

10. Данные, полученные на этапах проектирования, стрессового тестирования и упреждающей диагностики сети, могут с успехом быть использованы при создании модели сети.

11. Высокий уровень утилизации канала не всегда является причиной проблем в сети.

12. При поиске причин появления ошибок в сети прежде всего следует проверить корректность заземления аппаратуры и качество напряжения.

13. Передаваемые данные могут искажаться на верхних протокольных уровнях, без сообщения об ошибках на канальном уровне (протоколы IP, IPX).

Литература: 1. *Стернс Том*. Учимся моделировать. Сети, 1998. №5. С.35-39. 2. *Baldi M., Corno F., Rebaudengo M., Prinetto P., Sonza Reorda M., Squillero G.* Simulation-Based Verification of Network Protocols Performance CHARME'97: Advanced Research Working Conference on Correct Hardware Design and Verification Methods. Montreal, Quebec, Canada, October 1997. P.156-159. 3. *Baldi M., Corno F., Rebaudengo M., Squillero G.* GA-based Performance Analysis of Network Protocols ICTAI'97: 9th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence, Newport Beach, CA (USA), November, 1997. P.186-189. 4. *Юдицкий С., Подлазов В., Борисенко В.* Искусство диагностики локальных сетей: LAN. Журнал сетевых решений. 1998. № 07. Открытые системы. С.156-159. 5. *Олифер Н., Олифер В.* Базовые технологии локальных сетей. Центр Информационных

Технологий. С.18-24. 6. *Барнс Дж.* Электронное конструирование: Методы борьбы с помехами: Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 234с. 7. *Юдицкий С., Борисенко В., Овчинников С.* Основы диагностики сети: LAN. Журнал сетевых решений. 1998, №12. С.56-59. 8. *Нессер Д. Дж.* Оптимизация и поиск неисправностей в сетях. К.: Диалектика, 1996. 646с.

Поступила в редколлегию 12.10.99

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Кривуля Г.Ф.

Хаханов Владимир Иванович, д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизации проектирования вычислительной техники ХТУРЭ. Научные интересы: техническая диагностика вычислительных устройств, систем, сетей и программных продуктов. Увлечения: баскетбол, футбол, горные лыжи. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-93-26.

Ханько Вадим Викторович, аспирант кафедры автоматизации проектирования вычислительной техники ХТУРЭ. Научные интересы: техническая диагностика компьютерных систем и сетей. Увлечения: иностранные языки. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-93-26.

Абу Занунех Халиль И.М., аспирант кафедры автоматизации проектирования вычислительной техники ХТУРЭ. Научные интересы: техническая диагностика вычислительных устройств и сетей. Хобби: шахматы, футбол, теннис. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-93-26.

УДК 620.179.13

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ АЛГОРИТМА ТОМОГРАФИИ В ТЕПЛОВЫХ МЕТОДАХ КОНТРОЛЯ

МЕЛЬНИК С.И., ОРЕЛ Р.П.

Рассматриваются особенности построения алгоритма томографии в тепловых методах контроля. Проводится анализ существующих методов тепловой томографии. Указываются причины, не позволяющие осуществлять тепловую томографию в полной мере. Предлагается комплекс алгоритмов теплового контроля, позволяющих реализовать выявленные закономерности.

1. Введение

Не разрушающий контроль (НК) качества промышленной продукции является неотъемлемой частью современного производственного процесса. В настоящее время томография промышленных изделий как метод НК широко применяется в промышленной диагностике и контроле. Существуют гостированные методы проведения томографии, например, рентгеновский и ультразвуковой. Однако первый из них связан с опасностью для персонала, а второй применяется только в узком диапазоне промышленных изделий и требует в каждом случае разработки специального оборудования.

В отличие от указанных методов тепловой обладает рядом неоспоримых преимуществ: простота, безопасность, быстрдействие, универсальность. Стремление расширить сферу применимости тепловых методов повлекло за собой создание во всем мире нового

поколения тепловизионных компьютерных комплексов, технические возможности которых позволяют решать практически любые задачи фильтрации и обработки наблюдаемого теплового отклика.

