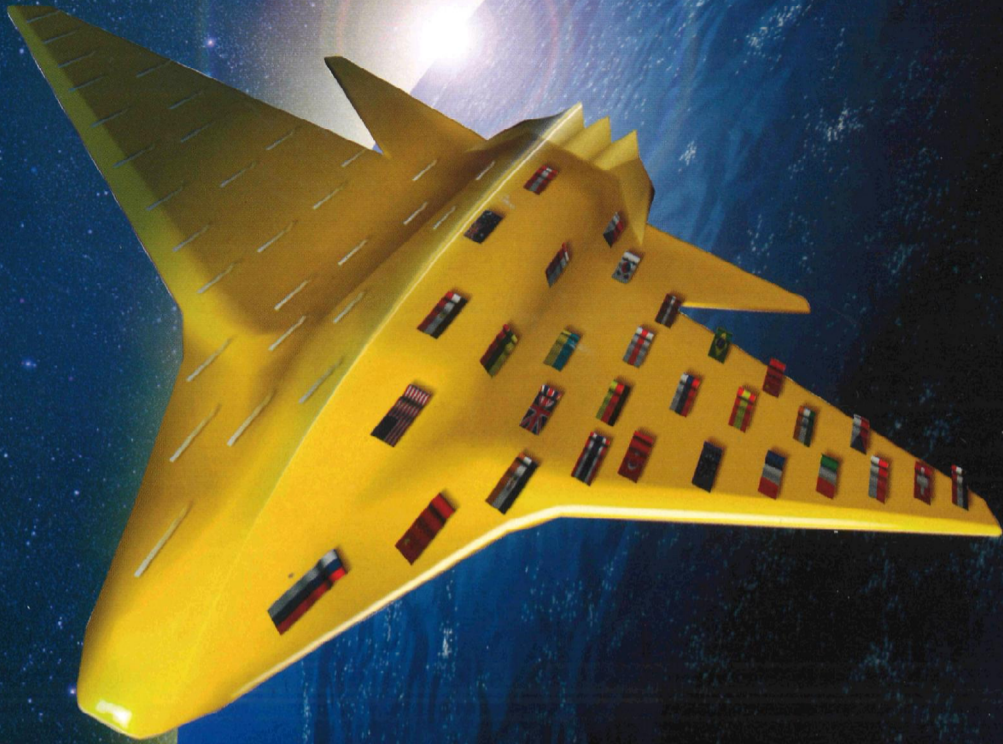


№ 3(23) МАЙ-ИЮНЬ 2005

ИНТЕГРАЛ

Научно-практический межотраслевой журнал

МАКС-2005



Наш мир — мир новых идей и высоких технологий!



ТЕПЛОВИЗИОННАЯ ДЕФЕКТОМЕТРИЯ И ДИАГНОСТИКА

ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

О.Н. Будадин, д.т.н.;
Т.Е. Троицкий-Марков;
В.П. Вавилов, д.т.н.;
Е.В. Абрамова, к.т.н.;

Технологический институт энергетических исследований, диагностики и неразрушающего контроля «ВЕМО», Томский политехнический институт

В настоящее время стали актуальными задачи определения качества и оперативной достоверной диагностики технического состояния материалов и конструкций изделий авиакосмической техники, в том числе в реальных условиях эксплуатации. Для эффективного их решения можно использовать тепловой неразрушающий контроль, в силу его специфики (бесконтактность, возможность контроля объектов в процессе испытаний и штатной эксплуатации, высокой информативности и т.п.). Качественно новые возможности теплового контроля связаны с переходом от тепловой дефектоскопии (обнаружение внутренних дефектов) к тепловой дефектометрии (определение численных характеристик внутренних нарушений сплошности) и далее к оценке остаточного ресурса объектов.

Количественный анализ температурных полей с определением характеристик исследуемого объекта (геометрических, теплотехнических, теплофизических) [1-6] строится на расчетных моделях, предназначенных для решения обратной задачи теплопроводности. Она формулируется в виде задачи на экстремум «функционала правдоподобия».

