

Численное исследование тепловых полей, возникающих в дефектном материале при индукционно-возбужденной термографии в неоднородном электромагнитном поле

А.В. ДИМАКИ

Институт физики прочности и материаловедения, Томск, Россия

e-mail: dav@ispms.tsc.ru

О.В. СИЗОВА

С.Г. ПСАХЬЕ

Известен метод неразрушающего контроля состояния конструкционных изделий, основанный на применении индукционных токов высокой частоты, получивший название индукционно-возбужденной термографии. Данный метод, основанный на разогреве образца индукционными токами, позволяет выявлять закрытые трещины и трещины малых размеров, а также повреждения в объеме материала, не выходящие на поверхность. Как правило, подводимое к изделию электромагнитное поле считается однородным, по крайней мере, у поверхности, что затрудняет обследование пространственно протяженных объектов. В работе при помощи компьютерного моделирования исследована возможность обнаружения дефектов в существенно неоднородном электромагнитном поле, в частности, с применением подвижных сканирующих устройств. При использовании подвижного индуктора на поверхности образца в области трещины формируется высоко контрастная полоса, наблюдаемая в инфракрасном диапазоне, в отличие от более размытой области повышенной температуры, возникающей при воздействии неподвижным индуктором. Таким образом, влияние трещины на выделяемую мощность оказывается более сильным, если к материалу приложено неоднородное внешнее поле. Обнаружение дефектов с использованием описанной методики требует использования термоизмерительной аппаратуры, обладающей достаточным быстродействием.

В настоящее время интенсивно развиваются методы неразрушающего контроля состояния конструкционных изделий, основанные на применении индукционных токов высокой частоты [1]. Данные методы известны под общим названием индукционно-возбужденной термографии [2]. Физической основой таких методов является локальное повышение температуры поверхности изделия в области дефекта [3, 4]. Индукционно-возбужденная термография осуществляется следующим образом. Исследуемый образец нагревается индукционными токами, при этом имеющиеся в нем поверхностные трещины приводят к локальному повышению плотности индукционных токов и, следовательно, к образованию областей с повышенной температурой поверхности. Термографическая камера с высоким разрешением регистрирует локальные неоднородности поля температуры, ассоциируемые с дефектами. Данный метод позволяет выявлять закрытые трещины и трещины малых размеров, а также повреждения в объеме материала, не выходящие на поверхность [5, 6]. При этом разрешающая способность метода тем выше, чем выше частота подводимого к исследуемому объекту электромагнитного поля. Характерный диапазон используемых в настоящее время для этой цели частот составляет от 100 до 500 кГц. В большинстве

работ, как теоретических, так и экспериментальных, подводимое электромагнитное поле считается однородным, по крайней мере, у поверхности изделия [5]. При этом обследование пространственно протяженных объектов, как и объектов сложной геометрической формы, зачастую бывает затруднительным, в частности, виду того, что создание однородного поля в этом случае осложнено или невозможно. В связи с этим, представляет интерес исследование возможностей осуществления индукционно-возбужденной термографии в неоднородных полях. В работе при помощи компьютерного моделирования исследована возможность обнаружения дефектов в существенно неоднородном электромагнитном поле, в частности, с применением подвижных сканирующих устройств.

В рамках разработанной модели индукционного разогрева изделия протекающие в материале теплофизические и электромагнитные процессы описываются системой связанных уравнений: уравнения теплопроводности (1)

$$c(T)\rho(T)\frac{\delta T}{\delta t} = \nabla[\lambda(T)\nabla T] + \frac{p(T)}{2}|\nabla H|^2 - \sigma\epsilon T^4 \quad (1)$$

и уравнения для напряженности магнитного поля (2):

$$\nabla^2 H = -j\frac{\omega\mu_0\mu(H, T)}{p(H)}H, \quad (2)$$

где T – абсолютная температура, H – напряженность магнитного поля, c – удельная теплоемкость, λ – коэффициент теплопроводности, ρ – плотность материала, p – удельное электрическое сопротивление, σ – константа Стефана-Больцмана, ϵ – коэффициент черноты, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, μ – относительная магнитная проницаемость материала, ω – циклическая частота колебаний магнитного поля. Процессы конвективного теплообмена с внешней средой в данной модели не принимаются во внимание [3, 4].

