

УДК 629.7.023.24 : 629.7.083.025

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МНОГОСЛОЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАНЕРА ВОЗДУШНОГО СУДНА

Н.П. ЗАЕЦ, О.Н. КАРПЕНКО, В.С. ОЛЕШКО, И.А. ЧИЖОВ

В настоящее время имеют большую актуальность вопросы, связанные с возможностью теплового неразрушающего контроля авиационных конструкций. В статье рассмотрено математическое моделирование и натурное моделирование процесса теплового контроля для выявления отслоений заполнителя от обшивки многослойной конструкции воздушного судна. Рассмотрено влияние температуры и длительности нагрева на проведение теплового неразрушающего контроля.

Ключевые слова: тепловой контроль, многослойная конструкция, воздушное судно, моделирование, отслоение.

В настоящее время на воздушных судах (ВС) различного назначения как отечественного, так и иностранного изготовления в большом количестве применяются многослойные конструкции. Данные конструкции обеспечивают высокую жесткость при относительно малой массе, в связи с чем их применение продолжает увеличиваться, и альтернативы данным конструкциям в ближайшее время не ожидается. Однако показатели жесткости могут сохраняться лишь при условии целостности данных конструкций. В связи с этим на авиационной технике выполняется большое количество работ с применением различных методов и средств неразрушающего контроля конструкций для выявления характерных этим конструкциям дефектов: разрушение заполнителя, отрыв обшивки от заполнителя и т. д. Определение наличия возникших дефектов, их размеров позволяет оценить техническое состояние многослойной конструкции и сделать заключение об исправности ВС. Однако, помимо точности проводимого контроля, большое значение для ВС имеет оперативность контроля.

В этой связи особое внимание обращает на себя тепловой метод контроля, который обладает существенными преимуществами:

- бесконтактный метод, который возможно применять к любым материалам;
- высокая производительность, при пассивном тепловом контроле сравнимая с визуальным контролем;
- возможность использования в качестве метода предварительного контроля, в комбинациях с другими методами неразрушающего контроля [1, 2].

Таким образом, существует объективная необходимость в разработке методик теплового неразрушающего контроля (ТНК) многослойных конструкций ВС, которые в настоящее время несовершенны.

С целью совершенствования неразрушающего контроля многослойных элементов планера ВС была поставлена задача разработки методики одностороннего активного ТНК многослойных конструкций с обшивкой из полимерных конструкционных материалов (ПКМ). Для этого были проанализированы конструкции ВС, характерные эксплуатационные дефекты таких конструкций и возможности теплового метода контроля по их обнаружению.

Одной из задач разработки методики теплового контроля многослойных конструкций ВС являлась разработка модели протекания тепловых процессов в дефектной и бездефектной зонах элемента с обшивкой из ПКМ.

Целью моделирования являлось установление возможности проведения теплового контроля для определения целостности многослойных элементов планера ВС.

Для этого решались задачи:

- определение показателей контроля;

- определение факторов, влияющих на показатели контроля;
- определение степени влияния этих факторов на показатели контроля;
- выбор оптимальных значений показателей ТНК.

Процесс теплопроводности в материалах описывается дифференциальным уравнением Фурье (1):

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

где λ – коэффициент теплопроводности, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$;

T – температура, $^{\circ}\text{C}$;

q_v – удельная мощность, характеризующая наличие внутренних источников тепла, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$;

C – теплоемкость материала, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;

ρ – плотность материала, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

τ – время, с.

Учитывая низкую тепловую диффузию в стекло- и углепластиках, модель теплопроводности приняли одномерной. Таким образом, процесс теплопроводности рассматривается как распространение тепла в стержне [1, 3], который проходит через многослойную конструкцию по оси Ox (рис. 1).

