

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОБНАРУЖЕНИЮ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН РАЗЛИЧНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ОБРАЗЦАХ ИЗ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ С ПОМОЩЬЮ ИНДУКЦИОННОЙ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ
(EXPERIMENTAL RESEARCHES OF THE DETECTION CRACK'S SURFACE IN SAMPLES OF ELECTRICAL CONDUCTING MATERIALS USED IN THE AEROSPACE INDUSTRY WITH AN INDUCTION OF INFRARED THERMOGRAPHY)

Д.А. Калашников
D. Kalashnikov

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: kalashnikoffdmitry@yandex.ru

В данной работе рассмотрены результаты экспериментальных исследований по обнаружению поверхностных трещин в стальных контрольных образцах для вихретоковой дефектоскопии. Также представлены результаты контроля в виде термограмм и графиков, показывающих разность температур трещины и бездефектной области. Обработка термограмм производилась с помощью программы ThermoFit Pro, разработанной в Томском политехническом университете. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено наиболее приемлемое положение индуктора относительно направления трещины. В заключении приведены выводы о достоинствах метода по сравнению с вихретоковым и магнитопорошковым контролем.

(At this work are considered results of experimental researches of the detection crack's surface in steel control samples eddy current inspection. Also presented thermal images and graphs of monitoring which are showing the temperature difference between crack and defect-free region. Processing of thermal images made by ThermoFit Pro, developed at the Tomsk Polytechnic University. Justified theoretically and experimentally validated the most reasonable position of the inductor relative to crack's direction. In conclusion presented advantages of this method compare with the eddy current and magnetic particle inspections.)

Ключевые слова:

Тепловой контроль, индукционный нагрев, температурный сигнал, инфракрасная термография, тепловизор, термограмма, индуктор.

(Thermal control, induction heating, temperature signal, infrared thermography, infrared camera, inductor.)

Введение

В авиакосмической промышленности существуют высокие требования к жесткости и прочности конструкций. В частности дефекты, выходящие на поверхность, могут привести к повреждению этих конструкций. Поэтому контроль поверхности объектов имеет особое значение.

В отличие от традиционных методов нагрева (конвективный, оптический), используемых в активном тепловом контроле, индукционный нагрев имеет другую природу, что и позволяет применять его для обнаружения поверхностных трещин в объектах из электропроводящих материалов [1].

Механизмы конвективного (оптического) и индукционного нагрева приведены на рисунках 1 и 2, где Q – тепловой поток от источника нагрева, например, лампы накаливания, а P – обратный тепловой поток от объекта контроля, регистрируемый тепловизором. В первом случае температурный сигнал над дефектом будет положительным, если теплопроводность дефекта ниже теплопроводности бездефектной области (для одностороннего контроля). Но данный метод не чувствителен к трещинам, расположенным перпендикулярно поверхности. В этом случае эффективен индукционный нагрев.

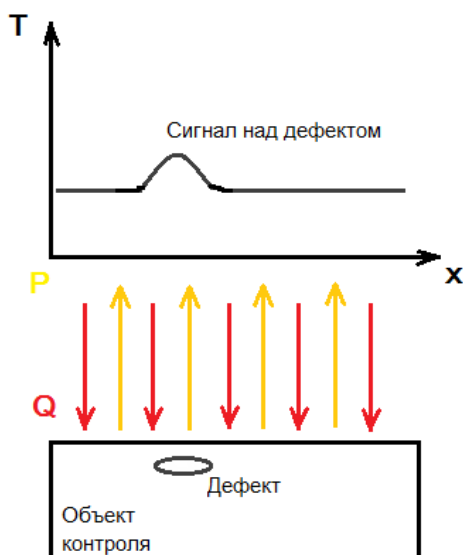


Рис. 1. Механизм активного теплового контроля с использованием оптического нагрева

В случае с индукционным нагревом вихревые токи в электропроводящем объекте, индуцируемые переменным магнитным полем индуктора, разогревают его под действием джоулева тепла, причем, нагревается лишь поверхностный слой, так называемый скин-слой (рис. 2). Толщина скин-слоя определяется формулой:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \mu \lambda}}$$

где δ – толщина скин-слоя, ω – круговая частота переменного тока; μ – магнитная проницаемость материала проводника, μ_0 – магнитная постоянная, λ – удельная электрическая проводимость [2].

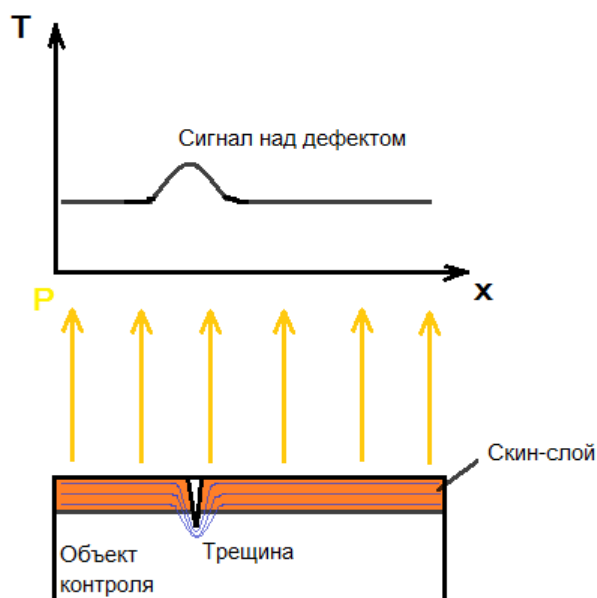


Рис. 2. Механизм активного теплового контроля с использованием индукционного нагрева.