Ниже описан тепловой метод неразрушающего контроля, обеспечивающий определение характеристик внутренних нарушений сплошности (дефектов), — метод тепловой дефектометрии.

Постановка и решение задач прямой и обратной задачи теплового неразрушающего контроля

Решение обратной задачи в общем виде основано на решении прямой задачи: необходимо так подобрать параметры исследуемого объекта, чтобы его расчетная реакция (некоторая функция времени $U(\tau)$) оказалась по возможности близкой (в функциональном пространстве — пространстве функций, удовлетворяющих некоторым условиям гладкости) к измеренной реакции $U_0(\tau)$. Эту близость можно измерять с помощью разных метрик, мы же воспользуемся среднеквадратичной (1) по причине ее простоты:

$$\Phi[U] = \int_0^T (U_0(\tau) - U(\tau))^2 d\tau, \quad (1)$$

Доказано [4] существование и единственность решения обратных задач (возможно, в ограниченной области пространства параметров), т.е. обеспечено наличие экстремума (1).

В функционале (1) выделим зависимость от параметров для реакции $U_0(\tau)$, тем самым превратив его в функцию, минимум которой в пространстве этих параметров необходимо определить. Функционал (4) преобразуется к виду (θ — набор параметров):

$$\Phi(\theta) = \int_0^T (U_0(\tau) - U(\tau, \theta))^2 d\tau. \quad (2)$$

Для решения обратных задач будем использовать метод движения по градиенту:

$$\frac{d\theta_i}{dt} = -\frac{\partial \Phi(\theta)}{\partial \theta_i}, \quad (3)$$

где: набор координат θ — совокупность параметров (теплофизических характеристик); τ — некоторый параметр, играющий роль времени. Для практического использования (3) необходимо численно определять все производные (как частные, так и полные), поскольку (3) фактически задает итерационную процедуру поиска минимума.

Система по принятой в теории колебаний классификации является автономной диссипативной динамической системой, заданной потоком. Если решение (1) существует, то система (3) обязана обладать неподвижной «притягивающей» особой точкой. Таким образом, можно разложить правую часть (3) до первого по отклонению члена вблизи неподвижной точки:

$$\frac{d\theta_i}{dt} = -\frac{\partial^2 \Phi(\theta^0)}{\partial \theta_i \partial \theta_j} (\theta_j - \theta_j^0) \quad (4)$$

Выделим из всего множества переменных θ те, явная зависимость от которых известна, и обозначим их через φ , прочие переменные — через Ψ . Таким образом, $\Phi(\theta)$ перейдет в $\Phi(\varphi, \Psi)$. Частные производные $\Phi(\varphi, \Psi)$ по переменным φ нетрудно посчитать аналитически, потребовав (в силу поиска экстремума) их обнуления. Для динамической системы (3) это соответствует выражению:

$$\frac{d\varphi_i}{dt} = -\frac{\partial \Phi(\varphi, \Psi)}{\partial \varphi_i} = 0. \quad (5)$$

Тем самым эффективно понижена размерность исходной системы на то количество переменных, аналитическая зависимость от которых нам теперь известна. На языке вариационного исчисления это означает, что при переходе от (3) к (5) на исходную систему наложен ряд связей, которые формально обеспечили бесконечно быстрое движение по направлениям, задаваемым бесконечно малыми приращениями параметров, зависимость от которых известна (аналогично известному классу задач теоретической механики о свободном движении, стесненном голономными связями).