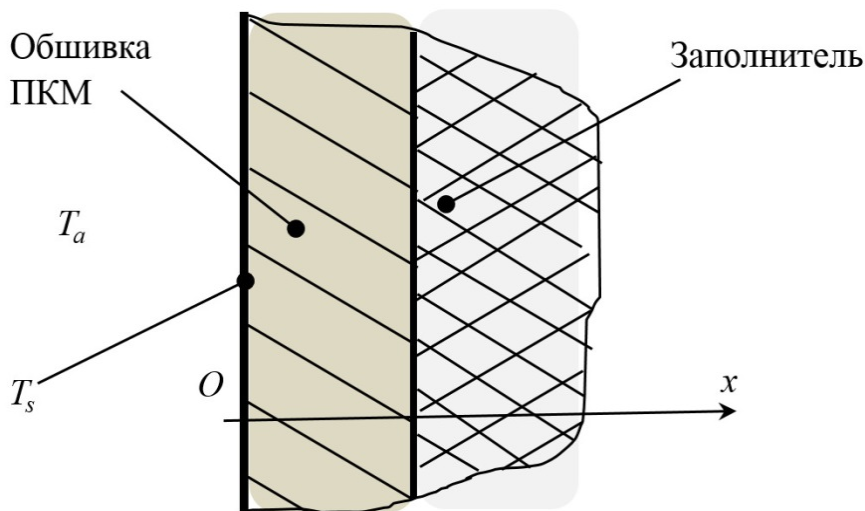


Рис. 1. Схема бездефектной зоны

Уравнение (1) имеет бесконечное множество решений. Для получения нужного решения были заданы необходимые условия однозначности, представленные на рис. 2.

Геометрические, теплофизические характеристики в модели были приняты соответственно моделируемому многослойному элементу, представляющему трехслойную конструкцию из стеклопластиковой обшивки и заполнителя, применяемому в обтекателе радиолокационной станции серийного ВС. Температура окружающей среды и температура конструкции по всей глубине в начальный момент времени принимались равными 20°C .

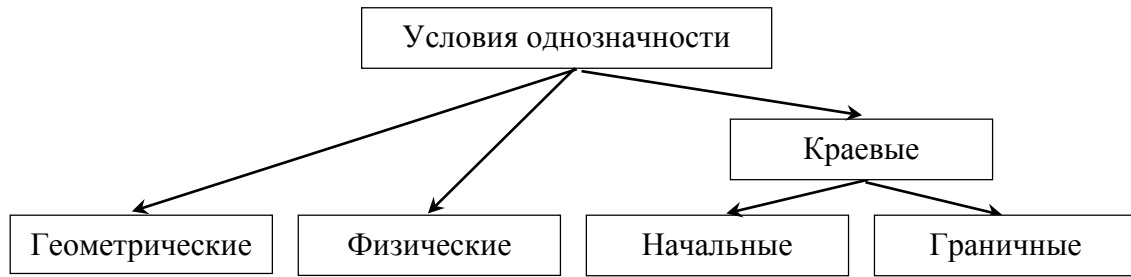


Рис. 2. Схема условий однозначности

Для создания одномерной математической модели потребовались решения основного дифференциального уравнения (2), уравнений граничных условий третьего и четвертого рода ((3) и (4) соответственно) [4, 5]:

$$\lambda \cdot \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} = C_p \cdot \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau}, \quad (2)$$

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} = \alpha \cdot (T_a - T_s(x, \tau)), \quad (3)$$

$$T_1 = T_2, \quad \lambda_1 \cdot \left(\frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial x} \right) = \lambda_2 \cdot \left(\frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial x} \right), \quad (4)$$

где T_a – температура воздуха над обшивкой (нагревающего воздушного потока), °С;

T_s – температура поверхности обшивки, °С;

T_1, T_2 – температуры на стыке двух материалов (например: обшивка – заполнитель), °С.

Решения были выполнены численным методом (методом конечных разностей), суть которого заключается в разбиении исследуемого стержня на отрезки равной длины h (рис. 3). Изменение по времени отражается на оси ординат $O\tau$, которая разбивается на равные временные шаги l . Таким образом, моделирование процесса происходит в области $Ox\tau$, образованной прямыми $x = i \cdot h$, где $i = 1, 2, 3, \dots$; и $\tau = k \cdot l$, где $k = 1, 2, 3, \dots$. Пересечения прямых образуют «тепловую сетку», в узлах которой вычисляются значения температур.

