



УДК 620.179.1
ГРНТИ 12.09.11

ТЕПЛОВИЗИОННАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Н.П. ЗАЕЦ

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

И.А. ЧИЖОВ, кандидат технических наук, доцент

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

В.В. КОРОЛЕНКО, кандидат экономических наук

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

В статье показана проблема выявления дефектов в многослойных конструкциях авиационной техники. Предлагается применение тепловизионного метода контроля для выявления расслоений и отрыва обшивок от заполнителя в многослойных конструкциях. Проанализированы факторы, влияющие на выявление дефектов при применении тепловизионных средств контроля, а также способы теплового воздействия на контролируемые объекты. В статье описаны результаты проведения математического моделирования процесса переноса теплоты в многослойной конструкции. Представлены результаты проведённого эксперимента по выявлению дефектов в многослойных конструкциях, выполненных из полимерных композиционных материалов.

Ключевые слова: многослойные конструкции; тепловизионный контроль; температурная аномалия; выявление дефектов.

THERMOGRAPHIC INSPECTION OF COMPOSITE AIRCRAFT STRUCTURES

N.P. ZAETS

MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)

I.A. CHIZHOV, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)

V.V. KOROLENKO, Candidate of Economic Sciences

MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)

The article shows the problem of detecting defects in multilayer structures of aircraft. It is proposed to use the thermal imaging inspection method for the detection of delamination and separation of the skins from the filler in multilayer structures. The factors affecting the detection of defects in the application of thermal control devices and methods of thermal influence on the controlled objects have been analyzed. The article describes the results of the mathematical modeling of heat transfer in multilayer structures. The results of the experiment on the detection of defects in multilayer structures made of polymer composite materials are presented.

Keywords: sandwich structures; thermal control; temperature anomaly; defect detection.

В настоящее время на воздушных судах (ВС) различного назначения, как отечественного, так и иностранного производства в большом количестве применяются многослойные конструкции. Данные конструкции представляют собой элементы, состоящие из обшивки и заключённого ею заполнителя. Они обладают высокой жёсткостью и от-



носителем малой массой, в связи с чем их применение продолжает увеличиваться. Однако, показатели жёсткости могут сохраняться лишь при условии целостности данных конструкций, отсутствия таких дефектов как отрыв заполнителя от обшивки, разрушение заполнителя. В свою очередь в авиационной отрасли сохраняется рост использования полимерных композиционных материалов (ПКМ). Например, 75 % площади планера самолёта Т-50 выполнено из ПКМ, крыло и хвостовое оперение являются клеевыми многослойными конструкциями. Применение новых материалов возможно только при наличии средств их неразрушающего контроля. В связи с этим, на авиационной технике выполняется большое количество работ с применением различных методов и средств неразрушающего контроля конструкций. По результатам диагностирования выполняется оценка технического состояния. Критерием оценки технического состояния многослойных элементов является суммарная площадь дефектов [1].

Основными методами неразрушающего контроля многослойных конструкций являются радиационные и акустические методы. Существенными недостатками радиационных методов являются повышенные требования к безопасности проведения контроля, необходимость двухстороннего доступа к объекту контроля, невозможность выявления разрушения клеевых соединений, высокая стоимость контроля. Радиационные методы применяются для выявления воды (льда) в многослойных конструкциях с заполнителем, выявления разрушения заполнителя [2].

Метод акустического импеданса используется для выявления отслоений и расслоений в многослойных конструкциях. Однако он обладает малой производительностью контроля, не позволяет выявлять отслоения заполненные льдом или при плотно прилегающих слоях, не способен выявлять воду (кроме ультразвукового), проблематично определение вида дефекта. Проведение дефектоскопического контроля допускает высокую вероятность пропуска дефектов, поверхность которых не попадает под линии проведения преобразователем. Не выявление дефектов препятствует достоверной оценке технического состояния [2].

