и панели «зализов» крыла-фюзеляжа в районе отсеков для основных стоек шасси самолета.

2. ПКМ типа углепластика – электропроводящего материала. Из ПКМ выполнены закрылки, элероны, тормозные щитки и интерцепторы самолета.

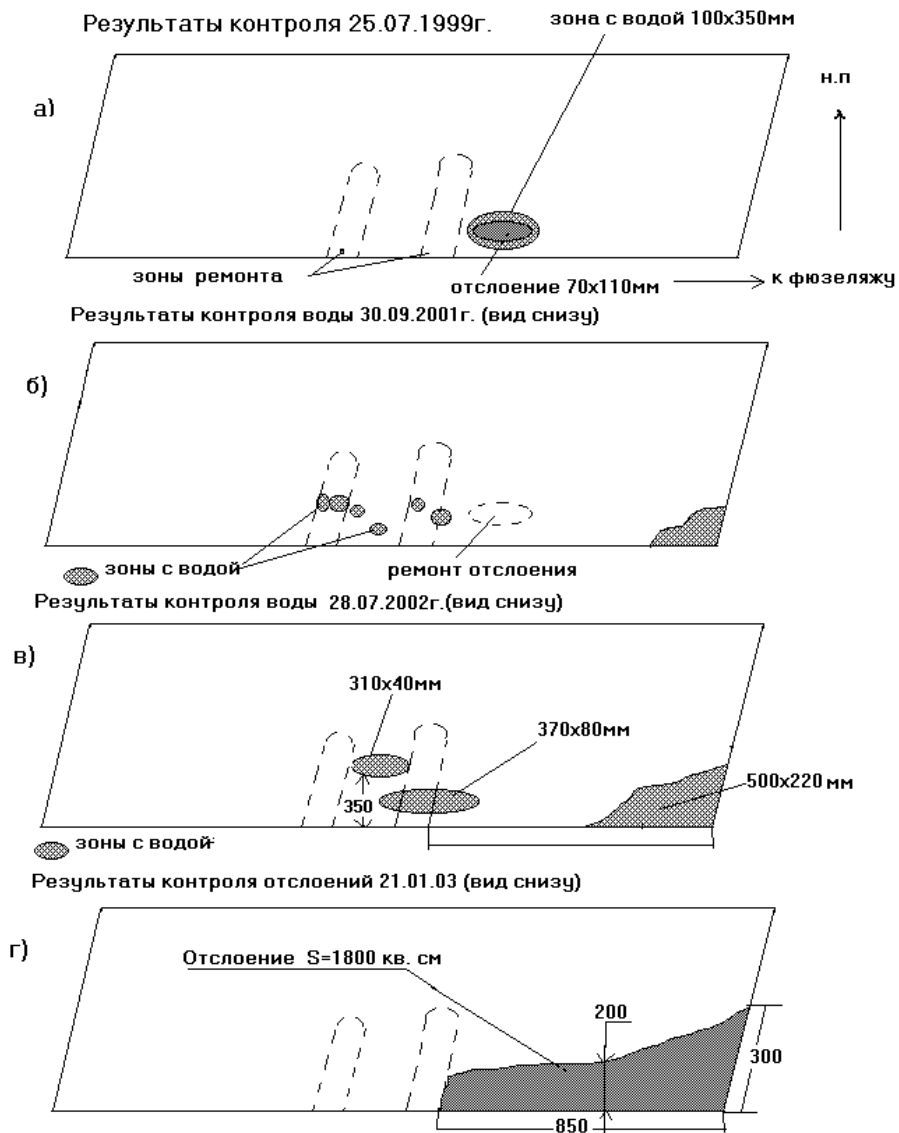
Механизм воздействия влаги на прочностные свойства КМ можно проследить по результатам последовательных проверок сотового клина элерона самолета Ту-204 .

Элерон правый (нижняя поверхность), Рис.2 а, б, в, г. На рисунках показаны последовательно результаты ранее выполненных проверок ультразвуковым методом на наличие воды и акустическим импедансным методом - на отслоения, 25.07.1999г., 30.09.2001г., 28.07.2002г. и 21.01.2003г. Примечательно, что в процессе апробации системы тепловизионного контроля с применением тепловизора "Thermovision 570" фирмы Flir Systems (США) 07.10.2002г., все зоны с водой, обнаруженные ранее при ультразвуковом контроле, были подтверждены. Однако, на тот момент отслоения обшивки, обнаруженного позднее 21.01.03г., зафиксировано не было. Вследствие этого актуальной является задача определения степени влияния воды на конструкцию из ПКМ и учета скорости развития расслоений под ее воздействием.