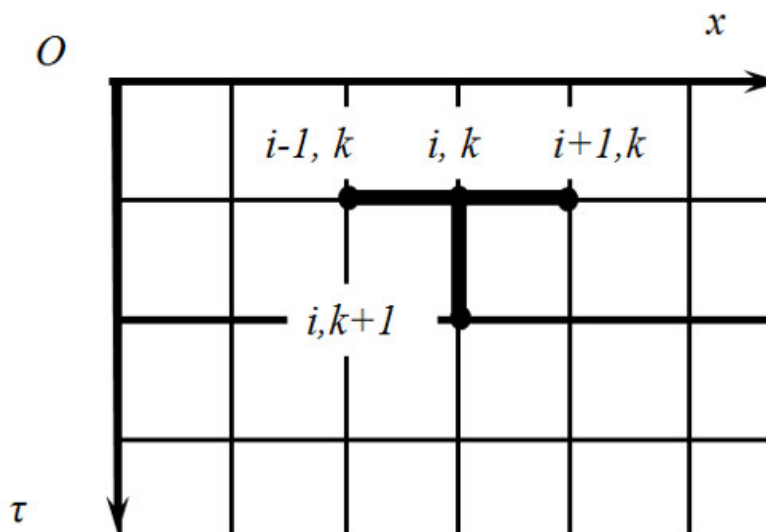


Рис. 3. Схема «тепловой сетки»

Решение уравнения (3) имеет вид:

$$T_{0,k+1} = \frac{T_a + b \cdot T_{1,k+1}}{1 + b}, \quad (5)$$

где $b = \frac{\lambda}{a \cdot h}$.

Уравнение (5) позволяет вычислять значения температур в узлах сетки, расположенных на границе материал – воздух (атмосфера).

Решение уравнения (4) имеет вид:

$$T_{i,k+1} = \frac{d \cdot T_{i+1,k+1} + g \cdot T_{i-1,k+1}}{d + g}, \quad (6)$$

где $d = \frac{\lambda_1}{h}$ и $g = \frac{\lambda_2}{h}$.

Уравнение (6) позволяет вычислять значения температур в узлах на стыке материал – материал (например: обшивка – наполнитель).

Решение уравнения (2) имеет вид:

$$T_{i,k+1} = T_{i,k} + m \cdot (T_{i-1,k} - 2T_{i,k} + T_{i+1,k}), \quad (7)$$

где $m = \frac{\lambda \cdot l}{C \cdot \rho \cdot h^2}$.

Уравнение (7) позволяет вычислять значения температур в остальных узлах сетки (внутри материала) с учетом временного шага l .

Представленные численные решения (уравнения (5), (6), (7)) были реализованы в табличном процессоре Excel.

Бездефектную зону объекта моделирования рассматривали как слой обшивки, имеющий идеальный контакт с наполнителем, в случае представления дефектной зоны – за обшивкой следовал воздушный зазор.

В качестве дополнительного источника тепловой стимуляции рассматривается конвективный нагрев (тепловая «пушка», промышленный электрический фен и т. п.). Это обусловлено рядом преимуществ конвективного нагрева перед оптическим (табл. 1) [1].

Таблица 1

Сравнительные характеристики дополнительных источников стимуляции

Конвективный	Оптический (импульсом Дирака)
Возможность регулирования температуры воздушного потока	Сильно зависит от коэффициента излучения поверхности объекта
Применим для поверхностей любой формы	Эффективен при нагреве лишь плоских тел
Доступно в подразделениях, эксплуатирующих авиационную технику	Контроль ПКМ глубиной не более 3 мм
	Возможен мгновенный перегрев поверхности объекта (до сотен градусов Цельсия), разрушение лакокрасочного покрытия

Исходными данными для расчета (входными данными модели) были: T_a – температура нагрева или атмосферы для этапа охлаждения; T_0 – начальная температура конструкции; α –

коэффициент теплоотдачи, отражающий принудительную конвекцию для нагрева или естественную для этапа охлаждения. В выбранные моменты времени нагрева τ_h вычисленные значения температур по глубине конструкции (рис. 4, точка A) «фиксировались» и принимались за начальные для этапа охлаждения. Описанная последовательность применялась для дефектной и бездефектной зон. Полученные на этапе охлаждения значения температур поверхности многослойной конструкции сравнивались. В результате получали разность температур ΔT , зависящую от времени охлаждения $\tau_{\text{охлаждение}}$ (рис. 4).