Таким образом, для оценки технического состояния многослойных конструкций, в настоящее время необходимо использование комбинации методов неразрушающего контроля. Однако, применение тепловизионного метода контроля позволяет выявлять как воду в заполнителе, так и расслоения в конструкциях из композиционных материалов (стекло- и углепластиках). Одновременно, тепловизионный метод является интегральным, т.е. позволяет проводить контроль всей поверхности объекта, и сопоставим, по оперативности, с визуальным контролем. Явным недостатком применения тепловизионных средств является низкая методическая обеспеченность данного контроля. Разработка новых методик позволит повысить технологичность контроля [3, 4].

Тепловым неразрушающим контролем называют контроль материалов путем анализа тепловых потоков (температурных полей). Различают пассивный и активный тепловой контроль. Пассивным называют такой тепловой контроль, при котором дополнительный источник нагрева отсутствует; активным - с использованием дополнительного источника нагрева. Наиболее распространённым в практике контроля материалов является активный тепловой контроль. Это обусловлено возможностью получения ярко выраженных температурных аномалий над дефектными зонами. Применительно к тепловому неразрушающему контролю дефекты принято разделять на емкостные и резистивные. Емкостными называют дефекты с теплоёмкостью значительно больше теплоёмкости основного материала (посторонние включения). К данному виду дефектов относится, например, вода в сотовом заполнителе многослойной конструкции. К резистивным относят дефекты, характеризующиеся высоким тепловым сопротивлением. К таковым относятся, например, расслоения заполненные воздухом [4, 5].



Наиболее распространёнными способами нагрева являются оптический и конвективный. Преимущества каждого способа нагрева представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Преимущества видов нагрева

Конвективный	Оптический (импульсом Дирака)
Возможность гармонического нагрева	Возможность мгновенного нагрева большой площади
Возможность нагрева криволинейных поверхностей	
Высокая доступность метода в подразделениях эксплуатирующих авиационную технику	Простота применения
Простота регулирования температуры нагрева	

Однако применение оптического способа нагрева (импульсом Дирака) объектов, выполненных из композиционных материалов является нежелательным:

- возможен мгновенный перегрев поверхности объекта (до сотен градусов Цельсия), что приведёт к разрушению лакокрасочного покрытия элемента или разрушению полимерной обшивки;
- максимальная глубина прогрева не более 3 мм [4].

Так же оптический нагрев в основном применим для плоских тел, а его эффективность сильно зависит от коэффициента излучения поверхности объекта. По этой причине для проведения исследований по выявлению дефектов в композиционных конструкциях был выбран конвективный нагрев. Применение конвективного нагрева позволяет исключить возможность повреждения конструкции. При этом для ВС военного назначения характерны конструкции, чья поверхность обладает малым радиусом кривизны. В этом случае равномерный нагрев оптическими средств затруднителен, а конвективный поток напротив – позволяет эффективно нагревать данные поверхности.

Одним из основных элементов ВС военного назначения выполненных из полимерных композиционных материалов является обтекатель радиолокационной станции (РЛС). Обтекатель РЛС, как правило, представляет собой многослойную конструкцию, состоящую из обшивки и заполнителя. Материалом конструкции является стеклопластик. Основным дефектом названной конструкции является отрыв обшивки от заполнителя. Анализ размеров выявленных дефектов (рисунок 1) показывает, что количество выявленных дефектных зон зависит от их размера.

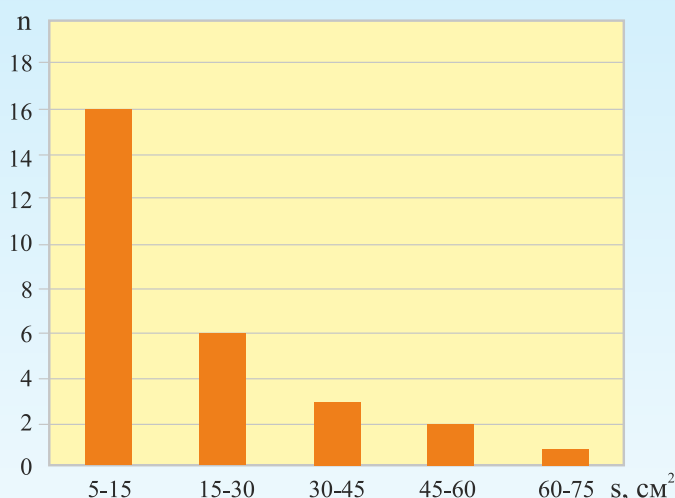


Рисунок 1 – Количество дефектов

Максимальное количество приходится на дефекты минимальной площади. При этом площадь минимального выявленного дефекта составляет 5 cm^2 , дефекты с мень-