Как известно, постановка прямой задачи теплопроводности основывается на законе сохранения энергии, записанном в виде уравнения непрерывности:

$$\frac{\partial Q(r, t)}{\partial t} + \text{div} J(r, t) = 0, \quad (6)$$

где: $Q(r, t)$ и $J(r, t)$ — соответственно объемная плотность тепловой энергии и плотность теплового потока, определяемые:

$$Q(r, t) = \rho(r) \cdot C_p(r) \cdot T(r, t) \quad (7)$$

$$J(r, t) = -\lambda(r) \frac{\partial T(r, t)}{\partial r},$$

здесь: $T(r, t)$ — температура; $\rho(r)$ — плотность среды; $C_p(r)$ — ее удельная теплоемкость; $\lambda(r)$ — теплопроводность. Три последние величины и относятся к теплофизическим характеристикам (локальным), на практике же в основном определяют теплопроводность. Часто эти характеристики являются кусочно-постоянными функциями координат.

Таким образом, решая прямое уравнение теплопроводности (6), подставляя решение в (2) и подбирая параметры в соответствии с вышеизложенным, определяются параметры, реализующие экстремум (1). Для упрощения математического описания без сокращения общности результатов примем, что дефект описывается одним параметром λ . Для этого случая показано, что задача тепловой дефектометрии приводится к виду:

$$\Phi[T_n(\lambda, \alpha_0, t)] = \int_0^T (T_n(\lambda, \alpha_0, \tau) - T_n(\tau))^2 d\tau. \quad (8)$$

При возможности аналитического решения задачи определения $T_n(\lambda, \alpha_0, t)$ (прямой задачи теплопроводности) функционал (8) превращается в функцию относительно теплофизических параметров (2). Искомые характеристики определяются нахождением глобального минимума.

Проведя несложные математические преобразования, можно записать:

$$\Phi[T_n(t)] = \Phi(\alpha_0, \lambda) = \frac{1}{\alpha_0^2} \int_0^T J_n^2(\lambda, \tau) d\tau + \frac{2}{\alpha_0} \int_0^T J_n(\lambda, \tau) (T_n(\tau) - T_n(\tau)) d\tau + \int_0^T (T_n(\tau) - T_n(\tau))^2 d\tau. \quad (9)$$

Экстремум (9) по искомой переменной (фактически этот экстремум условный) определяется путем приравнивая частной производной по соответствующему аргументу нулю с учетом (5). Например, по переменной α_0 :

$$\alpha_0(\lambda) = -\frac{\int_0^T J_n^2(\lambda, \tau) d\tau}{\int_0^T J_n(\lambda, \tau) (T_n(\tau) - T_n(\tau)) d\tau} \quad (10)$$

Таким образом, задача свелась к нахождению минимума функции $\Phi(\lambda, \alpha_0(\lambda))$. Минимум этой функции (уже безусловный) определяется простым перебором: решая прямую задачу теплопроводности для достаточно большого набора λ , выделяют глобальный минимум.

Таким образом, описанный выше алгоритм позволяет определять численные значения областей внутренних нарушений сплошности на основе решения обратной задачи ТК.

Оценка достоверности результатов теплового неразрушающего контроля

Принципиально важная задача при серийном обследовании большого количества различных по конструкции объектов в реальных условиях их эксплуатации — оперативная оценка достоверности контроля. Обычно для ее решения проводят лабораторные исследования с использованием специальных камер. Например, фрагмент исследуемого образца устанавливается на границе холодного и теплого отсеков термокамеры, и создаются необходимые, заранее определенные температурные режимы. Далее оценивается достоверность результатов. При всех очевидных преимуществах этот подход обладает существенными недостатками (низкими производительностью, достоверностью и т.п.), не позволяющими широко использовать его на практике.

Выполним решение данной задачи путем аналитического (в частности, статистического) рассмотрения погрешностей при использовании экспериментальных данных.