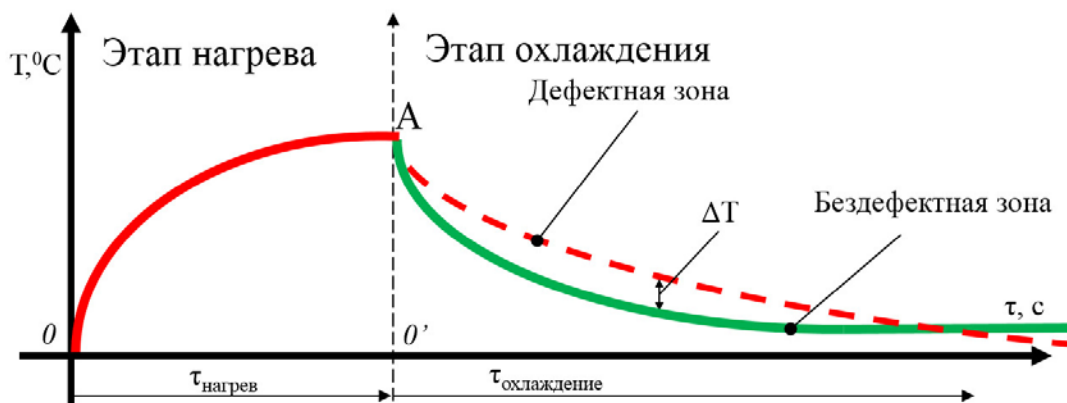


Рис. 4. Схема изменения температуры обшивки

Полученная зависимость $\Delta T = \varphi(\tau_{\text{охлажден}})$ подвергалась анализу.

Первоначально длительность нагрева и охлаждения не лимитировались. Моделирование проводилось при четырех значениях температур нагревающего воздуха (90, 120, 150 и 180 °C) исходя из технических возможностей нагрева и критических значений температур для ПКМ.

Например, при моделировании нагрева с температурой воздушного потока 120 °C на шестой секунде нагрева была выявлена разность температур между зонами $\Delta T = 1,1$ °C, что на порядок больше чувствительности основной части тепловизоров. Очевидно, что на этапе охлаждения разность температур для дефектной и бездефектной зон тоже будет обеспечена. Поэтому с данного момента было начато охлаждение (рис. 5a). Далее вычисляли разность температур ΔT (рис. 5б), на которой определяли достигнутый максимум (в рассматриваемом примере $\Delta T_{\text{мах}} = 3,7$ °C), время его достижения ($\tau_{\text{онт}} = 6$ с), и длительность сохранения максимального значения ($\tau = 3$ с). Перечисленные показатели определялись по всем получаемым зависимостям $\Delta T = \varphi(\tau_{\text{охлажден}})$.

После анализа шестисекундного варианта нагрева, с целью повышения оперативности проведения ТНК рассматривались периоды нагрева 1 и 3 с, а также 12 с – для более глубокого исследования влияния данного фактора.

Варьирование температуры воздушного потока (тепловой стимуляции) и времени нагрева объекта контроля (ОК) позволило выявить некоторые зависимости и сделать следующие выводы:

- проведение теплового контроля моделируемой многослойной конструкции для выявления отслоений обшивки от заполнителя возможно при определенных показателях температуры нагревающего воздушного потока T_a и времени нагрева τ_h ;
- увеличение времени нагрева приводит к росту разности температур дефектной и бездефектной зон, но уменьшает время наблюдения максимальной разности температур, повышает динамичность изменения температурных полей на поверхности ОК;
- увеличение температуры нагревающего воздушного потока приводит к росту разности температур дефектной и бездефектной зон, но уменьшает время наблюдения максимальной разности температур, повышает динамичность изменения температурных полей на поверхности ОК;
- увеличение времени нагрева или температуры воздушного потока слабо влияют на время достижения максимальной разности температур дефектной и бездефектной зон.