шей площадью методом акустического импеданса не выявлены. Учитывая вышеизложенное, в качестве объекта дальнейшего исследования был выбран радиопрозрачный обтекатель РЛС оперативно-тактического ВС. Данный объект представляет собой пятислойную конструкцию: обшивка – наполнитель – обшивка – наполнитель – обшивка, и подвергается неразрушающему контролю методом акустического импеданса с целью обнаружения расслоения слоёв стеклоткани в наружной и внутренней обшивках обтекателя и отслоений слоёв наружной и внутренней обшивок от сотового наполнителя (рисунок 2).

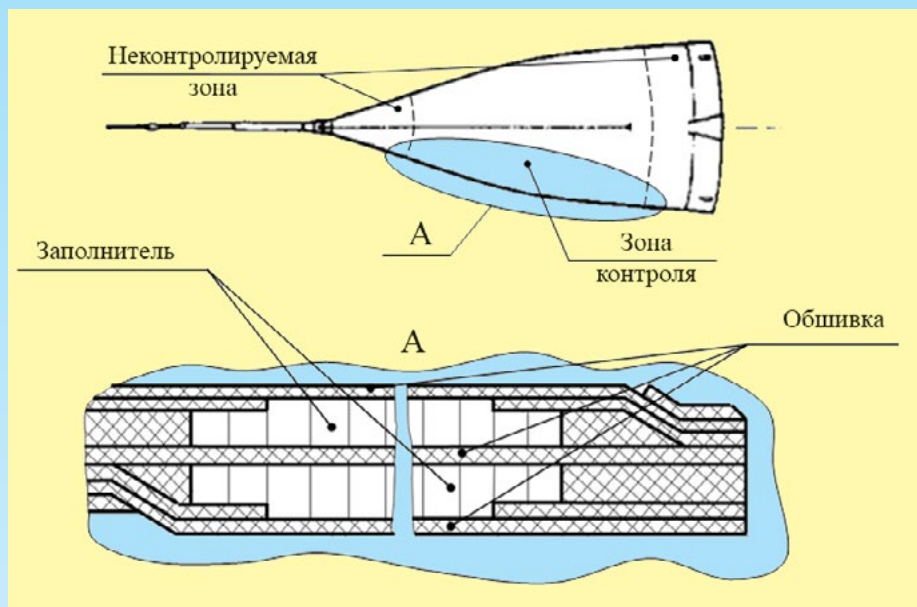


Рисунок 2 – Носовой обтекатель воздушного судна. Разрез стенки обтекателя по образующей

Толщина одного слоя стеклопластиковой обшивки составляет 1,2 мм, суммарная толщина наполнителя – 8 мм. Неконтролируемыми являются зоны возле мест креплений обтекателя к фюзеляжу и штанги приёмника высокого давления (ПВД) к обтекателю конуса.

С целью оценки возможности проведения тепловизионного контроля данного объекта контроля (ОК) было проведено математическое моделирование процесса переноса теплоты. В основу математической модели было взято дифференциальное уравнение теплопроводности (1). Учитывая низкую теплопроводность полимерного композиционного материала, тепловой диффузией было решено пренебречь, соответственно модель строилась одномерной. Так же в модели исключались фазовые превращения ($\lambda = \text{const}$) и наличие внутренних источников тепла ($q_v = 0$).

$$\text{div}(\lambda \cdot \text{grad}T(x, y, z, \tau)) + q_v = C \cdot \rho \cdot \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); q_v – удельная мощность, характеризующая наличие внутренних источников тепла, Вт/м³; C – теплоёмкость материала, Дж/(кг·К); ρ – плотность материала, кг/м³; τ – время, с; T – температура, °С.

