

ЭЛЕКТРОМАГНИТНО – АКУСТИЧЕСКИЙ СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЙ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНО – АКУСТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Электромагнитно – акустические преобразователи (ЭМАП) относятся к классу измерительных устройств для преобразования электромагнитной энергии в акустическую и обратно [1]. Главным отличием ЭМАП от традиционных пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) является то, что контролируемое изделие является элементом электромагнитно – акустического преобразователя. Поэтому для его работы не нужна контактная жидкость. По сравнению с ПЭП, как средство измерительной техники, ЭМАП имеет целый ряд значительных преимуществ [2-4]. Среди этих преимуществ следует отметить:

– высокую надежность измерений – в несколько раз выше, чем в случае применения традиционных приборов;

– не требуются затраты на приобретение непрерывно расходуемую контактную жидкость;

– не требуются затраты на непрерывно истирающиеся пьезопреобразователи;

– не требуются затраты на зачистку поверхности контролируемых изделий. Особенно это важно для объектов контроля, находящихся в эксплуатации (энергетические, транспортные, нефтехимические и т.д.), так как после зачистки требуется повторная покраска. Причем по существующим положением контроль большинства объектов проводится не реже 1-2 раз в год;

– исключается ухудшение товарного вида проконтролированных изделий;

– можно контролировать изделия с температурой ниже -60°C и нагретых до 1200°C ;

– выполнение контроля бесконтактно через зазор, заполненный воздухом, вакуумом, краской, пластмассой и т.д.;

– производительность контроля может достигать 60 м/с;

– выполнение контроля любыми типами ультразвуковых волн, что не достижимо традиционными «мокрыми» методами.

Однако до последнего времени разработке средств измерений, основанных на ЭМА способе, не уделялось должного внимания. Такое положение было обусловлено сложностью практической реализации этого способа.

Теоретические положения и построение прямых ЭМАП для возбуждения сдвиговых упругих колебаний ранее рассмотрены в работах [5-6]. Настоящая работа направлена на продолжение исследований по созданию конструкций и принципов построения прямых электромагнитно-акустических преобразователей (ЭМАП) для возбуждения и приема объемных продольных волн и «наклонных» ЭМАП для возбуждения и приема объемных сдвиговых SV-волн с вертикальной поляризацией. Такие преобразователи целесообразно использовать при контроле ферромагнитных металлов и металлов, нагретых выше точки Кюри.

1 Прямые ЭМАП для возбуждения и приема объемных продольных волн

Электромагнитно – акустические преобразователи для возбуждения и приема продольных упругих колебаний отличаются от описанных в [6] пространственным распределением подмагничивающего поля. Оно должно быть тангенциальным по отношению к плоскости поверхности возбуждения контролируемого изделия. Индукторы могут быть такие же, как изображенные на рис. 4 [6].

Коэффициент преобразования электромагнитной энергии в акустическую и обратно для этого случая будет иметь вид

$$\eta = K_I Q_I B^2 N^2 A_I / \rho C_I, \quad (1)$$

где K_I – коэффициент удаления магнита от изделия; Q_I – коэффициент удаления индуктора от изделия; B – тангенциальный компонент магнитного поля относительно поверхности исследуемого материала; A_I – параметр эффективной или чувствительной зоны ЭМАП; N – количество витков в индукторе (прием/возбуждение); ρ – плотность контролируемого материала; C_I – скорость продольной волны.

Коэффициент, описывающий относительное изменение поля подмагничивания в процессе удаления магнита от поверхности металла, можно приблизительно представить в виде

$$K_I = 1 - 2d / D, \quad (2)$$

где d – расстояние между поверхностью металла и плоскостью, на которой лежат поверхности полюсов магнита, обращенные к металлу; D – эффективный размер полюсов магнита.

Коэффициент подъема индуктора ЭМАП, который описывает уменьшение индуцированного поверхностного тока, можно выразить так:

$$Q_I = F_I(L) \exp(-4\pi h / r), \quad (3)$$

где $F_I(H)$ – поправочный коэффициент, учитывающий форму индуктора преобразователя; h – зазор между индуктором и металлом; r – эффективный размер индуктора.

Очевидно, что для индуктора имеет место экспоненциальная зависимость полезного сигнала от величины технологического зазора.

Формирование тангенциальной компоненты подмагничивающего поля сложнее, чем нормальной при возбуждении объемных сдвиговых волн. Типичная конструкция магнитной системы для возбуждения продольных волн показана на рис.1. Результирующее магнитное