К числу наиболее эффективных следует отнести алгоритмы динамической [1] и адаптивной [2] тепловой томографии (ТТ). Однако эти методы обладают рядом недостатков, не позволяющих их широко использовать. Во-первых, применяется одномерная модель, которая не учитывает растекание тепла в направлениях, параллельных поверхности объекта контроля (ОК). Это приводит к возникновению артефактов при анализе термограмм. Во-вторых, при послойной расшифровке температурного поля объекта удается восстановить лишь несколько верхних слоев, причем толщина последующего слоя вдвое больше предыдущего. Таким образом, до сих пор не удалось построить технологический процесс промышленной ТТ в полном объеме.

2. Цель исследований

Кардинальное отличие теплового метода контроля от альтернативных (рентгеновский, ультразвуковой и т.д.) заключается в диффузионном характере распространения тепла. Эта особенность является главной причиной затухания тепловых волн (носителя информации) в объекте контроля, что влечет за собой потерю информации о внутренней структуре ОК. Более того, информация о неоднородностях необратимо теряется не только с течением времени, но и по мере удаления от них.

Геометрические особенности ОК (дефекта) характеризуются размером l — его длиной (шириной). Так

как влияние дефекта на тепловой поток можно заменить эквивалентным источником тепла того же размера [3], то тепловой поток от него можно представить в виде суммы гармоник. Пространственные гармоники $\omega_x = 1/l$ практически полностью затухают (экспоненциально) по мере удаления от источника на расстояние порядка $2 \cdot l$ (рис. 1).

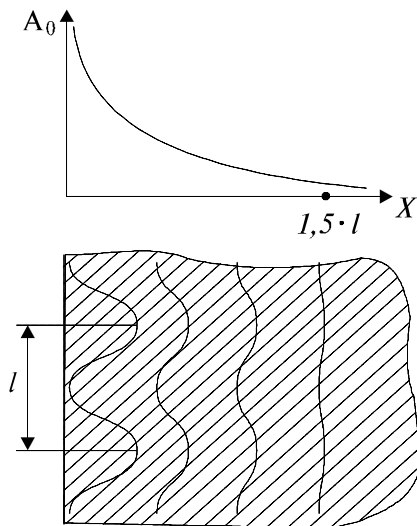


Рис. 1. Затухание пространственных тепловых волн в ОК

В результате этого ТТ не может рассчитывать на точное восстановление геометрических особенностей дефекта. Погрешность измерения температуры определяет предельную чувствительность метода.

Таким образом, необходим алгоритм ТТ, который позволяет выявить дефект и получить о нем максимально возможную информацию. В связи с этим целью настоящих исследований, направленных на дальнейший прогресс в области теплового НК, является определение возможностей и ограничений ТТ, а также предложение комплекса алгоритмов и методик, позволяющих реализовать выявленные закономерности.

3. Методы исследований

Задача теплового контроля (в частности ТТ) состоит в определении характерных геометрических параметров дефекта (рис. 2), таких как его раскрытие d , глубина залегания h , поперечные размеры H_y и H_x , а также теплофизические характеристики (коэффициент теплопроводности λ_0 и температуропроводности a_0) по известному тепловому воздействию $q(x, y, t)$ и измеренному температурному полю $T(x, y, t)$ на поверхности объекта.

Специфической особенностью данной задачи является тот факт, что кроме начальных (температурное поле на поверхности ОК) и граничных условий

$$T(\vec{r}, 0) = 0, \left(\alpha \cdot T - \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial \vec{r}} \right)_{нов} = q(\vec{r}_{нов}, \tau), \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи на поверхности ОК, λ – коэффициент теплопроводности ОК; $q(\vec{r}_{нов}, \tau)$ – тепловой поток, известно также решение прямой задачи теплопроводности на поверхности