Физически процесс проникновения влаги в ПКМ заключается в следующем. Нити композиционных материалов состоят из пучков отдельных скрученных волокон ткани ("органит"). Марки связующего, используемого при изготовлении "органита" хорошо проникают в межниточное пространство сухой ткани, особенно СВМ, из которой сделан "органит" ("кевлар"), но почти не достигает отдельных волокон внутри нитей. Между тем, влага свободно проходит по волокнам внутри нитей и разрушает ПКМ изнутри (происходит набухание волокон, нарушаются адгезионные связи между волокнами и нитями или отдельными слоями ПКМ, что приводит в конечном итоге к его разрушению.

Как видно из рисунков (Рис.2а-г), на элероне вначале появилась зона с водой (30.09.2001г.), которая в конечном итоге привела к появлению отслоения площадью ~ 1800 кв. см.

**САМОЛЕТ ТУ-204**  
**Элерон правый**  
**Контроль отслоений и воды в сотовых конструкциях**  
**(вид снизу)**



*Рис. 2*

На фотографии Рис.3 показано увеличенное изображение боковой поверхности элерона с трещиной в месте отслоения.



*Рис. 3*

Как видно из статьи, на элероне вначале появилась зона с водой, которая в конечном итоге привела к появлению отслоения площадью ~ 1800 кв. см.

Руководством по технической эксплуатации самолета Ту-204 предусмотрен периодический акустический импедансный контроль сотовых конструкций самолета на наличие отслоений обшивки от сот. Контроль осуществляется упоминавшимися выше малогабаритными акустическими импедансными дефектоскопами ИД-91М и ДАМИ-С с использованием т.н. "безэталонной" настройки. Необходимость введения "безэталонной" настройки обусловлена применением на самолете предусмотренной конструкцией переменной толщины обшивки на большинстве сотовых агрегатов. Поскольку принцип действия импедансного дефектоскопа основан на регистрации изменения механического импеданса обшивки в месте наличия дефекта - отслоения, расслоения или непрочности, то изменение толщины обшивки также приводит к такому же изменению механического импеданса, что и дефект. Поэтому при контроле таких обшивок оператор вынужден перестраивать режим работы дефектоскопа при контроле участков с различной толщиной обшивки. Применение при этом специальных контрольных образцов сотовых конструкций для настройки дефектоскопа практически исключено, поскольку их общее количество может достигать несколько сот штук.

Метод "безэталонной" настройки позволяет отказаться от контрольных образцов. Сущность метода "безэталонной" настройки заключается в следующем. Оператор выбирает на поверхности агрегата участок, не имеющий явно выраженных дефектов (вспучивания, вмятины, забоины и др.) и размечает на нем 3 точки на расстоянии 100-150мм друг от друга, не лежащие на одной прямой (Рис. 4).

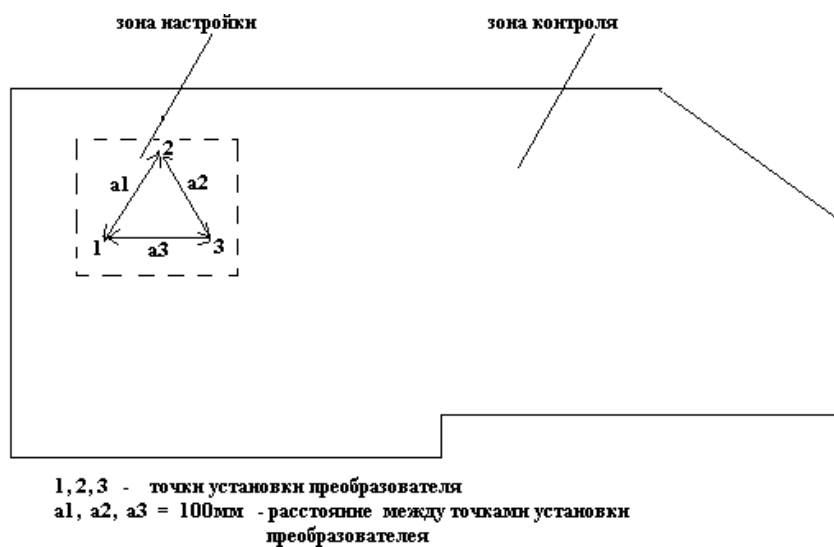


Рис. 4. Схема «безэталонной» настройки импедансных дефектоскопов

Затем оператор последовательно устанавливает преобразователь дефектоскопа в выбранные точки и следит за показаниями его стрелочного индикатора (СИД). Если показания СИД прибора хотя бы в одной из точек настройки отличаются более, чем на  $20\mu\text{кА}$ , выбирается другая зона настройки.

