

УДК 539.376.620.388

Г.Ф. Коняхин, С.А. Косиков

*Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков*

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МЕТОДОМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

*В статье рассмотрены условия повышения эффективности неразрушающего контроля методом параметрического зондирования. Получено соотношение для оценки изменения составляющих электрического поля при возбуждении механических колебаний в исследуемом объекте.*

**Ключевые слова:** параметрический метод, неоднородные включения, механические колебания, разность частот, достоверность.

### Введение

**Постановка задачи.** Повышение качества продукции неразрывно связано с совершенствованием технологических процессов и, в том числе, с внедрением новых методов контроля исходных материалов. Отличительной особенностью методов неразрушающего контроля от методов разрушающего контроля является возможность осуществления 100% контроля, что позволяет избежать использования методов математической статистики при оценке качества производимых изделий. Однако при этом следует учитывать, что практически все методы неразрушающего контроля имеют косвенный характер, поэтому важнейшим требованием является высокая достоверность результатов измерений.

**Анализ публикаций.** Большинство существующих в настоящее время методов неразрушающего контроля основано на измерении физических параметров материалов. Для контроля неоднородности структуры изделий из диэлектрических материалов, например, в качестве измеряемого физического параметра может использоваться диэлектрическая проницаемость или тангенс угла диэлектрических потерь. Следует отметить, что точность и достоверность результатов неразрушающего контроля при проведении измерений зависит не только от класса точности используемой измерительной аппаратуры, но и от степени корреляции используемого физического параметра и параметра объекта контроля. Применение методов неразрушающего контроля с использованием различных физических полей ограничивается маломерностью объектов контроля. Сечение рассеяния объектов контроля, как правило, имеет малую величину, что приводит к незначительному изменению параметров первичного поля, сравнимых иногда с собственными шумами измерительных устройств, что отмечается рядом авторов.

В работе [1] изложены основные принципы применения ультразвуковых методов контроля. Предложены методы расчета сечений рассеяния. В работе [2] отмечается, что для измерения внутрен-

них напряжений в структуре материала объекта возможно использовать зависимость скорости распространения ультразвука в материале объекта от его внутренних напряжений. Однако недостатком этих методов является трудность измерения малых изменений скорости механических колебаний, связанная с отсутствием высокоточных датчиков измерения скорости упругих волн в исследуемом объекте. В работе [3] даны сведения о значительном изменении затухания механических колебаний под действием механических напряжений. Данный эффект в настоящее время не нашел применения в методах неразрушающего контроля.

В работе [4] предложен метод оценки остаточных напряжений с использованием скин-эффекта. Недостатком этого метода является малая глубина проникновения зондирующего поля. В работах [5, 6] авторы показывают, что для увеличения контраста между исследуемым объектом и неоднородностями его структуры, кроме основного зондирующего поля, можно использовать дополнительные возбуждающие поля. Показано, что в зависимости от характера неоднородности структуры, возможно использование в качестве дополнительных полей акустические, сейсмические, электромагнитные и иные поля.

В работе [7] приведены данные о том, что для оценки наличия в исследуемом объекте включений, находящихся в жидкой фазе, в качестве основного зондирующего поля применяется электромагнитное поле, а в качестве дополнительного – поле механических колебаний. Отмечается необходимость подавления помех при проведении измерений. В [8, 9] предлагается способ, позволяющий увеличить контраст между исследуемым объектом и неоднородностью материала объекта, с различными механическими характеристиками. В работе [8] приведены данные практического использования метода искусственно созданного контраста между объектом контроля и объектом исследования в условиях производства.

В связи с тем, что исследования с помощью неразрушающих методов контроля являются косвен-

ными, основное усилие разработчиков новых методов направлено на повышение точности и достоверности получаемых данных.

**Целью данной работы** является получение соотношения параметров основного и дополнительного полей для ближней зоны излучения при проведении неразрушающего контроля изделий параметрическим методом.

### Основная часть

Одним из вариантов решения задачи повышения точности и достоверности результата неразрушающего контроля является параметрический метод. В данном методе контроля в качестве первичного, зондирующего, поля используется электромагнитное поле, а в качестве дополнительного поля, изменяющего параметры объекта контроля, используется поле механических колебаний.

Пусть исследуемый объект единичного объема выполнен из изотропного диэлектрического материала и имеет неоднородность, отличающуюся значением диэлектрической проницаемости от диэлектрической проницаемости материала исследуемого объекта. Если исследуемый объект поместить в однородное электрическое поле, то область, в которой расположена неоднородность, можно представить как электрический диполь.

Значение механического момента диполя при действии внешнего постоянного электрического поля будет равно [10]:

$$M = Fl_0 \cos \theta, \quad (1)$$

где  $F$  – сила, действующая на электрические заряды диполя;  $l_0$  – плечо диполя (расстояние между зарядами);  $\theta$  – угол между направлением действия силы  $F$  и направлением электрического поля.