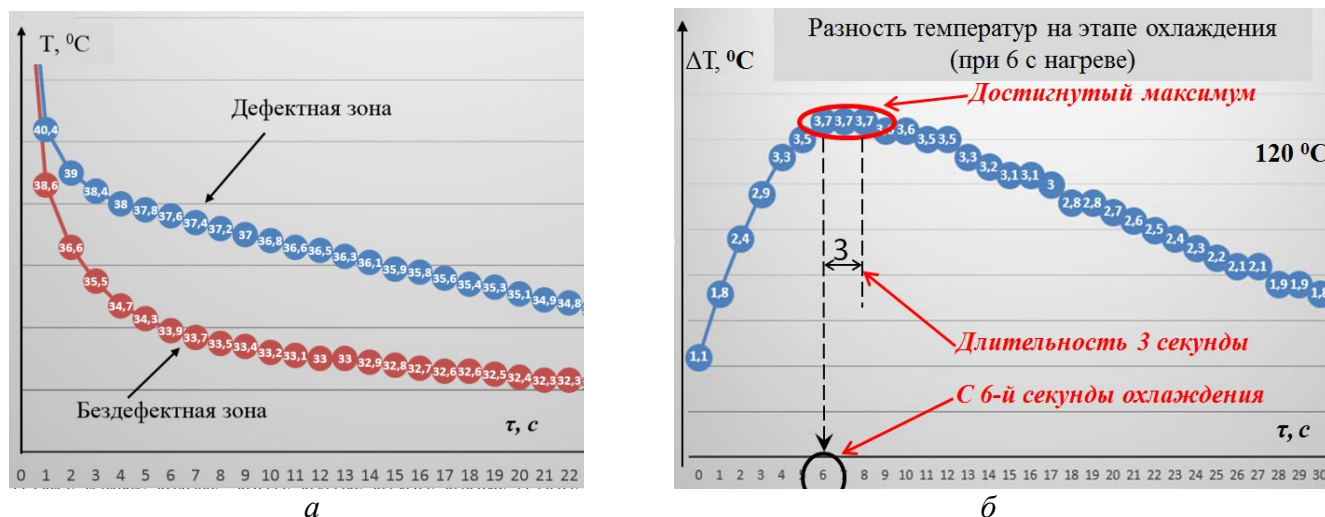


Рис. 5. Зависимости температуры от времени:

a – значения температур над дефектной и бездефектной зонами; b – разность температур над зонами

Высокая динамичность температурных полей является нежелательным явлением, т. к. сокращается время для оценки температурных аномалий и выявления дефектных зон.

Моделирование позволило определить оптимальное время наблюдения и интервал температур, в котором следует ожидать наблюдение дефектной и бездефектной зон многослойной конструкции при тепловом контроле.

Следующим этапом исследования стало проведение полнофакторного эксперимента. Опыты проводились по комбинациям, представленным в табл. 2.

Таблица 2

Комбинации факторов

№ опыта	Факторы	
	Время нагрева $\tau_h, \text{с}$	Температура $T_a, ^\circ\text{C}$
1	1	90
2	3	90
3	1	120
4	3	120

Объектом для эксперимента являлся трехслойный элемент обтекателя радиолокационной станции. Обшивка элемента выполнена из стеклопластика, наполнитель – ПКМ. Элемент имеет искусственные дефекты, имитирующие отслоение обшивки от наполнителя различного диаметра: 20 мм (два дефекта), 15 мм (один), 10 мм (один), 5 мм (один).

В качестве тепловизионного средства использовалась инфракрасная камера FLIR P640 со следующими техническими характеристиками:

- спектральный диапазон от 7,5 до 13 мкм;
- интервал температур от минус 40 до 500 $^\circ\text{C}$;
- температурная чувствительность 0,055 $^\circ\text{C}$ при 30 $^\circ\text{C}$;
- тип детектора: матрица в фокальной плоскости 640×480 пикселей;
- частота кадров 30 Гц;
- интервал рабочих температур от минус 15 до 50 $^\circ\text{C}$.

В качестве дополнительного источника тепловой стимуляции использовался фен электрический промышленный, обеспечивающий обдув поверхности образца воздушным потоком заданной температуры.

