

*В.А. СТОРОЖЕНКО, д-р техн. наук, С.Н. МЕШКОВ,  
В.А. МАСЛОВА*

## **ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

Известно, что к качеству изготовления узлов и изделий аэрокосмической техники предъявляются повышенные требования, в связи с чем испытаниям и контролю подобной продукции уделяется особое внимание.

Одной из наиболее сложных проблем, возникающих при этом, является обнаружение локальных дефектов, для которого требуется поэлементный просмотр всей поверхности конструкций, нередко больших размеров. Для ускорения такого процесса используются электронные средства, реализующие какой-либо метод неразрушающего контроля [1]. Выбор метода, оптимального для объекта данного типа, зависит как от параметров последнего, так и от вида характерных для него дефектов.

Рассмотрим метод активного теплового контроля (АТК), заключающийся в обнаружении скрытых дефектов по аномалиям температурных полей, возникающих на поверхности контролируемого объекта вследствие его функционирования или внешнего теплового воздействия [2]. Применение АТК предпочтительно для объектов, дефекты которых имеют локализованные аномалии прежде всего теплофизических характеристик (плотности, тепло- и температуропроводности). Зарубежный опыт свидетельствует о том, что к таким объектам относятся, например, многослойные композиционные структуры, теплозащитные покрытия, паяные соединения, для которых характерны расслоения, непроклеи, непропаи и другие дефекты типа нарушения сплошности [3].

### **Цель и методы исследований**

Данные исследования посвящены разработке средств и методов АТК, позволяющих решать задачи, характерные прежде всего для космической техники:

- осуществлять контроль теплозащитных пленочных покрытий;
- выполнять анализ температурных режимов во внутренних полостях двигателей при их предварительных обследованиях;
- выявлять дефекты сотовых структур.

Подход, использовавшийся для решения перечисленных задач, основывался на следующих предпосылках и положениях.

Наилучшие результаты (высокую выявляемость указанных дефектов) АТК дает при использовании нестационарного режима, для которого характерно наличие оптимального для данного изделия временного режима, задаваемого двумя параметрами – продолжительностью внешнего теплового воздействия (нагрева)  $\tau_n$  и временем запаздывания (временем между окончанием нагрева и моментом измерения температурного поля)  $\tau_z$  [2; 3]. Кроме того, режим АТК характеризуется оптимальным значением мощности теплового воздействия  $q$ , определяемым максимально допустимой для данного объекта температурой нагрева  $T_{\text{доп}}$  и упомянутым выше  $\tau_n$ .

Таким образом, первый этап решения производственной задачи АТК – отыскание оптимальной для данного изделия методики контроля, задаваемой значениями  $\tau_n$ ,  $\tau_z$ ,  $q$ .

Аппаратурная реализация выбранной методики может осуществляться как путем применения серийных средств регистрации тепловых полей (тепловизоров, радиометров) [4; 5], так и путем создания специализированных приборов (тепловых дефектоскопов, радиометров) [2]. Выбор варианта зависит от характеристик контролируемого объекта, производственных требований и других факторов. Во многих случаях второй вариант предпочтителен, поскольку обеспечивает максимальное приближение к оптимальному режиму АТК.

### Контроль теплозащитных покрытий

Данный объект АТК представляет собой тонкий (толщиной в несколько десятых миллиметра) слой из нетеплопроводящего материала, нанесенный на массивную теплопроводящую подложку, например методом напыления (рис. 1). Целью контроля является обнаружение локальных отклонений термического сопротивления  $R$  от номинального значения.

Поскольку  $R = h / \lambda$ , отклонения могут быть вызваны двумя причинами (дефектами): неравномерностью толщины покрытия  $h$  и отклонениями теплопроводности материала покрытия  $\lambda$  (например, вследствие пористости или крупнозернистости структуры).

Определение оптимального режима контроля проводилось расчетным путем на основе решения задачи нестационарной теплопроводности для специально разработанной теплофизической модели [6]. В качестве критерия оптимизации использовалось условие максимума отношения  $(\Delta T/T)/(\Delta R/R)$ , где  $\Delta T/T$  – поверхностный температурный контраст, вызванный отклонением  $R$  от номинала. Оказалось, что для

$\tau_n$  существует два оптимума: один – для выявления аномалии  $\Delta h/h$ ; второй – для "дефекта", вызванного  $\Delta\lambda/\lambda$  (рис.1, б). Для разрешения проблемы предложен компромисс – проводить АТК при среднеоптимальном времени запаздывания  $\bar{\tau}_3$ . Вместе с тем обнаруженное обстоятельство имеет и положительную сторону – появляется возможность проведения раздельного контроля отклонений по  $h$  и по  $\lambda$  путем выбора соответствующего  $\tau_3$ .