При отсутствии необходимой информации о расположении и размерах зон переменной толщины обшивки контролируемого объекта можно произвести разбивку контролируемой поверхности на отдельные зоны по максимальным и минимальным толщинам, материалу, размерам ячейки сотового заполнителя и т.д., следующим образом:

- производится настройка дефектоскопа с преобразователем РСП в центре контролируемой поверхности;

- перемещая преобразователь из центра зоны настройки к краям контролируемой поверхности, следят за показаниями СИД. Если в каком-то из направлений показания СИД изменяются более, чем на  $20\mu\text{кА}$  (в большую или меньшую сторону), отмечают точку изменения показаний и производят сканирование по всей ширине контролируемой зоны в направлении, параллельном данному с шагом  $\geq 20\text{мм}$ ;

- отмечают точки изменения показаний СИД;

- если линия изменения показаний СИД имеет четкие геометрические очертания (прямая линия, плавный изгиб), можно утверждать, что за ней находится зона, основные характеристики которой (толщина обшивки, размер ячейки сотового блока, высота пакета и т.д.) или одна из них, отличаются от исходной.

Для выявления дефектов типа «расслоение» с относительно малой глубиной залегания (0.15÷1.0 мм) в монолитных конструкциях и обшивках толщиной более 2.5 мм из ПКМ при работе с преобразователем РСП необходимо установить нижний порог срабатывания автоматического сигнализатора дефектов (АСД) в диапазоне 0÷50µкА.

Ввиду высокой неоднородности клеёных конструкций из КМ, наличия складок, натеков связующего и ЛКП или повышенной шероховатости поверхности разброс показаний СИД при настройке и проведении контроля может достигать до 30µкА.

Возможность учитывать все мешающие при импедансном контроле факторы, выбирать оптимальные режимы настройки, заложена в дефектоскопе "ДАМИ-С". В качестве примера на Рис.5 приведены результаты контроля сотовой конструкции самолета Ту-204. В июле 2002г. ДАМИ-С прошел ведомственные испытания, внесен в ведомственный реестр (Министерство транспорта РФ, ГСГА, регистрационное удостоверение № 105-06-2002) и рекомендован для контроля композитных агрегатов самолетов ИЛ-86, ИЛ-76, ИЛ-96-300, ТУ-204, ТУ-214, Як-42, АН-124 "Руслан". [1].

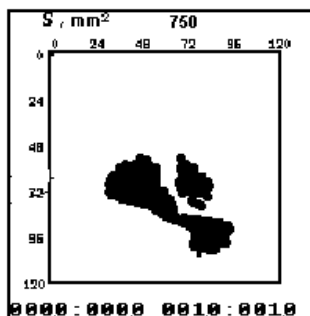


Рис.5 Изображение дефектов (отслоений) на экране дефектоскопа ДАМИ-С.

Службами НМК АК "Сибирь" и ФГУАП "Кавминводьявиа" совместно с ОАО «Туполев» и НЦ ПЛГВС ГосНИИ ГА проведен импедансный контроль сотовых конструкций находящихся в эксплуатации 2-х самолетов Ту-204. Отмечено появление крупных (площадь более 2000 кв. см) отслоений на элементах системы управления самолетом - воздушных тормозах, элеронах и др. Так на Рис.6 приведен эскиз сотового агрегата - правого воздушного тормоза самолета, верхняя обшивка левой половины агрегата отслоилась почти полностью. О появлении отслоения обшивки на элероне другого самолета Ту-204 площадью ~ 1800 кв. см уже говорилось выше.