Инфракрасная камера FLIR P640, которой регистрировались изменения температурных полей, устанавливалась на расстоянии 2 м от ОК.

В результате проведенного эксперимента удалось оценить адекватность математической модели, уточнить оптимальное время наблюдения отслоения и влияние варьируемых факторов на проведение контроля, размеры минимального выявляемого дефекта, определить рекомендуемый интервал температур.

На рис. 6 представлены термограммы многослойного элемента со стеклопластиковой обшивкой, полученные при активном одностороннем тепловом контроле, с применением конвективного источника тепловой стимуляции. На термограммах отчетливо видны искусственные дефекты диаметром 20 мм.

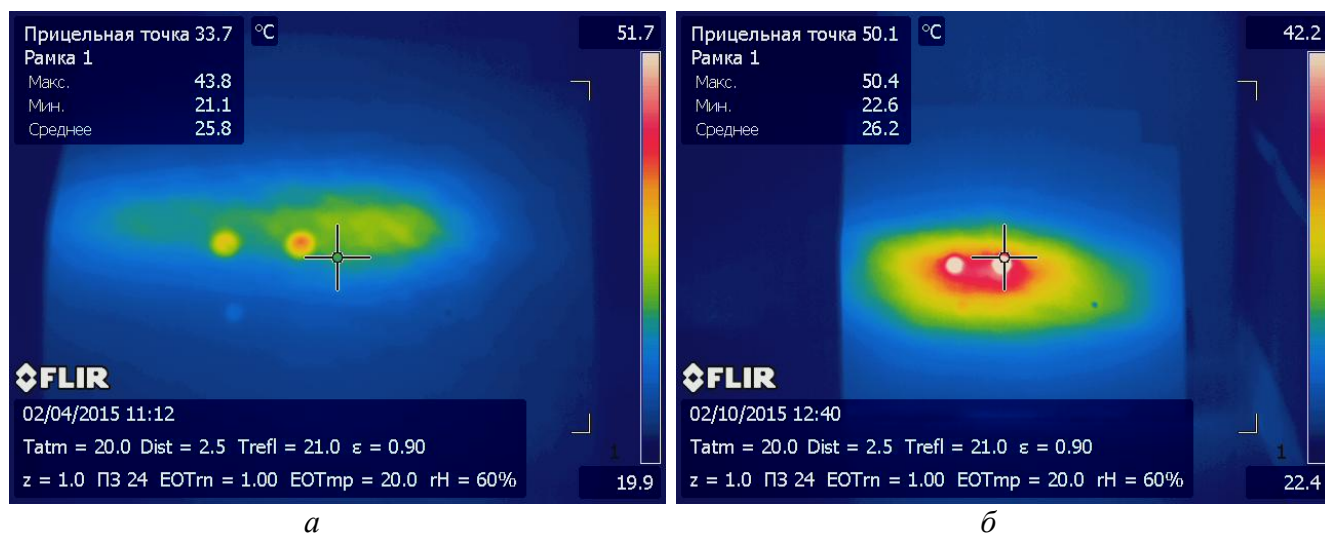


Рис. 6. Термограммы многослойной конструкции с дефектами:

а – в интервале исследуемых температур; б – верхняя граница интервала температур снижена

Эксперимент позволил получить четкое выявление дефектов диаметром 20 мм и 15 мм, температурную аномалию над искусственным дефектом диаметром 5 мм получить не удалось.

Учитывая нестационарность тепловых процессов, которая приводит к непрерывному изменению цветовой палитры ОК на мониторе инфракрасной камеры, создается объективное затруднение в определении дефектных зон. Для упрощения контроля было предложено значение верхней границы интервала температур задавать таким образом, чтобы на время оптимального наблюдения дефектные зоны на термограммах были представлены в белом цвете.

Анализ полученных экспериментальных данных позволил выбрать оптимальные показатели проведения теплового контроля исследуемого многослойного элемента.

Например, после трехсекундного нагрева воздушным потоком 90 °С оптимальное время контроля будет с седьмой по 15-ю секунду охлаждения. При установке верхней границы интервала температур равной 38 °С дефектные зоны на термограммах проявятся белым цветом.