В случае если глубина трещины превышает толщину скин-слоя, вихревые токи огибают ее, в результате чего, плотность тока в «корне» трещины увеличивается и наблюдается локальное повышение температуры как показано на рисунке.

Экспериментальные исследования

Для проведения эксперимента был использован стальной поверенный контрольный образец с искусственными дефектами для калибровки вихретоковых дефектоскопов. Внешний вид образца приведен на рисунке 3.



Рис. 3. Внешний вид контрольного образца

Контрольный образец для вихретокового контроля воспроизводит дефекты типа нарушения сплошности материала (поверхностные трещины) и представляет собой металлический брусок в виде параллелепипеда, на поверхности которого нанесены три искусственных трещины глубиной 0,3;0,5;1 мм.

При проведении испытаний использовалось следующее оборудование: тепловизор ТН9100ML фирмы NEC Avio для записи термографических последовательностей, в качестве источников нагрева применялась система индукционного нагрева.

Нагрев образца осуществлялся двумя способами:

1. Витки индуктора расположены параллельно плоскости дефекта (вихревые токи протекают вдоль дефектов).
2. Витки индуктора расположены перпендикулярно плоскости дефектов.



Рис. 4. Проведение индукционной инфракрасной термографии

Ниже представлены результаты обработки полученных термограмм с помощью программы ThermoFit Pro, разработанной в Томском политехническом университете. Данная программа позволяет применять следующие методы анализа термографических последовательностей: линейные методы обработки (нормализация, дифференцирование, фильтрация и т. д.), Фурье-анализ, различные способы вейвлет-анализа, а также метод главных компонент. В программе имеется модуль статистического анализа термограмм и получаемых изображений.

1. Индукционный нагрев производился в течение 5 секунд. Образец проталкивался через витки индуктора со скоростью приблизительно 1 см/с. Фиксация результатов производилась сразу после прохождения им индуктора. Результаты представлены на рисунке 5.

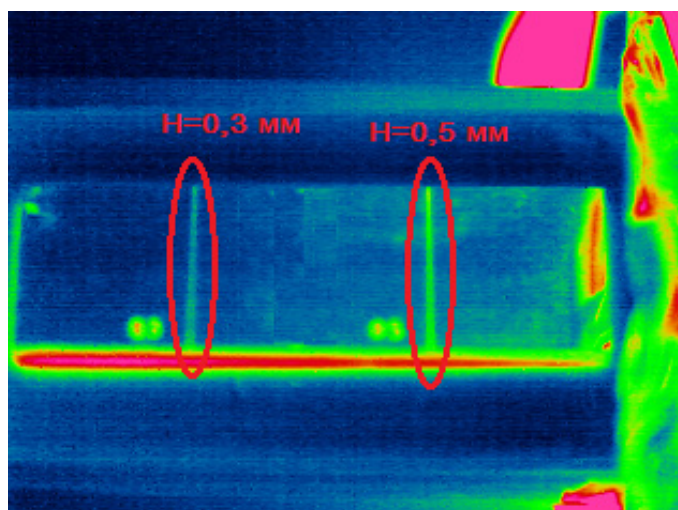


Рис. 5. Термограмма 1

Из термограммы видно, что температура в области трещин выше, чем на бездефектных участках образца. Сигнал над трещиной глубиной 0,5 мм составил порядка $3,5^{\circ}\text{C}$, а для трещины 0,3 мм порядка 1°C . Ниже представлены графики полученные с помощью программы ThermoFit Pro (Рис. 6), показывающие разность температур бездефектной области и трещин.