Исследования проводились на примере одного из параметров, описывающих интегральную (по толщине) характеристику теплозащиты объекта контроля — сопротивление теплопередаче. Сопротивление теплопередаче k -го типа образца в любой точке поверхности рассчитывается в соответствии с разработанным выше методом тепловой дефектотрии. Интегральная характеристика всей конструкции, например, приведенное сопротивление теплопередаче в целом зависит лишь от удельного веса разных участков, и формулу для его определения можно представить в виде:

$$R^{-1} = \sum_{i=1}^n R_i^{-1} w_i, \quad \sum_{i=1}^n w_i = 1, \quad (11)$$

где суммирование идет по типам материалов, w — удельные веса, n — общее число типов материалов. Последнее выражение — условие нормировки.

Однако на практике наблюдаются отклонения (при использовании заявленных значений параметров). Более того, как показывает опыт, сопротивление теплопередаче Rk становится функцией положения на образце. Это происходит вследствие изменений технологии производства, разных режимов эксплуатации и т.п. В то же время на процесс измерения влияет множество факторов, регулярный учет которых практически невозможен (например, порывы ветра, изменение влажности и т.п.). Таким образом, причины отличия проектного значения приведенного сопротивления от реального (где необходимо ввести соответствующие поправки) и возникновения погрешностей при измерении носят слабо контролируемый и труднообозримый характер.

В силу этого предположим, что обе процедуры: измерения сопротивлений и заявления их проектных значений имеют случайные характеристики. Поэтому оправданной является вероятностная интерпретация обеих указанных процедур. Рассмотрим следующую вероятностную модель. Пусть случайная величина ξ — измеренное значение сопротивления теп-

лопередаче (11), η — та же величина, заявленная проектной организацией. Отметим, что эти величины можно считать состоящими из двух компонент: $R\sigma$ — истинное значение сопротивления и флуктуационные компоненты (т.е. собственно те добавки, которые обеспечивают случайность). Выделение флуктуационных компонент (считающихся независимыми от истинного сопротивления $R\sigma$) вызвано необходимостью учета статистики ошибок вне зависимости от особенностей конкретного объекта.

Таким образом, примем, что статистика ошибок не зависит от объекта, то есть их наличие — свойство именно методики измерения и проектирования. Будем считать, что функция распределения (плотность вероятности) результатов измерения равна $P(\xi)$, плотность же вероятности для значения приведенного сопротивления, заявляемого проектной организацией, обозначим через $Q(\eta)$. Плотность вероятности получения при измерении результата ξ и для проектной организации заявления приведенного сопротивления η выражается через плотность совместной вероятности $W(\xi, \eta)$ (теорема умножения вероятностей):

$$W(\xi, \eta) = W(\xi|\eta)Q(\eta), \quad (12)$$

где введена плотность условной вероятности $W(\xi|\eta)$. Легко видеть, что связь между $P(\xi)$ и $W(\xi, \eta)$ (в силу (12) и $Q(\eta)$) следующая:

$$P(\xi) = \int W(\xi, \eta) d\eta = \int W(\xi|\eta)Q(\eta) d\eta, \quad (13)$$

здесь интегрирование ведется по допустимым значениям соответствующих аргументов. Случайные величины ξ и η не независимы, это будет показано ниже. Функции распределения (12) и (13) нормированы на единицу.

Построим гистограмму отстроек измеренных сопротивлений от заявленных, то есть $\eta - \xi$, тем самым исключается трудность в отношении различий истинных сопротивлений $R\sigma$ для разных объектов — они сократятся при вычитании (рис. 1).

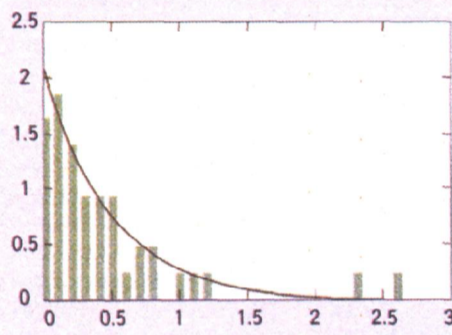


Рис. 1. Отстройка сопротивления $\eta - \xi$, Град. м.кв. с./Дж

Гистограмма на рис. 1 приближает вид плотности условной вероятности $W(\xi|\eta)$. Предполагая, что флуктуации не зависят от истинного значения $R\sigma$, объявляется, что не существует выделенных значений сопротивлений, и условная вероятность может зависеть лишь от разности $(\eta - \xi)$. С другой стороны, это требование (независимости характера флуктуаций от объекта) фактически означает, что результат усреднения по ансамб-