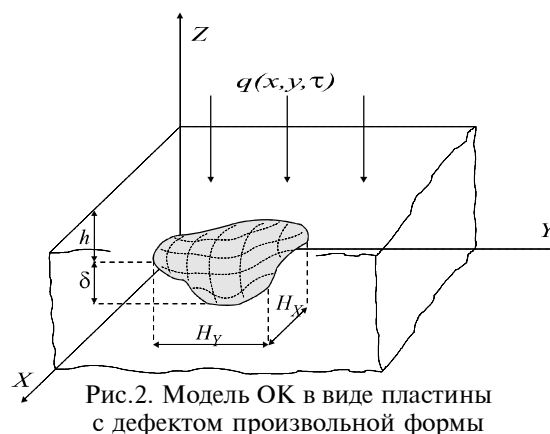


Рис. 2. Модель ОК в виде пластины с дефектом произвольной формы

ОК, а именно, измеренное с некоторой погрешностью распределение $T(\vec{r}_{нов}, \tau)$ и тепловое воздействие $q(\vec{r}_{нов}, \tau)$. Фактически, на поверхности ОК мы знаем $T(\vec{r}_{нов}, \tau)$ и $\frac{T(\vec{r}_{нов}, \tau)}{\partial z}$. Если считать, что в прилежащем к поверхности слое Δz_0 дефектов нет, то для него можно записать

$$a_{00} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \vec{r}^2} = \frac{\partial T}{\partial \vec{r}}, \quad (2)$$

где a_{00} – коэффициент температуропроводности бездефектного ОК. Отсюда следует, что мы можем рассчитать функции $T(\vec{r}, \tau)$ и $\frac{T(\vec{r}, \tau)}{\partial z}$ на второй поверхности рассматриваемого слоя:

$$\left| \begin{array}{c} \tilde{T}_1(\omega_x, \omega_y, \omega) \\ \frac{\partial \tilde{T}_1}{\partial z}(\omega_x, \omega_y, \omega) \end{array} \right| = |P_1| \cdot \left| \begin{array}{c} \tilde{T}_0(\omega_x, \omega_y, \omega) \\ \frac{\partial \tilde{T}_0}{\partial z}(\omega_x, \omega_y, \omega) \end{array} \right|, \quad (3)$$

где символ $\tilde{}$ обозначает результат преобразования Фурье по координатам x, y и времени t , а $|P_1|$ – пространственную тепловую передаточную матрицу слоя. Таким образом, можно связать температуру и тепловой поток на поверхности с таковыми на любой глубине. Эта связь определяется искомыми параметрами ОК (матрица $|P_1|$).

Аналогичный результат можно получить и численным методом с помощью явной или неявной разностной схемы. Отметим, что эта задача [4] также является некорректной, и для получения устойчивого к погрешностям измерений результатов необходимо применять один из известных методов регуляризации.

Предлагаемый алгоритм ТТ опирается на методику послойной расшифровки температурного поля объекта. Двигаясь от слоя к слою, можно восстановить форму имеющегося дефекта. В случае “пропуска” неоднородности в очередном слое рассчитанное послойное распределение $T(\vec{r}, t)$ будет иметь характерные качественные особенности.

Более простой и надежный алгоритм тепловой дефектометрии (ТДМ) разработан на основе метода эквивалентных дефекту тепловых источников. В

качестве иллюстрации приведем алгоритм, позволяющий рассчитать параметры малого дефекта типа инородного включения. Глубина h определяется по ширине сечения температурного отклика $T(x)$ на уровне $0,716 \cdot T_{max}$, а эффективный объем — по формуле

$$V_{эфф} = \frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot \frac{\eta + 2}{\eta - 1} \cdot \frac{T_{max} \cdot h^2}{\left. \frac{\partial T_{\delta\delta}}{\partial z} \right|_{z=h}}, \quad (4)$$

где $\left. \frac{\partial T_{\delta\delta}}{\partial z} \right|_{z=h}$ — температурный градиент в бездефектном объекте на глубине h ; η — относительная теплопроводность дефекта ($\eta = \lambda_{\delta} / \lambda_{\delta\delta}$). Влияние коэффициента теплопередачи a также учтено в разработанном алгоритме. Для этого применяется дополнительный алгоритм адаптации измеренной зависимости $T(x, \tau)$ для $\alpha \neq 0$ к зависимости $T_0(x, \tau)$ для $\alpha = 0$, которая соответствует приведенным выше формулам.

Аналогичная процедура адаптации может быть применена и к объектам с неплоской поверхностью.