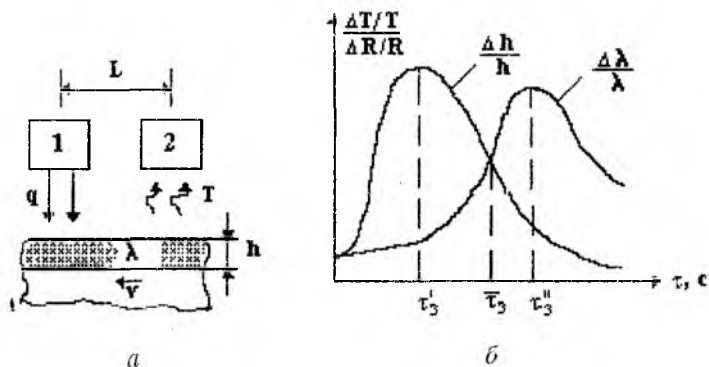


Рис. 1

Аппаратурная реализация разработанной методики АТК основывалась на следующих соображениях:

- элемент разложения регистрируемого температурного поля должен быть достаточно мал (соизмерим с толщиной покрытия), чтобы регистрировать локальные отклонения  $R$ ;
- мощность нагрева  $q$  должна быть достаточна для нагрева поверхности до высокой температуры ( $T_{\text{доп}}$  порядка нескольких сотен градусов) за оптимальное время  $\tau_n$ .

В силу указанных причин в качестве бесконтактного измерителя температуры был применен специально разработанный радиометр РАД-1 [7] с линейным разрешением 0,5 мм, а в качестве нагревателя – мощный лазер на  $\text{CO}_2$  с пятном нагрева  $l = 5$  мм. Оптимальный режим обеспечивался выбором скорости сканирования из условия  $V=l/\tau_n$ , где  $L$  – расстояние между пятном нагрева от лазера 1 и полем зрения радиометра 2 (см. рис. 1, а).

В результате испытаний установлено, что разработанные методики и аппаратура АТК позволяют обнаруживать отклонения термического сопротивления от номинала  $\pm 1,5\%$  на участках с площадью  $0,25 \text{ мм}^2$  и более с производительностью  $0,1 \text{ м}^2/\text{ч}$  при сплошном контроле.

### Приборы для регистрации температурных полей внутренних полостей ракетных двигателей

Особенностью данной задачи является затрудненность доступа к поверхности, температурное поле которой необходимо регистрировать путем бесконтактных измерений. В то же время задача актуальна, поскольку связана с такими прикладными аспектами, как, например, контроль методом АТК проходимости топливных каналов.

Для преодоления отмеченных затруднений потребовались нетрадиционные конструктивные решения для построения прибора, регистрирующего температурное поле (радиометра), а именно сведение его габаритных размеров к минимуму, обеспечивающему размещение и перемещение во внутренней полости двигателя.

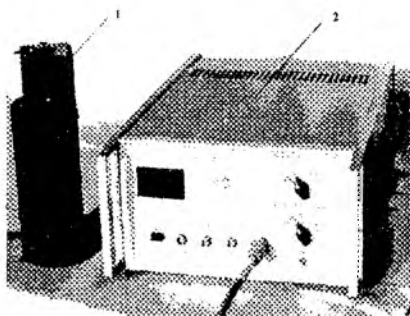


Рис. 2

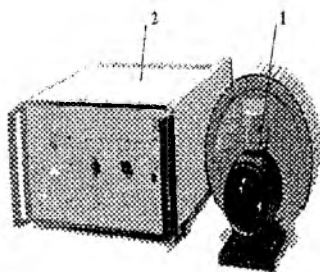


Рис. 3

Созданный на этой основе прибор — радиометр ИИ-30А (рис. 2) состоит из малогабаритной оптической приемной головки 1, преобразующей измеряемую температуру в электрический сигнал, и соединенного с ней кабелем электронного блока 2 обработки сигнала.

По аналогичной схеме выполнен радиометр ИИ-40А (рис. 3), являющийся следующей модификацией приборов этого ряда. Его осо-

бенность состоит в том, что выносная оптическая головка 1 в ущерб требованию малогабаритности оснащена средствами защиты от мощных тепловых и электромагнитных полей, что позволяет использовать его при проведении АТК в сочетании с такими нагревателями, как мощный ВЧ-индуктор, и при повышенной (сильно меняющейся) температуре окружающей среды. Прибор включает также электронный блок 2 обработки информации.

Основные технические характеристики радиометров приведены в таблице.