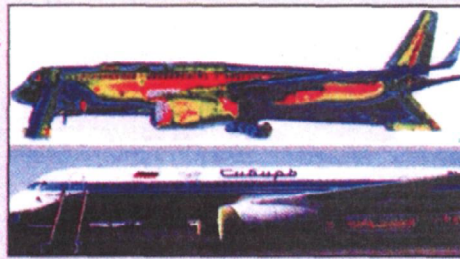


Рис. 2. Оперативная комплексная диагностика самолета после приземления

лю объектов не отличается от усреднения по многократным проведенным измерениям на одном объекте. Тем самым по анализу данных о ряде объектов можно судить о методике измерения в целом. Далее, сама процедура измерений обеспечивает получение именно $W(\xi|\eta)$, так как до проведения теплового контроля имеется информация о сопротивлении, заявленном в проекте на контролируемый объект, то есть о η .

Аппроксимируем эту гистограмму экспоненциальным распределением:

$$W(\xi|\eta) = \frac{1}{u} \exp\left(-\frac{\eta - \xi}{u}\right) \Theta(\eta - \xi), \quad (14)$$

где: u — характерный масштаб спада (декремент); $\Theta(x)$ — ступенчатая функция Хевисайда (1 при $x > 0$ и 0 при прочих значениях аргумента).

Предположим, что функция распределения $Q(\eta)$ аналогична по виду $W(\xi|\eta)$. Таким образом, $Q(\eta)$ запишется в виде:

$$Q(\eta) = \frac{1}{v} \exp\left(-\frac{\eta - R}{v}\right) \Theta(\eta - R), \quad (15)$$

где: v — характерный масштаб спада.

Пусть вероятность значения сопротивления, лежащего в сегменте $[R\sigma - R\sigma, R\sigma + R\sigma]$, равна ϵ , где σ — допустимое относительное отклонение. Тогда, интегрируя (15) по указанному сегменту, можно в явном виде получить v :

$$v = -\frac{\delta R}{\ln(1 - \epsilon)} \quad (16)$$

Таким образом, вычисляя интеграл (13) с учетом (14) и (15), нетрудно получить явный вид функции распределения для результатов измерения $P(\xi)$:

$$P(\xi) = \begin{cases} \frac{\exp\left(-\frac{R - \xi}{v}\right)}{u + v}, & \xi > R \\ \frac{\exp\left(-\frac{\xi - R}{u}\right)}{u + v}, & \xi \leq R. \end{cases} \quad (17)$$

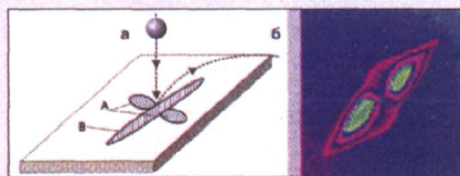


Рис. 3. Ударное повреждение в углепластиковом композите: а — схема образования ударного повреждения; б — термограмма обратной поверхности изделия после предварительной математической обработки

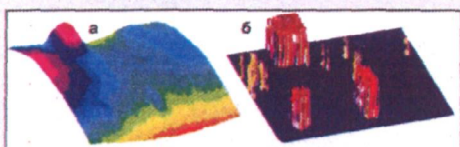


Рис. 4. Фторопластовые вставки в углепластиковом композите: а – исходная термограмма в оптимальный момент времени; б – тепловая томограмма слоя 1,1-1,5 мм (три дефекта на глубине 1,3 мм)

Далее получим средние значения и дисперсии плотностей вероятностей (17) и (16). Для заявленных проектных значений сопротивлений для среднего и значений дисперсии соответственно из (15) имеем:

$$\langle \eta \rangle = R + \nu \quad \sigma^2(\eta) = \nu^2. \quad (18)$$

Для значений сопротивлений, полученных в результате измерений, среднее и дисперсия из (17) запишется в виде:

$$\langle \xi \rangle = R + \nu - u \quad \sigma^2(\xi) = u^2 + \nu^2. \quad (19)$$

Выражения (18) и (19) позволяют оценить достоверность методики ТНК конструкций с помощью подсчета относительной погрешности:

$$E = \frac{|\nu - u|}{R}. \quad (20)$$

Таким образом, предложенный метод позволяет оперативно оценивать достоверность результатов теплового неразрушающего контроля элементов авиационной техники в реальных условиях их эксплуатации. Метод тепловой дефектометрии позволил значительно расширить область применения теплового неразрушающего контроля конструкций различных отраслей промышленности. В качестве примера ниже приведены результаты теплового неразрушающего контроля некоторых типовых объектов авиакосмической техники.

В последнее время в авиационной промышленности все большее применение находят композиционные углепластиковые материалы. С помощью тепловой дефектометрии определяют такие потенциально опасные для эксплуатации дефекты, как скрытые ударные повреждения, внутренние расслоения, однородности степени отверждения и других дефекты. На рис. 3 в качестве примера приведены результаты теплового контроля фрагмента поверхности из углепластика после предварительной компьютерной обработки.

Время контроля – не более 1 мин. Площадь одновременно обследуемой поверхности определяется технологией контроля и доступом к объекту контроля. Проведенный контроль позволяет оперативно определить местополо-

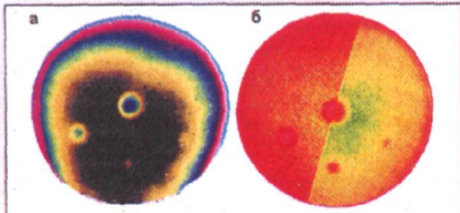


Рис. 5. Расслоения под теплозащитным покрытием турбинной лопатки: а – исходная термограмма; б – термограмма после специальной обработки

жение нарушения внутренней сплошности и ее характеристики.

Другой пример применения тепловой дефектометрии – обнаружение внутренних дефектов типа расслоений в многослойной конструкции путем специальной компьютерной обработки термограмм – приведен на рис. 4. Здесь дефекты в реальной конструкции имитировались фторопластовыми вставками.

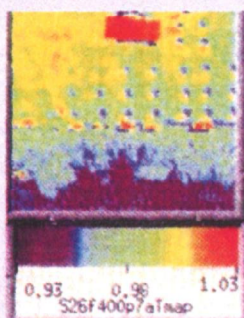


Рис. 6. Коррозия самолетных алюминиевых панелей: термограмма в оптимальный момент времени

Исходная термограмма стандартного образца, содержащего фторопластовые вставки на глубинах 1,3-4 мм, показана на рис. 4а. Только самый большой дефект, расположенный на глубине 1,3 мм, виден на этом изображении на фоне технологических и случайных шумов и помех. Специальная математическая обработка позволила выполнить динамическую тепловую дефектометрию, в результате чего обнаружены и определены характеристики всех искусственных дефектов (рис. 4б).

На рис. 5 приведены термограммы до и после математической обработки турбинной лопатки. Объект контроля содержал 4 дефекта под пок-

рытиями различной толщины (130 и 250 мкм). Специальная математическая обработка тепловой дефектометрии позволяет улучшить выявляемость расслоений толщиной 10-30 мкм и оценить разнотолщинность покрытия.



Рис. 7. Оперативное обнаружение и распознавание области воды в сотовых конструкциях самолетов: а – процедура пассивной тепловой дефектометрии; б – зоны скопления воды в панели воздухозаборника двигателя самолета и в сотовых панелях, изготовленных из стеклопластика и дюралюминия

рывается. После обработки выявлены зоны скрытой коррозии, показанные желтым цветом.