Для построения эффективной математической модели был проведён предварительный литературный анализ факторов, влияющих на выявление дефектов (таблица 2). С учётом условий проведения тепловизионного контроля обтекателя были выделены



существенные и малозначительные факторы. Часть факторов (в основном геометрические параметры) были приняты за постоянную величину.

Таблица 2 – Факторы, влияющие на выявление дефектов

№ п/п	Фактор	Описание фактора	Характеристика фактора
1	Материал объекта контроля (его теплофизические характеристики)	Плотность, теплоёмкость, коэффициент теплопроводности	const
2	Тип дефекта	Отслоение - резистивный	const
3	Глубина залегания дефекта	Равная толщине обшивки	const
4	Ширина раскрытия и площадь дефекта	Минимальный размер выявляемый методом акустического импеданса	const
5	Время нагрева	Не ограничено	var
6	Температура нагрева	Не ограничено	var
7	Влияние метеоусловий	Нет	Незначительный
8	Солнечная радиация	Нет	Незначительный
9	Взаимное положение средства нагрева и тепловизора	Одностороннее	const
10	Чистота контролируемой поверхности	Поверхность – материал конструкции	const
11	Вид нагрева	Конвективный	const

Контроль исследуемого обтекателя выполняется в заводских условиях, т.е. влиянием метеоусловий и солнечной радиацией можно пренебречь. Из таблицы 2 видно, что варьируемыми факторами являются время и температура нагрева. Построенная математическая модель позволила оценить влияние варьируемых факторов на возможность выявления дефектов.

Ограничение температуры нагрева T_a обуславливалось техническими возможностями: от $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $180\text{ }^{\circ}\text{C}$. Время нагрева τ_h не лимитировалось. Выходными данными модели были температуры дефектной и бездефектной зон на этапе охлаждения. Математическая модель позволила получить поверхность отклика температур многослойной конструкции при изменении двух факторов. Учитывая, что при тепловизионном контроле анализу подвергаются температурные аномалии, в математическом моделировании анализу подвергалась разность температур двух зон – дефектной и бездефектной (рисунок 3).

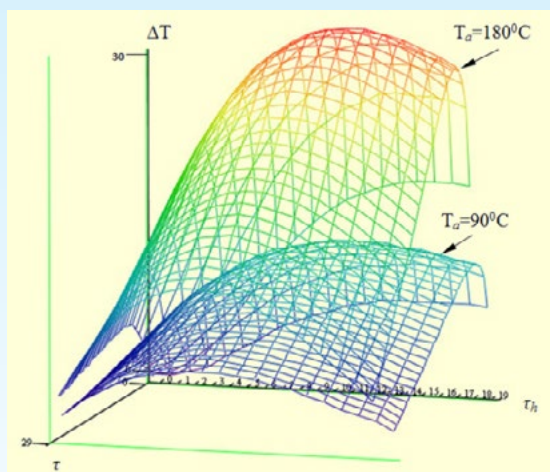


Рисунок 3 – Разность температур при различном времени нагрева на этапе охлаждения для случаев $T_a=90\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T_a=180\text{ }^{\circ}\text{C}$