### САМОЛЕТ ТУ-204 Правый воздушный тормоз сверху

Дата: 19.10.02

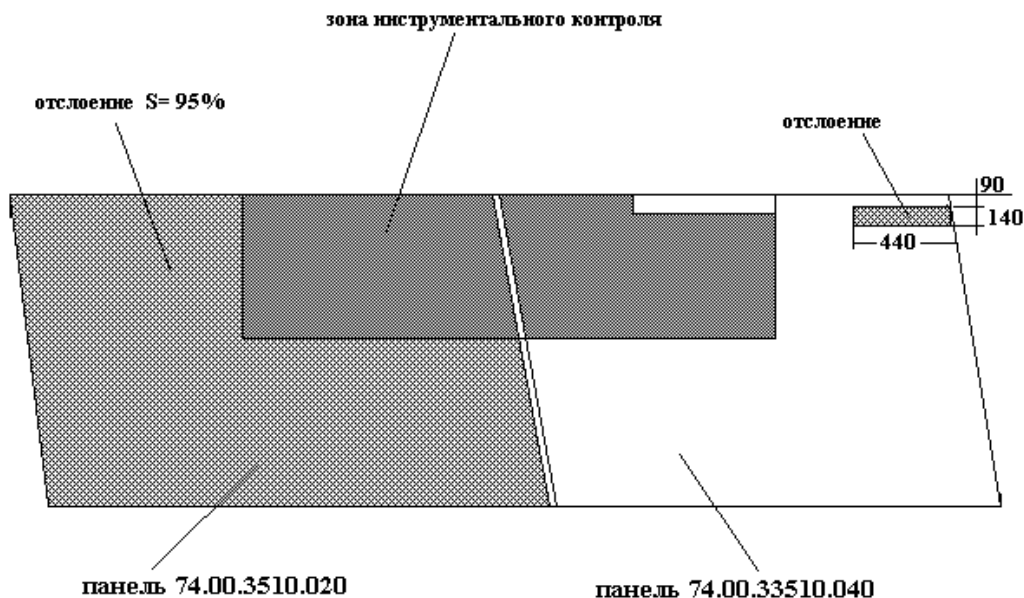


Рис. 6

Конструктивные особенности сотового клина руля направления (РН) самолета Ту-204 №64011 и плохое качество склейки привели к отслоению (потере в полете) части его обшивки (Рис. 7).

### САМОЛЕТ ТУ-204 Руль направления правая сторона

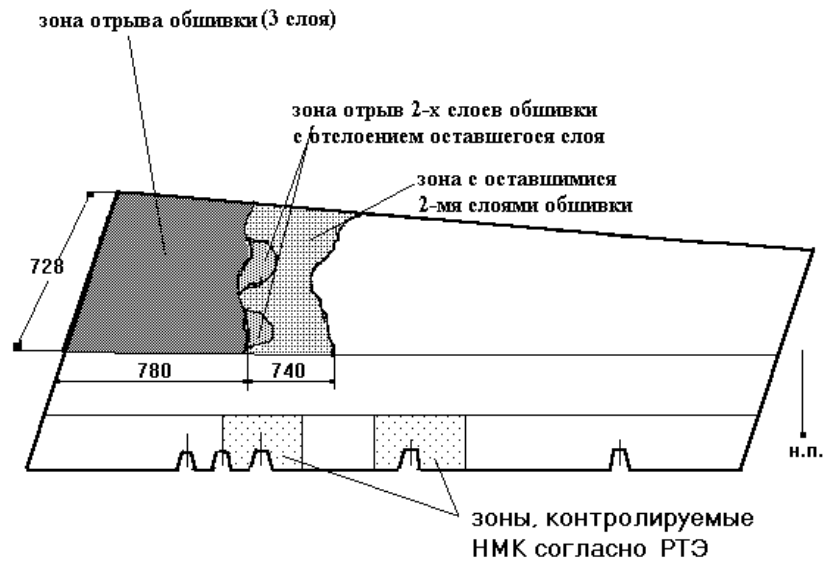


Рис. 7

### САМОЛЕТ ТУ-204 Руль направления Сотовый клин

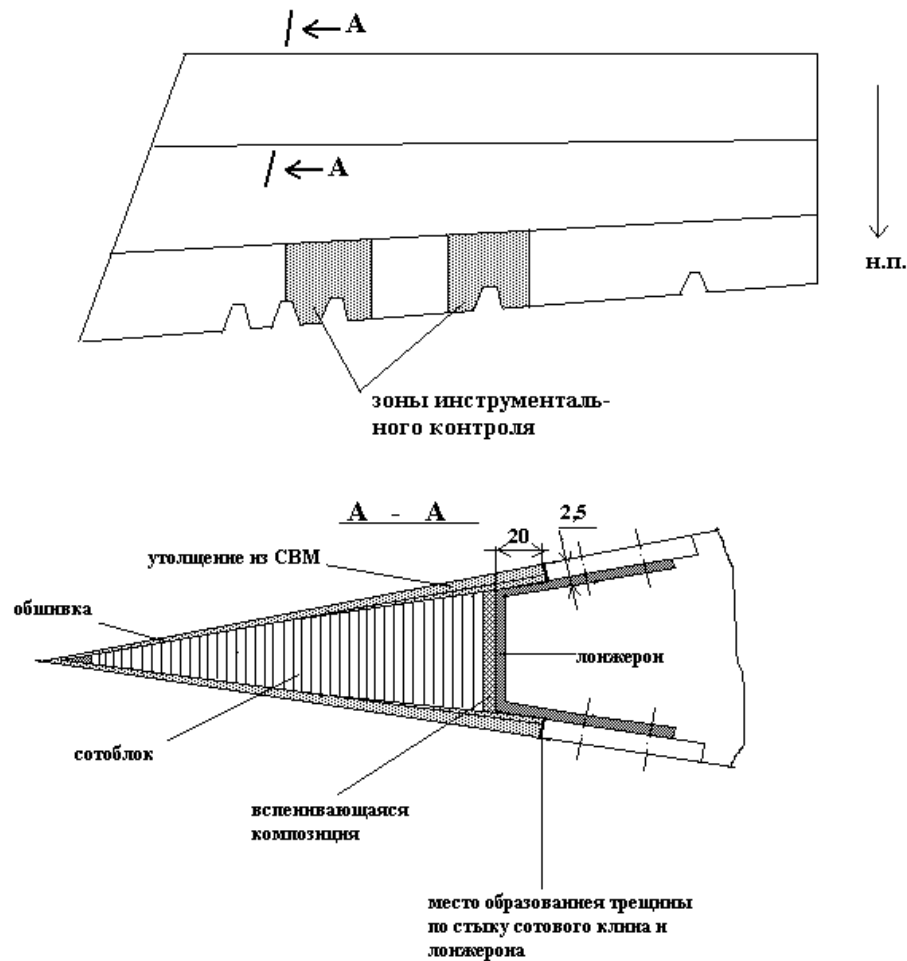


Рис. 8

Сотовый клин крепится (приклеивается) к лонжерону через слой вспенивающейся композиции (Рис. 8), а также за счет нахлестки стеклопластиковой обшивки на боковую поверхность лонжерона в виде полосок (справа и слева) шириной около 15-20мм. Осмотр разрушившегося клеевого соединения показал, что отслоение обшивки началось именно с этой полоски. Предположительно в отслоившуюся зону стала попадать вода, которая и привела к отслоению обшивки. Причиной разрушения могли стать как непрочность, так и слабая адгезионная прочность клеевого соединения. Обнаружить такой дефект в эксплуатации импедансным методом не представляется возможным, т.к. клеевые соединения типа "лист-лист" этим методом контролируются ненадежно.

Поэтому было рекомендовано эксплуатирующим организациям периодически осматривать стык сотового клина с лонжероном РН на наличие сплошной трещины в ЛКП, что будет свидетельствовать о начале разрушения клеевого соединения.

### **Выводы**

1. Разработан совместно с ОАО «Туполев» и внедрен на сотовых агрегатах самолета Ту-204 акустический импедансный метод т.н. "безэталоной" настройки дефектоскопа при контроле отслоений, позволяющий отказаться от большого количества контрольных образцов.

Службами НМК АК "Сибирь" и ФГУАП "Кавминводьявиа" совместно с ОАО «Туполев» и НЦ ПЛГВС ГосНИИ ГА проведен импедансный контроль сотовых конструкций находящихся в эксплуатации самолетов Ту-204. Отмечено появление крупных (площадь более 2000 кв. см) отслоений на элементах управления самолета - воздушных тормозах, элеронах и др.

3. Положительный опыт применения дефектоскопов ИД-91М и ДАМИ-С по контролю композитных агрегатов самолета ТУ-204 дает основание для внедрения этих приборов на парке самолетов ИЛ-76, ИЛ-86, ИЛ-96-30, ЯК-42 и АН-124 "Руслан", с целью решения аналогичных задач по неразрушающему контролю.

4. Дефектоскоп ДАМИ-С обеспечивает более широкие технические возможности по дефектоскопии и позволяет решать задачи по документированию результатов контроля в рамках внедряемой в настоящее время в отрасли системы документирования технического состояния гражданских ВС.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Методические рекомендации по акустическому импедансному контролю авиационных конструкций из металлических и полимерных композиционных материалов (ПКМ), утвержденные НЦ ПЛГВС ГосНИИ ГА и ОАО "Туполев", и согласованные с ОАО А им. С.В. Ильюшина, ОАО "ОКБ им. А.С. Яковлева", и АНТК "Антонов", 2003г.