Одним из широко известных и традиционных способов построения сеточных моделей сред с нелинейно меняющимися свойствами, либо процессами, протекающими на различных масштабах, является использование переменного шага пространственной сетки [7]. В данной работе модель индукционного нагрева была модифицирована путем введения переменного шага сетки, уменьшающегося от поверхности в глубину материала в геометрической прогрессии. Значение знаменателя прогрессии выбиралось из интервала [1.01; 1.25] таким образом, чтобы различие распределений напряженности магнитного поля в задачах с постоянным и переменным шагом было не больше некоторой наперед заданной величины (как правило, 1%).

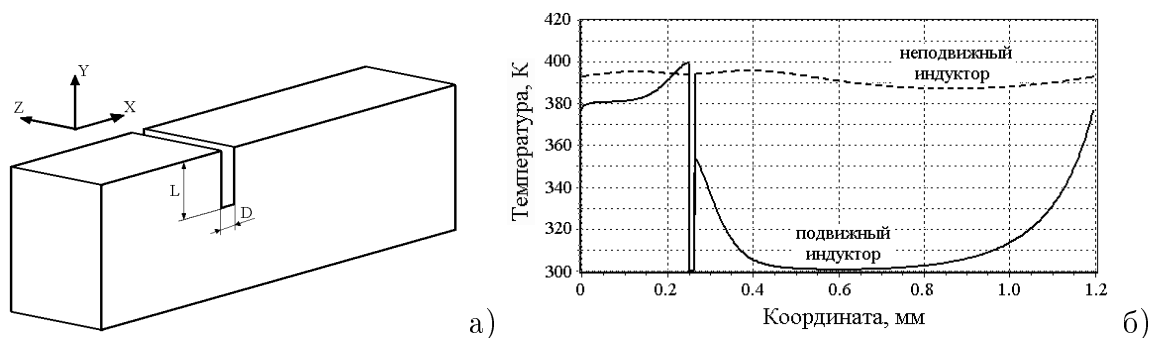


Рис. 1. а) Схема расчетной области; б) распределение температур на поверхности образца вдоль оси OX .

Компьютерное моделирование обнаружения трещин в неоднородном электромагнитном поле (ЭМП) проводилось в трехмерной постановке на прямоугольном образце, в котором был сделан поперечный вырез, имитирующий трещину (рис. 1а). Индуктор перемещался вдоль оси OX со скоростью V_x . Свойства модельного материала соответствовали свойствам стали 45. Частота внешнего ЭМП составляла $f = 440$ кГц, напряженность поля у поверхности материала задавалась равной $H_0 = 250$ кА/м.

На рис. 1б показаны модельные распределения температур в образце с трещиной при воздействии на него с помощью неподвижного и подвижного индуктора. Видно, что при использовании подвижного индуктора на поверхности образца в области трещины формируется контрастная полоса, которую можно наблюдать в инфракрасном диапазоне. Напротив, при воздействии неподвижного индуктора формируется размытая область пониженной температуры, причем разность температур вблизи трещины и вдали от нее в этом случае значительно меньше, чем в предыдущем. Данный факт позволяет говорить о том, что применение подвижного индуктора (и, соответственно, неоднородного ЭМП) для обнаружения поверхностных трещин является эффективным. Как показали результаты моделирования, в некотором диапазоне скоростей движения индуктора возникающая на краях трещины разность температур достигает максимальных значений (рис. 2). В связи с этим, возникает проблема задания "оптимальных" параметров диагностирующего воздействия, т.е. таких, которые позволяют обнаруживать дефекты с наибольшей достоверностью.

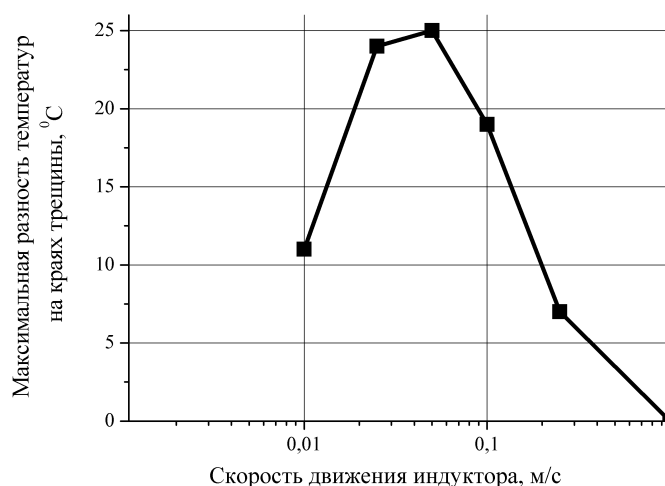


Рис. 2. Зависимость разности температур на краях трещины от скорости движения индуктора

В работе [2] отмечено, что, в зависимости от протяженности трещины в глубину материала, получаемая разность поверхностных температур при использовании неподвижного источника ЭМП будет различной. Аналогичные результаты были получены нами при моделировании воздействия с подвижным источником (рис. 3а). Вид полученной зависимости разности температур качественно совпадает с экспериментальным, при этом с увеличением ширины трещины разность температур на ее краях уменьшается (рис. 3б).

Полученные результаты показывают, что применение неоднородных полей при индукционно-возбужденной термографии в ряде случаев может быть более эффективным, по сравнению с использованием однородных полей. Физической причиной данного эффекта является прямая зависимость выделяемой в материале мощности от градиента внешнего ЭМП. Влияние трещины на выделяемую мощность оказывается более сильным, если к материалу

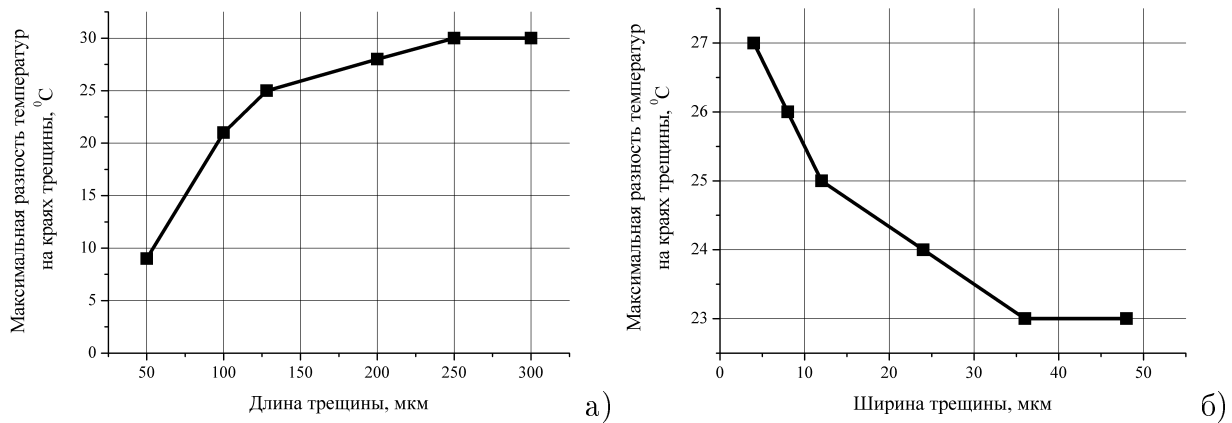


Рис. 3. Зависимости разности температур на краях трещины от ее длины (а) и ширины (б)

приложено неоднородное внешнее поле. Однако, по мере продвижения индуктора вдоль оси образца разность температур на краях трещины быстро уменьшается. Это означает, что обнаружение дефектов при использовании описанной методики представляет собой динамический процесс, требующий использования термоизмерительной аппаратуры, обладающей достаточным быстродействием. Кроме этого, следует иметь в виду, что эффективность обнаружения трещин существенным образом зависит от параметров источника внешнего ЭМП, в первую очередь от частоты и мощности создаваемого поля.

Список литературы

- [1] Кидин И.Н. Физические основы электрической обработки металлов и их сплавов. М.: Металлургия, 1978. 376 с.
- [2] Walle G., Netzelmann U. Thermographic Crack Detection in Ferritic Steel Components Using Inductive Heating. // Proc. of European NDT Conf. Germany, Berlin, 2006. P.1-10.
- [3] Димаки А.В., Князева А.Г., Сизова О.В., Мельников А.Г., Псахье С.Г., Моделирование процесса залечивания усталостных микротрещин в металле при помощи индукционного нагрева // Материалы XV междунар. конф. по вычислительной механике и современным прикладным программным системам. (ВМСППС-2007). Украина, Алушта, 2007. С. 209-211.
- [4] А.В. Димаки, А.Г. Мельников, В.С. Плешанов, О.В. Сизова. Теоретическое и экспериментальное исследование залечивания поверхностных трещин индукционным нагревом. // Перспективные материалы. 2010. №3. С. 77-83.
- [5] G. Zenzinger, J. Bamberg, W. Satzger, V. Carl. Thermographic crack detection by eddy current excitation. // Nondestructive Testing and Evaluation. 2007. V.22. P. 101-111.
- [6] B. Oswald-Tranta. Thermo-inductive crack detection. // Nondestructive Testing and Evaluation. 2007. V.22. P. 137-153.
- [7] Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977.