Накапливание воды в сотовых конструкциях вследствие конденсации и прямого попадания является серьезным эксплуатационным дефектом, контроль которого предусмотрен нормативными документами. Пассивная тепловая дефектометрия самолета проиллюстрирована рис. 7а. Термограмма (после предварительной обработки) конструкции с водой (зоны темно-синего цвета) приведена на рис. 7б. Такой способ целесообразен при контроле панелей, выполненных из композитов.

Накапливание воды в сотовых конструкциях вследствие конденсации и прямого попадания является серьезным эксплуатационным дефектом, контроль которого предусмотрен нормативными документами. Пассивная тепловая дефектометрия самолета проиллюстрирована рис. 7а. Термограмма (после предварительной обработки) конструкции с водой (зоны темно-синего цвета) приведена на рис. 7б. Такой способ целесообразен при контроле панелей, выполненных из композитов.

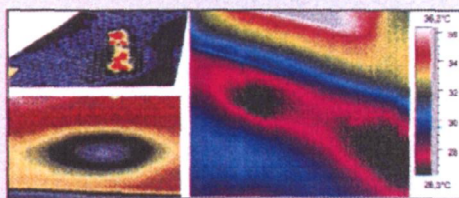


Рис. 8. Обнаружение воды в сотовых конструкциях самолетов

При необходимости контроля алюминиевых сот целесообразно применять активный способ. На рис. 8 показана алюминиевая панель самолета (соединение двух листов внахлест) с обнаруженными двумя областями с водой массой около 10 г (зоны черного цвета).

Выводы

Разработанный метод тепловой дефектометрии материалов и конструкций обеспечивает высокопроизводительное и достоверное определение характеристик внутренних дефектов в реальных условиях эксплуатации по анализу температурных полей, с использованием тепловизионного способа их регистрации. Метод основан на решении обратной задачи нестационарной теплопередачи в многослойной трехмерной области на основе обработки полного «функционала правдоподобия» посредством выделения явной зависимости от части параметров, что на языке вариационного исчисления означает наложение связей. Метод оценки достоверности результатов ТНК основан на статистической обработке результатов контроля.

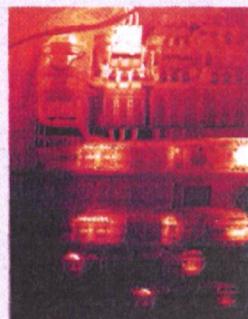


Рис. 9. Оперативная тепловая дефектометрия с оценкой остаточного ресурса электрооборудования самолетов в режиме его эксплуатации

Литература:

1. Будадин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И. и др. Тепловой неразрушающий контроль изделий. – М., Наука, 2002, 476С.
2. Будадин О.Н., Рапопорт Д.А. Метод тепловой дефектометрии. – Дефектоскопия, 1984. №10.
3. Вавилов В.П. Информативность тепловых полей в задачах активного контроля качества. – Дефектоскопия, 1987, №3, С.67-77.
4. Лебедев О.В. Будадин О.Н. Абрамова Е.В. Разработка и исследование обратной задачи теплового неразрушающего контроля. – 3-я Международная конференция «Компьютерные методы и обратные задачи в неразрушающем контроле и диагностике», М., 2002.
5. Будадин О.Н., Куш Д.В., Рапопорт Д.А. Обратная задача автоматизированного теплового контроля. – Дефектоскопия № 5, 1988, С.64-68.
6. Казаров Ю.К., Будадин О.Н., Троицкий-Марков Т.Е., Лебедев О.В. Измерения в электромагнитных полях. – М.: ВИНТИ РАН, 2003, С. 196
7. Budadin O., Lebedev O. Solution of inverse problem of nonstationary heat conductivity equation. – 16th World Conference on Nondestructive Testing, Montreal Canada. August 30-September 3 2004.
8. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002.