Подставляя значение силы

$$F = qE, \quad (2)$$

где  $q$  – заряд электрического диполя;  $E$  – напряженность электрического поля в выражение (1), получим

$$M = qEl_0 \cos \theta. \quad (3)$$

Механический момент  $M$  зависит от электрического момента  $p$ , равного

$$p = ql_0 \cos \theta. \quad (4)$$

В переменном внешнем электрическом поле при  $\cos \theta = 1$  выражение для дипольного момента имеет вид

$$p(t) = ql_0 \cos(\omega t), \quad (5)$$

где  $p(t)$  – дипольный момент;  $\omega$  – частота внешнего электрического поля;  $t$  – время.

Предположим, что в исследуемом объекте возбуждены механические колебания, причем вектор механического напряжения совпадает по направлению с вектором электрического момента диполя. В таком случае выражение для плеча дипольного момента может быть представлено в виде

$$l(t) = l_0 + \Delta l_0 \cos \Omega t, \quad (6)$$

где  $l(t)$  – величина плеча диполя при воздействии механического напряжения;  $\Omega$  – частота механических колебаний;  $\Delta l_0$  – амплитуда механических колебаний. В этом случае выражение (5) может быть представлено в виде

$$p(t) = q \cos \omega t l_0 \left( 1 + \frac{\Delta l_0}{l_0} \cos \Omega t \right). \quad (7)$$

Как известно [10], величины составляющих электромагнитного поля электрического диполя на расстоянии  $R$  в момент времени  $t$  определяются величиной электрического момента диполя  $p(t)$ .

Вектор Герца связан с вектором электрического момента диполя соотношением [10]:

$$\vec{P}(t, R) = \frac{\vec{p}(t - R/c)}{R}, \quad (8)$$

где  $p(t - R/c)$  – электрический момент диполя;  $c$  – скорость электромагнитных волн;  $R$  – некоторое расстояние от электрического диполя.

С учетом выражения (8), а также учитывая, что  $\vec{E} = \text{rot rot } \vec{P}$ , выражение для электрических составляющих электромагнитного поля в ближней зоне в сферической системе координат можно записать в виде

$$E_R = \frac{2 \cos \vartheta}{R^3} q \cos(\omega t) l_0 \left( 1 + \frac{\Delta l_0}{l_0} \cos \Omega t \right), \quad (9)$$

$$E_\vartheta = \frac{\sin \vartheta}{R^3} q \cos(\omega t) l_0 \left( 1 + \frac{\Delta l_0}{l_0} \cos \Omega t \right), \quad (10)$$

где  $\vartheta$  – меридианальный угол;  $E_R$  – радиальная составляющая электрического поля;  $E_\vartheta$  – меридианальная составляющая электрического поля.

$$\text{Так как } \frac{\Delta l_0}{l_0} = \frac{\sigma}{D}, \quad (11)$$

где  $\sigma$  – механическое напряжение, возникающее при возбуждении механических колебаний;  $D$  – модуль Юнга, выражения (9), (10) могут быть записаны в виде

$$E_R = \frac{2 \cos \vartheta}{R^3} q \cos(\omega t) l_0 \left( 1 + \frac{\sigma}{D} \cos \Omega t \right), \quad (12)$$

$$E_\vartheta = \frac{\sin \vartheta}{R^3} q \cos(\omega t) l_0 \left( 1 + \frac{\sigma}{D} \cos \Omega t \right). \quad (13)$$

Введя обозначения

$$T = \frac{2 \cos \vartheta}{R^3} ql_0, \quad Q = \frac{\sin \vartheta}{R^3} ql_0,$$

получим

$$E_R = T \cos \omega t + \frac{\sigma}{D} T \cos \omega t \cos \Omega t \quad (14)$$

$$E_\vartheta = Q \cos \omega t + \frac{\sigma}{D} Q \cos \omega t \cos \Omega t. \quad (15)$$

После преобразования выражений (14) и (15) будем иметь

$$E_R = T \cos \omega t + \frac{\sigma}{D} T \cos(\omega - \Omega)t + \frac{\sigma}{D} T \cos(\omega + \Omega)t, \quad (16)$$

$$E_g = Q \cos \omega t + \frac{\sigma}{2D} Q \cos(\omega - \Omega)t + \frac{\sigma}{2D} Q \cos(\omega + \Omega)t. \quad (17)$$

Выражения (16), (17) содержат слагаемые, величина которых зависит от суммы и разности частот  $\omega$  и  $\Omega$ . Кроме того, они зависят от механического напряжения  $\sigma$  и модуля Юнга  $D$ . Первые слагаемые в выражениях (14) и (15) не зависят от  $\sigma$  и  $D$ .