Параметры	ИИ-30А	ИИ-40А
Диапазон измеряемых температур, °С	30...200	35...200
Температурная чувствительность, °С	0,4	0,5
Расстояние до объекта контроля, мм	30...150	30...150
Мгновенное поле зрения, мм	0,5	1,5
Быстродействие, с	0,02	0,02
Габаритные размеры, мм: оптической головки электронного блока	100 x 260 320x170x480	195 x 120 480x170x480
Масса, кг: оптической головки электронного блока	3,2 12	5,5 8,2

### Обнаружение дефектов сотовых структур

По зарубежным данным, сотовые структуры являются именно тем объектом, для дефектоскопии которого метод АТК наиболее эффективен. Это обусловлено особенностью их конструкции, практически исключаяющей поперечное растекание теплоты и тем самым обеспечивающей максимальный температурный контраст  $\Delta T/T$ , вызванный дефектом. В качестве характерных дефектов рассматриваются непроклеи и конденсация влаги в сотах.

Нами проведены экспериментальные исследования сотовой структуры для оценки эффективности применения АТК при обнаружении отслоений (непроклеев). Дефект моделировался искусственным локальным повреждением соединения наружного слоя с сотами.

Контроль проводился двухсторонним методом АТК [2], причем контролируемой являлась поверхность 2, под которой располагался дефект 3 (рис. 4, а). В качестве источника теплового возбуждения использовалась обычная электролампочка, вследствие чего пятно нагре-

ва 4 имело круглую форму (рис. 4, б). Регистрирующим прибором служил серийный тепловизор "Радуга-5" с нагреваемой внешней поверхностью 1.

Оптимальный режим контроля, найденный экспериментальным путем, соответствовал следующим данным:  $q = 106 \text{ Вт/м}^2$ ;  $\tau_n = 1 \text{ мин}$ ;  $\tau_3 = 1,5 \text{ мин}$ .

Полученные тепловые карты, одна из которых представлена на рис. 4, б, свидетельствуют о четком выявлении дефекта, даже на фоне отмеченной выше неравномерности нагрева. Более того, просматривается тепловое изображение самих сот, что свидетельствует о значительных потенциальных возможностях метода АТК.

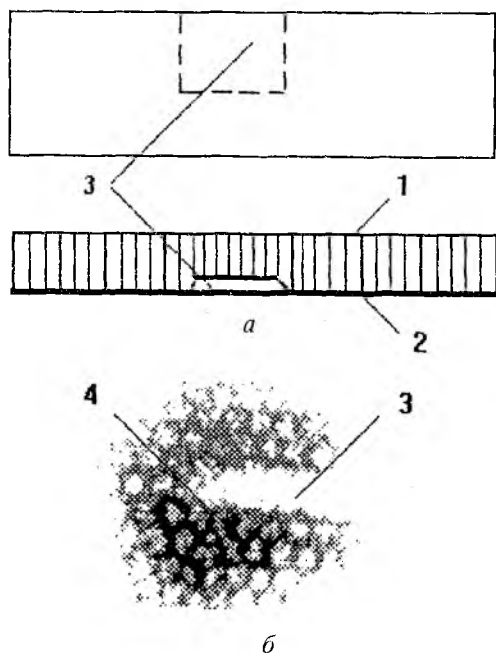


Рис. 4

## Выводы

Применение метода АТК для контроля качества рассмотренных изделий космической техники весьма перспективно, поскольку достигаются выявление характерных для них дефектов и выполнение соответствующих технических требований (высокое разрешение, быстродействие и т.д.). Учитывая более высокую, чем у некоторых других методов, себестоимость проведения (вследствие высокой стоимости аппаратуры), применение АТК целесообразно при контроле особо ответственных узлов и изделий.

Чтобы осуществить промышленное освоение разработанных методик, использовавшиеся для их создания средства контроля необходимо доработать или доукомплектовать.

**Список литературы:** 1. *Клюев В.В.* Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справ. М.: Машиностроение, 1986. 488 с. 2. *Стороженко В.А., Вавилов В.П., Волчек А.Д.* Неразрушающий контроль качества промышленной продукции активным тепловым методом. К.: Техника, 1988. 127 с. 3. *Стороженко В.А.* Тепловой неразрушающий контроль – накопленный опыт и перспективы развития // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. 1996. № 4. С. 4 – 15. 4. *Вавилов В.П.* Тепловые методы неразрушающего контроля. М.: Машиностроение, 1991. 245 с. 5. *Госсорг Ж.* Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: Пер. с фр. М.: Мир, 1988. 416 с. 6. *Стороженко В.А., Мельник С.И.* Контроль качества теплозащитных пленочных покрытий активным тепловым методом // "Оптические, радиоволновые и тепловые методы неразрушающего контроля": Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. Могилев, 1989. С. 174 – 175. 7. *Стороженко В.А.* Радиометр "РАД-1" для тепловой диагностики энергоустановок // Дефектоскопия. 1991. № 9. С. 93 – 94.

*Поступила в редколлегию 24.03.97*