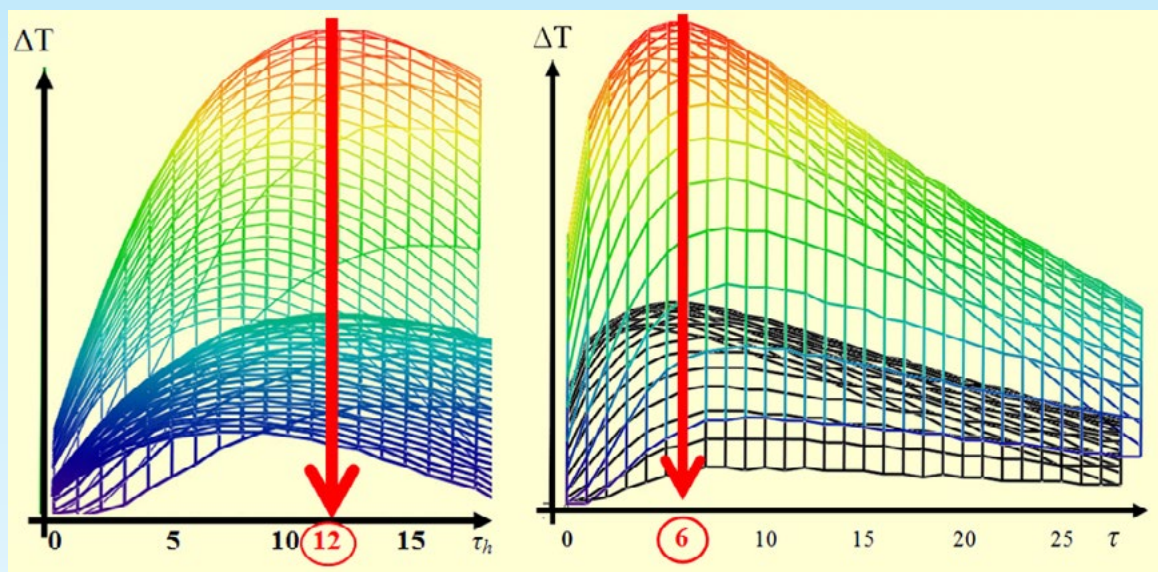


Изменение температуры нагрева влияет лишь на значение разности температур, форма поверхности отклика не меняется. При этом время достижения максимальной разности температур остаётся неизменным (рисунок 4).

Анализ полученных поверхностей отклика позволил установить, что:

- независимо от температуры нагрева увеличение разности температур происходит лишь до 12 секунды нагрева (рисунок 3а), далее разность температур начинает уменьшаться. Это обуславливается достижением максимальной температуры в дефектной зоне и продолжающимся ростом температуры в бездефектной зоне;
- максимальная разность температур между дефектной и бездефектной зонами достигается на 6-й секунде охлаждения (рисунок 3б), при этом время и температура нагрева на данный показатель практически не влияют;
- увеличение температуры воздушного потока приводит к росту разности температур, при этом скорость охлаждения (динамичность изменения температур) нагретого объекта контроля увеличивается.

Согласно разрабатываемой технологии, нагрев поверхности ОК будет осуществляться равномерным перемещением нагревателя. Фотографирование тепловизором будет осуществляться на 10-20 секунде охлаждения. При столь значительном временном интервале динамичность изменения температуры поверхности конструкции создаёт затруднения в регистрации дефектной зоны. Учитывая, что чувствительность современных тепловизоров позволяет эффективно различать температуру в $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, время нагрева τ_h было принято исходя из обеспечения разности температур дефектной и бездефектной областей на порядок больше, т.е. равной $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Возникновение данной разности температур соответствует нагреву $\tau_h=6\text{ с}$ при $T_a=90\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рисунок 4).



а) при увеличении времени нагрева τ_h ; б) на этапе охлаждения τ

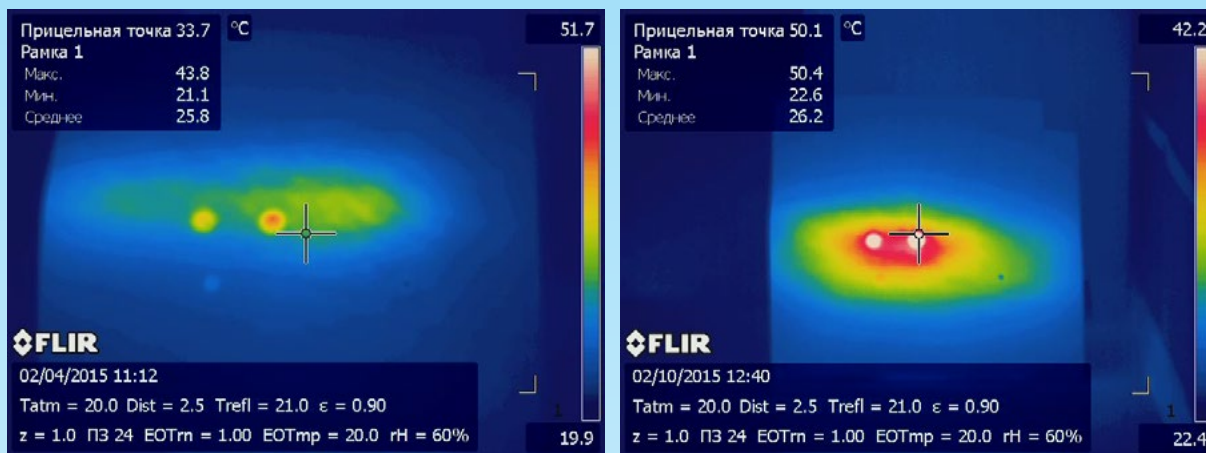
Рисунок 4 – Максимумы разности температур

В эксперименте использовался образец носового обтекателя ВС, в котором были выполнены искусственные дефекты, имитирующие отслоение обшивки от заполнителя различного диаметра: 20 мм (два дефекта), 15 мм (один), 10 мм (один), 5 мм (один). В качестве тепловизионного средства использовалась инфракрасная камера FLIR P640.

Регистрация изменения температурных полей выполнялась инфракрасной камерой установленной на расстоянии 2 метра от ОК.



На термограммах отчётливо видны искусственные дефекты диаметром 20 мм (рисунок 5а). Эксперимент позволил получить чёткое выявление дефектов диаметром 20 мм и 15 мм, температурную аномалию над искусственным дефектом диаметром 5 мм получить не удалось. Так как целью проведения исследований является выявление дефектов, а не измерение температуры, то для упрощения операций разбраковки рекомендуется снизить верхнюю границу интервала температур, что позволяет повысить контрастность температурных аномалий (рисунок 5б).



а) в интервале исследуемых температур;
 б) верхняя граница интервала температур снижена.

Рисунок 5 – Термограммы многослойной конструкции с дефектами

Для оценки качества материалов тепловизионным методом и определения оптимальных параметров контроля применяется различные информативные параметры. Наиболее эффективным является температурный контраст C^{run} , который характеризует превышение температуры дефектной зоны над температурой нагретой бездефектной, и определяется по формуле 2. Применение настоящего температурного контраста не учитывает особенности проведения контроля в нашем случае: контроль неизотермической поверхности, находящейся в разных фазах охлаждения. Поэтому вычисление температурного контраста предлагается выполнять по формуле 3, в которой учитывается временной интервала контроля. Значения, полученные по данной формуле могут существенно отличаться от значений температурного контраста (рисунок 6).

$$C^{run} = \frac{\Delta T}{T_{НД}} = \frac{\Delta T}{T_{БД} - T_{ОК}} \quad (2)$$

$$C^{сред} = \frac{\Delta T}{\overline{T}_{БД(\tau_1, \tau_2)} - T_{ОК}} \quad (3)$$

Аналогичными объектами по виду дефектов являются лопасти воздушных винтов, изготовленные из ПКМ: углеволокно и стеклоткань (внешние слои). Для данного объекта применение тепловизионного контроля позволит успешно выявлять отслоения, а также может решить проблему обнаружения оторвавшихся или некачественно приклеенных нагревательных накладок на лопасть.



На рисунке 7 представлена термограмма образца, выполненного из ПКМ лопасти воздушного винта. В образце имеются искусственные дефекты на глубине 1,0 мм, 1,2 мм и 1,5 мм имитирующие расслоение в слоях стеклопластика и углепластика. Дефекты имеют форму квадрата со стороной 15 мм. Время нагрева составляло 3 с, температура воздушного потока – 120 °С.

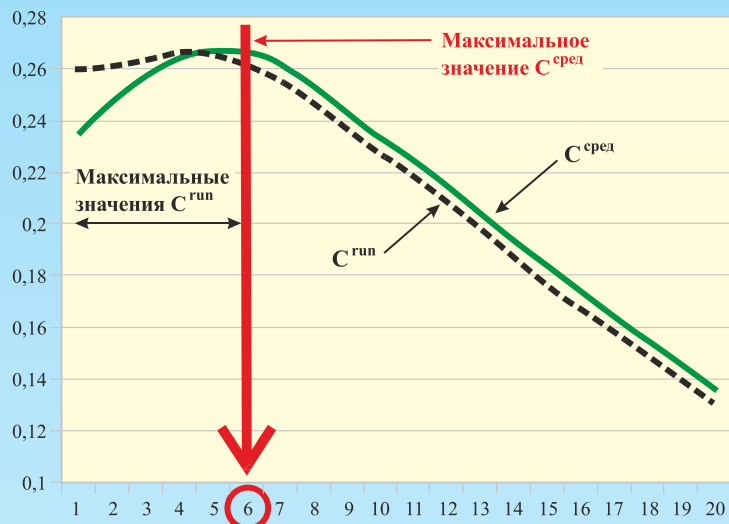
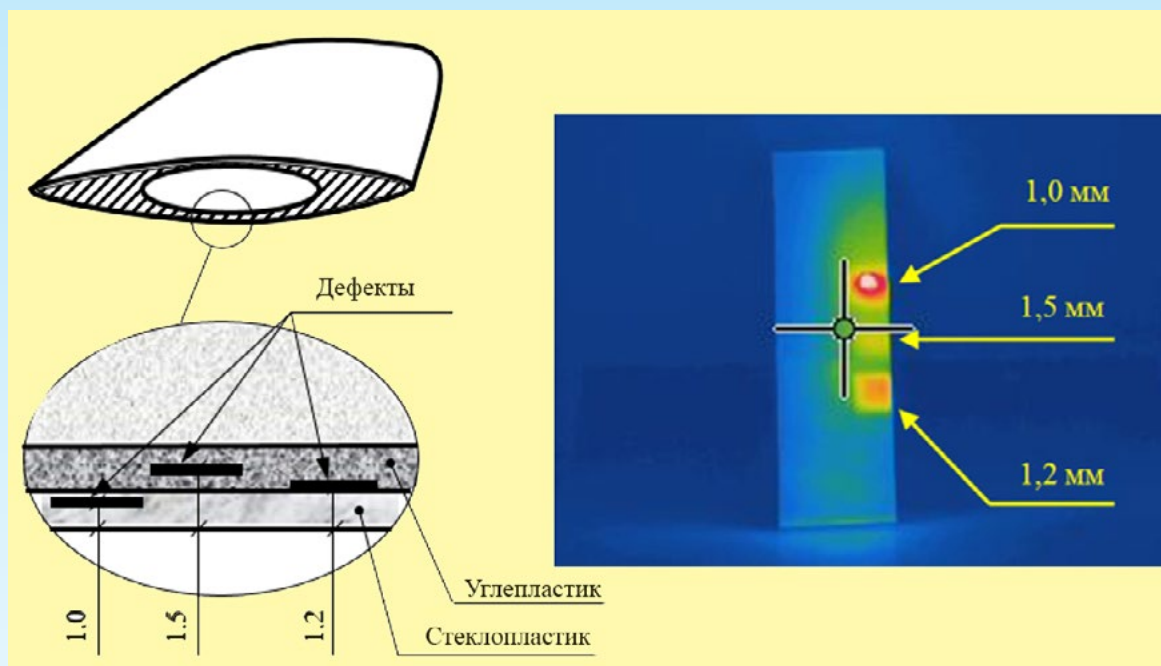


Рисунок 6 – Значения $C^{гип}$ и $C^{сред}$



а) схема поперечного сечения лопасти и расположение дефектов;
 б) пример термограммы лопасти.

Рисунок 7 – Образец композиционной лопасти с дефектами

На полученной термограмме видны три температурные аномалии от искусственных дефектов. Полученные температурные аномалии обладают высокой скоростью охлаждения дефектных зон и не имеют ярко выраженных границ как, например, от-



слоения в образце из стеклопластика. Это обусловлено большей глубиной слоёв ПКМ и отличными теплофизическими характеристиками углепластика. Температурная аномалия над дефектом на глубине 1,5 мм (между слоями углепластика) быстро сливается с бездефектной зоной и её выявление является затруднительным. Температурные аномалии над искусственными дефектами на глубине 1,0 мм и 1,2 мм (соответственно между слоями стеклоткани и между стеклотканью и углепластиком) сохраняются дольше.