Точность теплового метода ограничена шумами. В рамках метода передаточных функций (МПФ) слой пластины над дефектом можно рассматривать как фильтр низких частот в соответствии с выражением для передаточной матрицы этого слоя. Это значит, что на поверхности пластины перепад $\Delta T(x, y, \tau)$, вызванный эквивалентным источником тепла, расположенным на глубине h , имеет достоверное (на фоне шумов) значение только в ограниченном диапазоне частот $\omega_y \leq \omega_{y0}$, $\omega_x \leq \omega_{x0}$, $\omega \leq \omega_0$. В соответствии с теоремой Котельникова такой сигнал может быть задан значениями в дискретных точках, расстояние между которыми можно интерпретировать как линейное разрешение теплового метода по координатам y , z и x [5]. Переход от частот к соответствующим координатам осуществляется с помощью соотношений:

$$\Delta y = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_{y0}}, \quad \Delta x = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_{x0}}, \quad \Delta z = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_0} \cdot 2 \cdot a / h^2. \quad (5)$$

Границы спектра можно оценить, приравняв спектральные плотности амплитуды шума и температурного перепада на поверхности пластины на частотах ω_{y0} , ω_{x0} , ω . Эти условия могут быть записаны следующим образом:

$$\eta(\omega_0) \cdot \frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{pad}} \cdot \frac{\exp(-\xi) \cdot B_i}{\sqrt{(\xi + B_i)^2 + \xi^2}} = 1, \quad (6)$$

$$\eta_1(\omega_{y0}, \omega_{x0}) \cdot \frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{pad}} \cdot \frac{\exp(-\xi_1) \cdot B_i}{\xi_1 + B_i} = 1,$$

где $\xi = h \cdot \sqrt{\omega_0 / 2 \cdot a}$, $\xi_1 = \sqrt{\omega_{y0}^2 + \omega_{x0}^2}$, $\Delta T_{max} / \Delta T_{pad}$ — относительный уровень сигнала над центром дефекта. Функции $\eta(\omega)$ и $\eta(\omega_y, \omega_x)$ имеют максимум при нулевых значениях частот и не превышают 1. Их конкретный вид определяется такими факто-

рами: форма дефекта $\delta(y, x)$, спектральная плотность шума и т.п.

Таким образом, записанные соотношения позволяют оценить влияние на разрешающую способность тепловой дефектометрии таких факторов, как теплофизические параметры пластины, глубина залегания дефекта, а также максимальный уровень сигнала при прочих равных условиях.

4. Результаты исследований

Проведенные исследования позволили получить следующие результаты:

1. Проанализированы возможности применения ТТ к промышленным объектам.
2. Показано, что чувствительность ТТ определяется как характеристиками объекта, так и чувствительностью измерительной аппаратуры; получены аналитические зависимости.
3. Предложены алгоритмы ТТ как в общем случае, так и применительно для локальных дефектов, которые позволяют на практике быстро и надежно определять характерные параметры дефекта в зависимости от точности измеренного сигнала.

5. Выводы

Исследования закономерностей ТТ с использованием предложенных алгоритмов свидетельствуют об эффективности разработанных процедур. В целом разработанный комплекс программ позволяет определить границы применимости ТТ для конкретного ОК, обеспечить решение задачи ТТ в этих границах, а также может использоваться практически во всех отраслях промышленной диагностики и технического контроля.

Поступила в редколлегию 19.10.99

Рецензент: д-р техн. наук Себко В.П.

Литература: 1. *Вавилов В.П., Ахмед Т., Джин Х.Д.* и др. Экспериментальная тепловая томография твердых тел при импульсном одностороннем нагреве // Дефектоскопия, 1990. №12. С.60-66. 2. *Вавилов В.П., Иванов А.И., Малдаг К.* Адаптивная тепловая томография // Дефектоскопия, 1994. №1. С.52-55. 3. *Мельник С.И., Стороженко В.А.* Тепловая дефектометрия малых дефектов на основе метода передаточных функций // ХТУРЭ. Харьков, 1993. 8с. Рус. - Деп. в ГНТБ Украины. 4. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986. 214с. 5. *Balageas D.L.* Le controle non destructif par methodes thermiques // Rev. Gen. Therm., France, №356-357, aout-september 1991. P. 483-498.

Мельник Сергей Иванович, канд. техн. наук, доцент кафедры физики ХТУРЭ. Научные интересы: задачи оптимизации процедуры гипертермии при лечении онкозаболеваний, применение алгоритмической теории сложности к вопросам обоснования статистической теории. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (0572) 40-93-45.

Орел Роман Петрович, аспирант кафедры физики ХТУРЭ. Научные интересы: тепловая дефектометрия, томография. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (0572) 40-93-45.