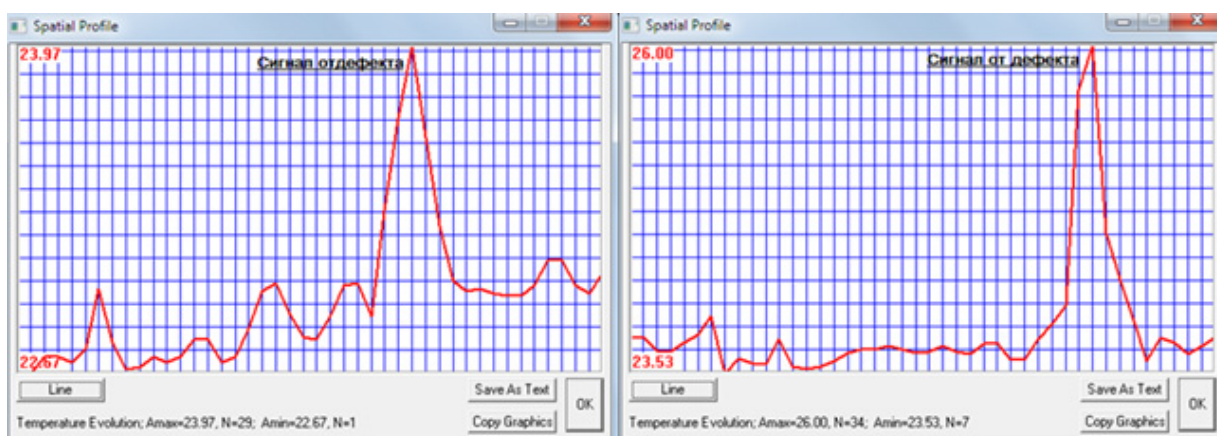


Рис. 6. Графики, показывающие разность температур бездефектных областей и трещин глубиной 0,3 мм (слева) и 0,5 мм (справа)

2. При расположении индуктора перпендикулярно плоскости дефектов использовались те же параметры нагрева, что и в предыдущем случае. Результаты приведены ниже.

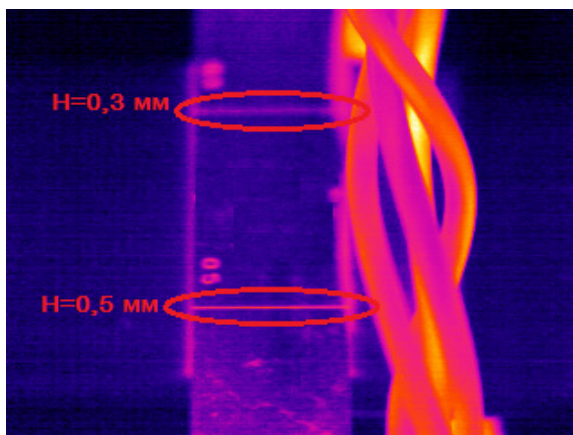


Рис. 7. Термограмма 2

Для трещины глубиной 0,3 мм сигнал над трещиной составил так же порядка 1⁰С, а для трещины глубиной 0,5 мм – около 5⁰С. Графики приведены ниже.

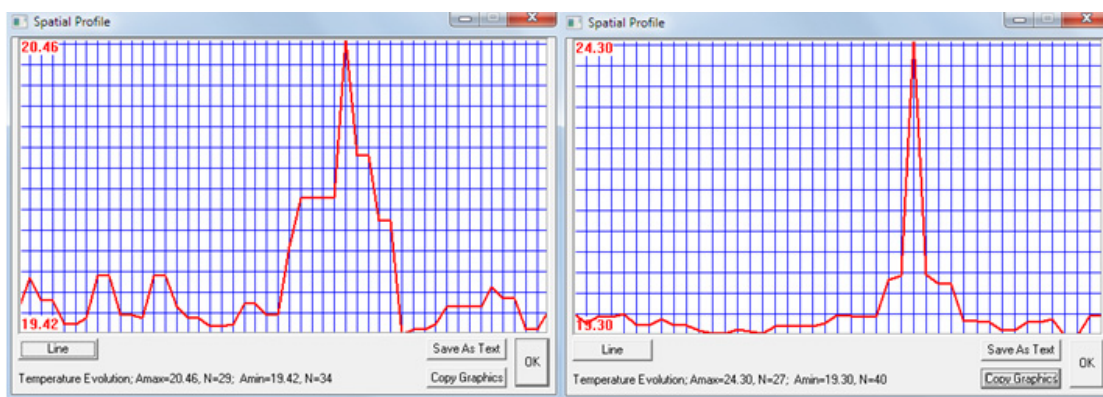


Рис. 8. Графики показывающие разность температур бездефектных областей и трещин глубиной 0,3 мм (верхний) и 0,5 мм (нижний)

Как и ожидалось, сигнал над трещинами оказался большим при расположении витков индуктора перпендикулярно направлению трещин. Теоретическое обоснование подтвердилось экспериментально.

Вывод

В ходе экспериментальных исследований убедились, что индукционная инфракрасная термография является отличной альтернативой магнитопорошковому и вихретоковому методам контроля. Сигналы от дефектов выражены явно и легко различимы на фоне шумов. Экспериментально подтвердили, что витки индуктора наиболее целесообразно располагать перпендикулярно предполагаемому направлению трещин. Из преимуществ метода можно выделить:

1. Скорость контроля (одновременно сканируется обширная площадь объекта);
2. Бесконтактность;
3. Возможность контроля объектов сложной формы (в отличие от вихретокового метода контроля).
4. Высокая вероятность обнаружения дефектов;
5. Низкий уровень ложных сигналов (по сравнению с магнитопорошковым контролем).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М.: Спектр, 2009. – 570 с.
2. Бодажков В.А. Объемный индукционный нагрев. – СПб.: «Политехника», 1992. – 68 с.

Сведения об авторах:

Калашников Д.А.: студент 2-го курса магистратуры кафедры информационно-измерительной техники Института неразрушающего контроля ТПУ, область научных интересов: тепловой неразрушающий контроль, индукционный нагрев.