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

1. Активный тепловизионный контроль позволяет эффективно выявлять дефекты типа расслоений и отрыва обшивки от заполнителя в конструкциях из ПКМ.

2. Выявление дефектов в стеклопластиковом элементе РЛС возможно при кратковременном (от 1 с) нагреве конвективным потоком воздуха (с температурой от 90 °С). Однако, существует предельное время нагрева (для исследуемой конструкции – 12 с) превышение которого приводит к снижению разности температур над дефектной и бездефектной зонами, что ухудшает выявление дефектов.

3. Температурные аномалии над дефектами многослойных конструкций из стеклопластика обладают хорошо выраженной границей и наблюдаются в течении длительного времени.

4. Использование тепловизионных средств для выявления отслоений в лопастях воздушных винтов возможно с применением дополнительного источника теплового воздействия. Температурные аномалии от дефектов в образце композитной лопасти выявляются на глубинах до 1,2 мм, дефекты на большей глубине выявить затруднительно. Характерным для термограмм данной конструкции является расплывчатость границ температурных аномалий и относительно быстрое их охлаждение до температуры бездефектной зоны конструкции.

5. Применение тепловизионного метода позволяет производить сплошной контроль поверхности многослойной конструкции для выявления дефектов, что обеспечивает повышение точности оценки их технического состояния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крысин В.Н. Слоистые клееные конструкции в самолётостроении. М.: Машиностроение, 1990. 228 с.

2. Ключев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика. 2-е изд., доп. М.: Машиностроение, 2003. 657 с.

3. Вавилов В.П., Климов А.Г., Ширяев В.В. Активный тепловой контроль воды в авиационных сотовых конструкциях // Дефектоскопия. 2002. № 12. С. 73–84.

4. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. 2-е изд., доп.. М.: Спектр, 2013. 544 с.

5. Будадин О.Н., Вавилов В.П., Абрамова Е.В. Тепловой контроль. М.: Спектр, 2013. 176 с.

6. Чижов И.А., Заец Н.П., Богомолов Д.В. Моделирование процесса теплопроводности в многослойных конструкциях // Актуальные проблемы вооружённой борьбы в воздушно космической сфере: всерос. ежегод. науч. конф. (9–10 апреля 2015). Воронеж. С. 187–191.

BIBLIOGRAPHY

1. Krisin V.N. Glulam structures in aircraft construction. M.: Mashinostroenie. 1990. 228 p.



2. Kluev V.V. Nondestructive testing and diagnostics. The 2nd issuing added. M.: Mashinostroenie, 2003. 657 p.
3. Vavilov V.P., Klimov A.G., Shiryayev V.V. The active thermal control of water in the air honeycomb structures // Defektoskopiya. 2002. No. 12. P. 73–84.
4. Vavilov V.P. Infrared thermography and thermal control. M.: Spektr, 2013. 544 p.
5. Budadin O.N., Vavilov V.P., Abramova E.V. Thermal control . M.: Spektr, 2013. 176 p.
6. Chizhov I.A., Zaets N.P., Bogomolov D.V. Modelling of heat conduction process of multilayer structures // Actual problems of the armed struggle in the area of air space: All-Russia annual conference (On Apr. 9–10, 2015). Voronezh. P. 187–191.

© Заец Н.П., Чижов И.А., Короленко В.В., 2017

Заец Николай Петрович, научный сотрудник научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, vaiu@mil.ru

Чижов Игорь Александрович, кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника кафедры инженерно-авиационного обеспечения (технической эксплуатации и восстановления авиационной техники), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, vaiu@mil.ru

Короленко Виктор Владимирович, кандидат экономических наук, начальник научно-исследовательского отдела научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, vaiu@mil.ru