Выражения для  $E_R$  и  $E_g$  при  $\omega = \Omega$  имеют вид

$$E_R = \frac{\sigma \cos \vartheta}{D R^3} q l_0 \cos(\omega - \Omega)t, \quad (18)$$

$$E_g = \frac{\sigma \cos \vartheta}{2D R^3} q l_0 \cos(\omega - \Omega)t. \quad (19)$$

В случае если механические колебания отсутствуют, выражения для электрических составляющих электромагнитного поля  $E_R$  и  $E_g$  имеют вид

$$E_R' = \frac{2 \cos \vartheta}{R^3} q l_0 \cos \omega t, \quad E_g' = \frac{\sin \vartheta}{R^3} q l_0 \cos \omega t \quad (20)$$

Отношение (12), (13) и (18), (19) показывают относительное изменение составляющих электрического поля при возбуждении механических колебаний

$$\frac{E_R}{E_R'} = 1 + \frac{\sigma}{D} \cos \Omega t, \quad (21)$$

$$\frac{E_g}{E_g'} = 1 + \frac{\sigma}{D} \cos \Omega t. \quad (22)$$

Как видно из (18) и (19), при  $\omega = 0$  и постоянном первичном электрическом поле происходит изменение рассеянной волны электрической составляющей поля с частотой  $\Omega$ , что позволяет судить о наличии дефекта. При незначительном отличии  $\omega$  от  $\Omega$  и при наличии дефекта в объекте исследования происходят биения  $E_R$  и  $E_g$ .

### Выводы

1. Получены выражения для оценки относительного изменения составляющих электрического поля в ближней зоне при наличии механических колебаний в исследуемом объекте.

2. При проведении неразрушающего контроля изделий из диэлектрического материала с целью уве-

личения достоверности результатов измерений при постоянном первичном электрическом поле следует судить о наличии неоднородности материала исследуемого объекта по изменению поля на частоте, равной частоте дополнительного поля.

3. При проведении неразрушающего контроля изделий из диэлектрического материала с целью увеличения достоверности результатов измерений при переменном первичном электрическом поле следует судить о наличии неоднородности материала исследуемого объекта по изменению поля на частоте, равной разности частот первичного дополнительного полей.

### Список литературы

1. Алешин Н.П. Ультразвуковая дефектоскопия / Н.П. Алешин, В.Г. Лупачев. – Мн.: Вышэйшая школа, 1972. – 227 с.
2. Хоникомб Р. Пластическая деформация: пер. с англ. под ред. Л.Д. Розенберга / Р. Хоникомб. – М.: Мир, 1972. – 406 с.
3. Физическая акустика / Под ред. У. Мезона; пер. с англ. под ред. Н.А. Толстого. – М.: Мир, 1966. – 589 с.
4. Васильков С.Д. Применение неразрушающего резистивного электроконтактного метода контроля напряженного состояния металлов и сплавов после различных технологических воздействий / С.Д. Васильков // Техника и технология трибологических исследований: Тез. докл. – Иваново, 2009. – 45 с.
5. Мороз Н.Г. Применение параметрических методов локации скрытых объектов / Н.Г. Мороз, Н.А. Ключко // Вісник СНУ ім. Даля, 2008. – №1 (119).
6. Щербаков Г.Н. Параметрическая локация – новый метод обнаружения скрытых объектов / Г.Н. Щербаков // Спеціальна техніка. – 2000. – №4. – 24 с.
7. А.с. №1356768 Способ геоэлектроразведки G01V3/12 / С.А. Косиков. – 01.08.1987.
8. А.с. №1178214 Способ геоэлектроразведки, G01V3/12 / С.А. Косиков. – 08.05.1985.
9. Коняхин Г.Ф. О параметрическом методе оценки однородности материалов / Г.Ф. Коняхин, С.А. Косиков // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ДП «ЦНДІ навігації та управління», 2010. – Вип. 4(16). – С. 115-118.
10. Тамм И.Е. Основы теории электричества / И.Е. Тамм. – М.: Физматлит, 2003. – 616 с.

Поступила в редколлегию 24.01.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.М. Сотников, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ МЕТОДОМ ПАРАМЕТРИЧНОГО ЗОНДУВАННЯ

Г.Ф. Коняхін, С.О. Косиков

У статті розглянуті умови підвищення ефективності неруйнівного контролю методом параметричного зондування. Отримано співвідношення для оцінки зміни складових електричного поля при збудженні механічних коливань в досліджуваному об'єкті.

**Ключові слова:** параметричний метод, неоднорідні включення, механічні коливання, різниця частот, достовірність.

### INCREASE OF EFFICIENCY OF NON-DESTRUCTIVE CONTROL OF THE SELF-REACTANCE SOUNDING A METHOD

G.F. Konyakhin, S.O. Kosikov

The terms of increase of efficiency of non-destructive control of the self-reactance sounding a method are considered in the article. It is got correlation for the estimation of change of constituents of the electric field at excitation of mechanical vibrations in the probed object.

**Keywords:** self-reactance method, heterogeneous including, mechanical vibrations, difference of frequencies, authenticity.