В качестве заключения стоит отметить следующее.

1. Применение активного одностороннего ТНК позволяет выявлять отслоения (с контролируемой стороны) заполнителя от обшивок из ПКМ в многослойных конструкциях.

2. Выявление отслоений диаметром менее 10 мм в многослойных конструкциях со стеклопластиковой обшивкой ТНК неэффективно. Данное явление возможно объяснить тепловой диффузией, которая препятствует возникновению температурной аномалии на поверхности ОК.

3. Кратковременный нагрев (от 1 до 3 с) позволяет получить четко выраженные температурные аномалии над дефектными зонами (на этапе охлаждения), что делает применение ТНК перспективным для контроля многослойных конструкций ВС с целью повышения оперативности НК многослойных конструкций.

4. Экспериментально удалось подтвердить эффективность конвективного источника тепловой стимуляции ТНК, что важно для контроля элементов ВС, характеризующихся малыми радиусами кривизны.

5. Анализ проведенного эксперимента позволил определить оптимальное время наблюдения для выявления отслоений ТНК в многослойном элементе обтекателя радиолокационной станции. Выработаны рекомендации по выбору интервала температур в инфракрасной камере, позволяющие упростить выявление дефектных зон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вавилов В.П.** Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: Издательский дом «Спектр», 2013. 544 с.

2. **Нестерук Д.А.** Тепловой контроль воды в авиационных сотовых панелях в процессе эксплуатации самолетов: дис. ... канд. техн. наук. Томск: Томск. политехн. ун-т, 2005. 158 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. **Пискунов Н.С.** Дифференциальное и интегральное исчисления для втузов. М.: Наука, 1985. 560 с.

5. Об оценке напряженно-деформированного состояния лопаток газотурбинного двигателя лазерным оптико-акустическим методом / О.Н. Карпенко, В.С. Олешко, А.В. Попов, В.М. Самойленко // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 206 (08). С. 96–102.

DESIGN OF PROCESS OF THERMAL NON-DESTRUCTIVE CONTROL NON-METAL MULTI-LAYERED ELEMENTS OF GLIDER OF AIR SHIP

Zaets N.P., Karpenko O.N., Oleshko V.S., Chizhov I.A.

Now days the questions related to the thermal non-destructive control of aviation constructions are more vital. In the article a mathematical design and model design of process of thermal control are considered for the exposure of removing layer by layer of filler from edging of multi-layered construction of air ship. Influence of temperature and duration of heating is considered on realization of thermal non-destructive control.

Key words: thermal control, multi-layered construction, air ship, design, removing layer by layer.

REFERENCES

1. **Vavilov V.P.** Infrakrasnaja termografija i teplovoj kontrol'. M.: Izdatel'skij dom «Spektr», 2013. 544 s.

2. **Nesteruk D.A.** Teplovoj kontrol' vody v aviacionnyh sotovyh paneljah v processe jekspluatacii samoljotov: dis. ... kand. tehn. nauk. Tomsk: Tomsk. politehn. un-t, 2005. 158 s.

3. **Vavilov V.P., Klimov A.G., Shirjaev V.V.** Aktivnyj teplovoj kontrol' vody v aviacionnyh sotovyh konstrukcijah. Defektoskopija. 2002. № 12. S. 73–84.

4. **Piskunov N.S.** Differencial'noe i integral'noe ischislenija dlja vtuzov. M.: Nauka, 1985. 560 s.

5. **Karpenko O.N., Oleshko V.S., Popov A.V., Samojlenko V.M.** Ob ocenke naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija lopatok gazoturbinnogo dvigatelja lazernym optiko-akusticheskim metodom. Nauchnyj vestnik MGTU GA. 2014. № 206 (08). S. 96–102.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Заец Николай Петрович, адъюнкт 71 кафедры инженерно-авиационного обеспечения ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина».

Карпенко Олег Николаевич, старший научный сотрудник ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина».

Олешко Владимир Станиславович, кандидат технических наук, профессор Военного института МАИ (НИУ).

Чижов Игорь Александрович, кандидат технических наук, заместитель начальника 71 кафедры инженерно-авиационного обеспечения ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина».