

## ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ВОДЫ В АВИАЦИОННЫХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Описаны методика и аппаратура пассивного теплового контроля воды в сотовых конструкциях, выполненных из стеклопластика и углепластика. Приведены результаты моделирования и экспериментальных исследований.

### Введение

В российских и зарубежных самолетах нового поколения (А-310, ТУ-204, ИЛ-96) широко применяют новые конструкционные материалы, отличающиеся высокой прочностью при малом удельном весе. Практика эксплуатации этой техники показывает, что новые материалы, используемые для изготовления деталей и узлов имеют, иные эксплуатационные свойства, чем традиционные (сталь, алюминий и др.). Эти материалы представляют собой композиты, состоящие как из легких металлов, так и из прочных и легких пластических масс. В частности, довольно распространенным материалом являются сотовые структуры, при изготовлении которых применяют алюминий, углепластик, стеклопластик, бумагу.

В процессе изготовления и эксплуатации в таких изделиях возникают дефекты, ранее неизвестные для изделий из традиционных материалов. Основными дефектами сотовых конструкций являются:

- - отслоение сот от обшивки вследствие непрочности и смятия стенок ячеек (данный вид дефекта возникает как в силу технологических причин, так и в ходе эксплуатации самолетов);
- - наличие воды в одной или нескольких ячейках (возникает в ходе эксплуатации самолета в результате попадания воды извне через технологические неплотности панелей крыльев, фюзеляжа, киля и других частей самолетов).

Наличие воды в сотовых конструкциях

- - приводит к избыточному весу, и, как следствие, к неоправданному расходу топлива;
- - уменьшает надежность узлов, (так как вода в сотах появляется вследствие отслоения и разгерметизации);
- - при низких температурах, которые имеют место на высотах выше 800 - 1000 м, вода в сотах превращается в лед, который разрушает соты.

На сегодня штатными методами неразрушающего контроля (НРК) воды в сотах являются радиационный и ультразвуковой (УЗВ).

Радиационный НРК весьма эффективен при двустороннем доступе вследствие высокого контраста воды на фоне тонких алюминиевых листов. Однако данный метод практически неприменим в тех случаях, когда невозможно обеспечить двусторонний доступ к самолетной панели (односторонний радиационный контроль остается весьма дорогим и поэтому экзотическим методом НРК). Далее, сплошной радиационный контроль сотен и тысяч квадратных метров поверхности фюзеляжа требует большого количества дорогостоящей рентгеновской пленки, в то время как рентгенотелевизионный метод слабо используется на практике. Кроме того, специфические требования к технике безопасности делают радиационный контроль практически неприемлемым на гражданских авиалиниях, где одновременно в условиях ангара производят сразу несколько разнородных операций диагностики и ремонта. Наконец, радиационный контроль не обеспечивает количественную оценку влагосодержания.

Ультразвуковой НРК также является достаточно чувствительным к наличию воды, прилегающей к обшивке (испытания проводят на нижней поверхности авиационных панелей), позволяя оценить толщину водяного столбика по времени запаздывания УЗВ сигнала. Основным недостатком УЗВ метода, по крайней мере, на примере российских авиакомпаний, помимо его контактного характера, является низкая производительность испытаний, которые проводят в отдельных точках, рискуя пропустить отдельные соты, заполненные водой. Следует отметить, что ряд зарубежных компаний разработал УЗВ способ контроля самолетов с использованием бесконтактного лазерного возбуждения и считывания ультразвукового сигнала, но чрезвычайно высокая стоимость соответствующих систем (до 1 млн. долларов США) делает их применение в России нереалистичным.

Альтернативой вышеуказанным методам может служить метод теплового вида, который позволяет достаточно оперативно указать на наличие воды в сотовых конструкциях применительно к авиационно-космической технике.

Тепловые методы неразрушающего контроля следует рассматривать в качестве перспективных при контроле авиационных конструкций вследствие необходимости обследования стареющего парка военных и гражданских самолетов на наличие внутренней коррозии и воды в сотах и появления нового поколения инфракрасных (ИК) тепловизоров, которые характеризуются малыми габаритами, большим форматом термограмм и отсутствием охлаждения.

### Исходные положения

При создании системы ТК и испытаниях образцов сотовых изделий был использован опыт авторов по разработке специализированных алгоритмов обработки термограмм и применению ИК тепловизоров в технической диагностике и НРК [1-6]. При этом мы исходили из следующего.

Общий принцип активного ТК состоит в том, что в процессе нагрева/охлаждения бездефектные и дефектные участки объекта контроля характеризуются различной поверхностной температурой вследствие различий в теплофизических характеристиках. Температурный перепад между дефектной и бездефектной зонами, определенный как  $\Delta T(\tau) = T_d(\tau) - T_{nd}(\tau)$ , является динамической характеристикой, достигая максимального значения  $\Delta T_m(\tau_m)$  в момент времени  $\tau_m(\Delta T_m)$ , который может наступать как в процессе нагрева, так и на стадии охлаждения. Удобной безразмерной характеристикой выявляемости дефектов в материалах является текущий контраст температуры  $C = \Delta T / T_{nd}$ .

Из теории ТК следует, что вода, в силу своей высокой теплоемкости, представляет собой весьма «контрастный» тип дефекта по отношению к большинству конструкционных материалов. При этом оптимальное время контроля должно существенно зависеть от материала обшивки сот: в случае алюминия, это время не должно превышать единиц секунд, а в случае неметаллов – достигать десятков секунд.

Имеется большое количество публикаций по обнаружению и определению массы воды в пористых неметаллах, прежде всего, в строительных конструкциях и теплозащите космических челноков. В этих случаях зоны увлажнения имеют пониженную температуру вследствие естественного испарения.

Преимуществами ТК являются: 1) дистанционность испытаний; 2) односторонний доступ; 3) наглядное представление результатов и возможность цифровой обработки и документирования. При этом необходимо, как и в случае УЗВ контроля, производить нагрев изделия и регистрацию температуры на его поверхности снизу, т.е. там, где вода

контактирует с обшивкой (в случае 100%-го заполнения сот возможен ТК в любом положении).

### Объекты контроля

Исследовали два образца сотовых панелей: 1) алюминиевые соты со стеклопластиковой обшивкой (высота сот 8 мм, толщина обшивки 0.6 мм); 2) бумажные соты с углепластиковой обшивкой (высота сот 10 мм, толщина обшивки 0.8 мм). Конфигурация ячеек - шестигранная, размером около 8 мм. Внешний вид образцов сотовых изделий показан на рис. 1 а, б.

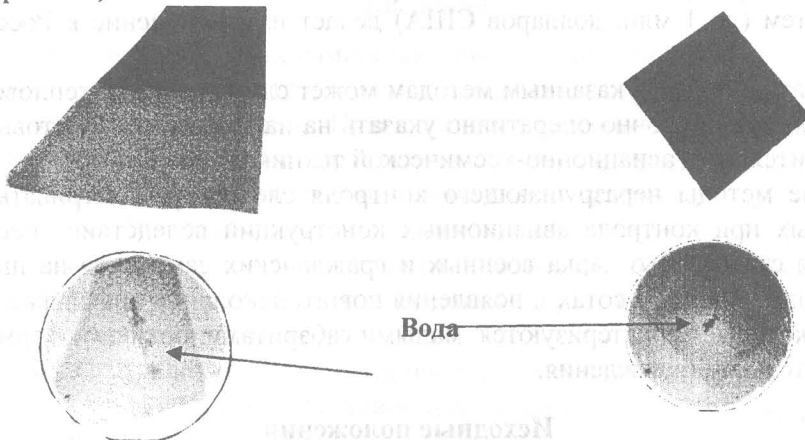


Рис. 1, а. Стеклопластиковые соты и их рентгенограмма

Рис. 1, б. Углепластиковые соты и их рентгенограмма

Стеклопластиковые соты, помимо натуральной поверхности, содержали зоны, покрытые черной эмалью НЦ-132, что было сделано для сравнения результатов ТК для различных уровней поглощенной энергии. Зачерненные области хорошо видны на фотографиях образцов (рис. 1а, б). Углепластиковые соты не чернились вследствие высоких излучательно-поглощательных свойств углепластика.

Воду в отдельные ячейки вносили стандартным способом: с помощью шприца через отверстия на задней поверхности образцов. В среднем в образцы вносили от 2 до 8 г воды, что составляло 5-12 полностью заполненных ячеек.

Контрольные испытания были проведены в Томском НИИ интроскопии двусторонним рентгенотелевизионным методом. Энергия просвечивания составила 90 кЭв для сот с неметаллической обшивкой.

### Экспериментальные исследования

Для выведения объектов контроля из состояния термодинамического равновесия применили их охлаждение в морозильной камере холодильника в течение суток до температуры  $-20^{\circ}\text{C}$ .

Для данных сот мы ограничимся визуальной иллюстрацией результатов, приведенных на рис. 2 а, б. Установлено, что при любом виде нагрева/охлаждения вода надежно выявляется, а в случае стеклопластиковых сот хорошо видна ячеистая структура, вследствие чего легко обнаруживаются отслоения обшивки от сот.

В качестве экспериментального параметра оптимизации процедуры ТК было выбрано отношение сигнал/шум  $s = \Delta T / \sigma_n$ , где  $\sigma_n$  - стандартное отклонение температурных шумов, определенное в бездефектных зонах.

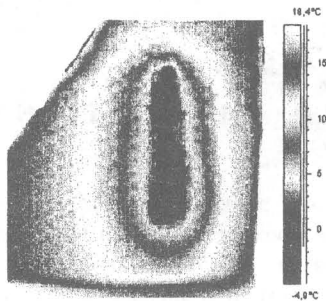


Рис. 2,а. Термограмма через 125 с после извлечения из холодильника с температурой  $-20^{\circ}\text{C}$ , среднее значение  $S=19.7$  по всей бездефектной зоне. Оптимальные результаты ТК стеклопластиковых сот (масса воды около 4 г)

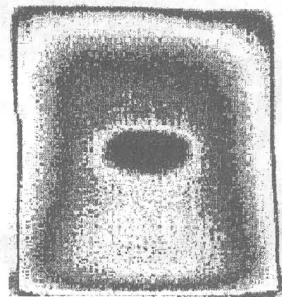


Рис. 2,б. Термограмма через 100 с после извлечения из холодильника с температурой  $-20^{\circ}\text{C}$ , среднее значение  $S=20.8$ . Оптимальные результаты ТК углепластиковых сот (масса воды около 4 г)

Средние во времени значения шумового контраста на поверхности сотовых изделий составили:  $C_n = 7.1\%$ -для стеклопластиковых сот и  $2.8\%$ -для углепластиковых сот при  $\sigma_n > 2$ . Оценка предельной чувствительности теплового метода была сделана моделированием процесса контроля программой ThermoCalc-2D (создание калибровочной кривой) и статистической обработкой реальных термограмм программой Thermostat.

Если использовать тот факт, что коридоры полета авиации находятся на больших высотах, где температура среды ниже  $-20^{\circ}\text{C}$ , то после приземления в течение какого-то времени возможно обнаружение воды в полостях сотовых конструкций путем измерения температуры на наружной поверхности конструкции.

Для подтверждения лабораторных испытаний были проведены полевые обследования самолета ТУ-204 через 2 часа после приземления.

Испытания проведены с 10-00 до 13-00 после посадки самолета в 8-20. Использован тепловизор Thermovision 570 фирмы FLIR Systems США. Применены две процедуры теплового контроля: пассивная и активная.

Пассивная процедура состояла в 100%-ном осмотре частей самолета, выполненных из композиционных сотовых конструкций, в результате чего определены участки, содержащие воду.

Результаты применения активного контроля в данной статье не рассмотрены.

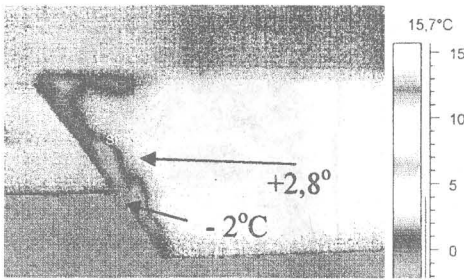
Некоторые результаты обследования приведены на рис. 3 и 4. На рис. 3 также приведен результат ультразвукового контроля, выполненный специалистами авиакомпании ранее для этого же элемента крыла. Наблюдается хорошее совпадение результатов контроля.

### Выводы

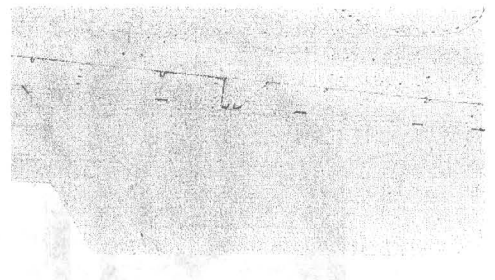
Выполнены экспериментальные исследования по обнаружению воды в стеклопластиковых и углепластиковых сотовых изделиях пассивным методом.

Тепловой метод обнаружения воды в сотах является бесконтактным, оперативным и хорошо документируемым, в силу чего его можно рассматривать в качестве скринингового в комбинации с УЗВ контролем.

Авторы выражают благодарность Ю.А. Москалеву (Томский НИИ интроскопии) за проведенные рентгенотелевизионные испытания сотовых изделий.



Термограмма (участки отрицательной температуры – темные области - соответствуют зонам с влагонаполнением)



Видимое изображение

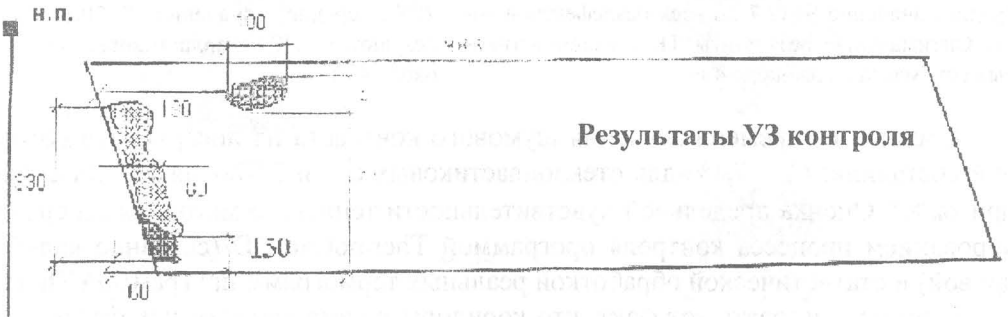
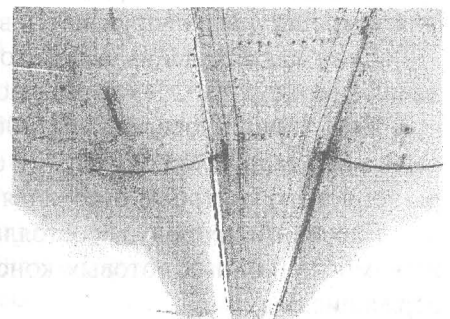


Рис. 3. Элерон левый



Термограмма(темные области на изображении соответствуют зонам с влагонаполнением)



Видимое изображение

Рис. 4. Сотовые панели подфюзеляжных зализов (вид снизу)

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. П. Вавилов. Тепловой неразрушающий контроль композитов и многослойных изделий. Часть I: Краткая история и основные особенности. -Дефектоскопия, 1993, № 10. С. 52-64.
2. В. П. Вавилов. Тепловой неразрушающий контроль композитов и многослойных изделий. Часть II: Новые процедуры и обработка термограмм.-Дефектоскопия, 1993, № 10. С. 65-75.
3. V. P. Vavilov, D. D. Burleigh, A. G. Klimov, Advanced Modeling of Thermal NDT Problems: From Buried Landmines to Defects in Composites, Proc. SPIE "Thermosense-XXIV", 2002, Vol. 4710, pp. 507-521.