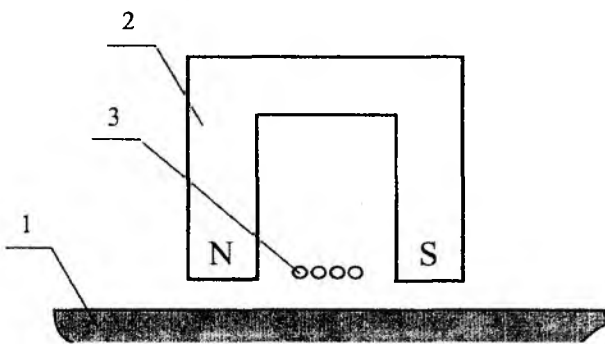


Рис. 1

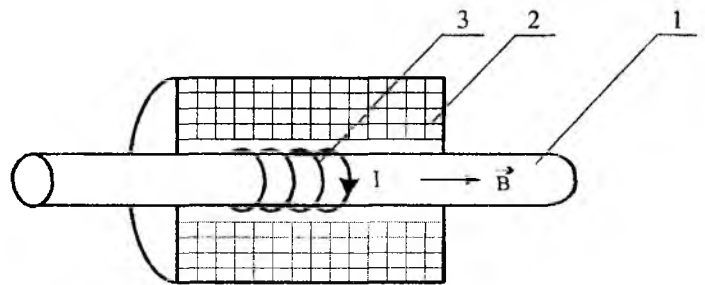


Рис. 2

поле существенно зависит от свойств контролируемого материала. В массивном ферромагнитном изделии тангенциальная составляющая в поверхностном слое металла незначительна, так как существенная его часть уходит в глубину материала. При тонком ферромагнитном изделии в его поверхностном слое можно сформировать тангенциальную компоненту со значительной величиной индукции поляризирующего поля. Если контролируемое изделие неферромагнитное, то перераспределение компонент постоянного магнитного поля определяется конструкцией и взаимным расположением полюсных наконечников источника магнитного поля. Во всех случаях индуктор ЭМАП располагается между полюсными наконечниками магнита. Недостаток такого подхода состоит в строгих ограничениях по размеру, налагаемых на исследуемый объект. Он должен быть достаточно большим. Иногда удается по-

местить индуктор преобразователя внутри источника магнитного поля, например при контроле прутков, рис. 2.

Если индукторы ЭМАП разместить под полюсными наконечниками и между полюсными наконечниками, то в изделии одновременно будут возбуждаться продольные и поперечные волны. При этом значительно расширяются возможности измерения свойств изделий. Так, можно измерять толщину изделий без применения эталонов толщины, измерять скорости распространения акустических волн, а также упругие постоянные материалов.

Скорость распространения волн определяется только физическими (упругими) свойствами среды и не зависит от частоты ультразвуковых колебаний и их затухания в материале изделия. Некоторое влияние на скорость ультразвука оказывает температура, что обусловлено температурными изменениями упругих характеристик материала.

В неограниченных твердых телах плотностью ρ скорость продольных волн C_l определяется модулем нормальной упругости E и коэффициентом Пуассона ν [7]

$$C_l = \sqrt{\left(\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1 - \nu}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)} \right)}, \quad (4)$$

а скорость поперечной волны C_t – модулем сдвига G :

$$C_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}. \quad (5)$$

Из уравнений (4) и (5) можно определить соотношение скоростей поперечных и продольных волн

$$\frac{C_t}{C_l} = \sqrt{\frac{1 - 2\nu}{2(1 - \nu)}}. \quad (6)$$

Измерив соответствующие скорости из (6), легко определить коэффициент Пуассона.

Следует отметить, что описанные продольные волны, возбуждаемые ЭМАП, применяются чаще всего для определения свойств горячего металла и физико-механических характеристик материалов.

2 «Наклонные» ЭМАП для возбуждения и приема объемных сдвиговых SV волн с вертикальной поляризацией

В названии и далее в тексте будет использоваться обычно применяемое при измерениях «мокрым» способом понятие «наклонный» ЭМАП. При этом имеется в виду возбуждение и прием ультразвуковых колебаний под углом к поверхности изделия. Величина угла отсчитывается от нормали к поверхности материала.

В практике измерений неразрушающим методом наклонный ввод ультразвуковых импульсов в исследуемый материал «мокрым» способом применяется пожалуй наиболее широко. При этом измеряют характеристики недоступных в прямом направлении зон изделия.

ЭМА способ также позволяет возбуждать и принимать из изделия ультразвуковые импульсы под углом к поверхности возбуждения/приема контролируемого объекта. Для этого, по аналогии с радиолокаторами с фазированными решетками, в поверхностном слое материала необходимо сформировать ансамбль участков, в которых действуют силы с заданными параметрами – направлением, амплитудой, фазой и временем воздействия.

Оптимальным для формирования наклонных пучков ультразвуковых колебаний является ЭМАП с индуктором типа «зигзаг», рис. 3. С его помощью можно возбуждать наклонные сдвиговые волны с вертикальной поляризацией и продольные волны под углами от 0 до 90 градусов.

Зигзагообразные ЭМАП создают периодические возмущающие силы при помощи пространственно изменяющегося переменного электромагнитного поля и постоянного поляризующего поля. Постоянное магнитное поле может быть нормальным и тангенциальным.

Ультразвуковой пучок распространяется преимущественно перпендикулярно проводникам рабочего участка зигзага, т. е. нормально более длинной его стороне.

Угол распространения возбуждаемых наклонных волн относительно нормали к поверхности металла в основном зависит от пространственного шага решетки индуктора ЭМАП и частоты питающего его переменного тока:

$$\theta = \arcsin \frac{C}{2af}, \quad (7)$$

где θ – угол, образованный направлением распространения упругой волны и нормалью к поверхности материала; C – скорость распространения упругих колебаний (сдвиговой или продольной); $2a$ – шаг решетки высокочастотной зигзагообразной катушки ЭМАП; f – частота ультразвуковых колебаний.

Для многих частот тока возбуждения и периодов возмущающей силы сдвиговые и продольные волны генерируются одновременно. Относительное перераспределение энергии между сдвиговой и продольной волнами зависит от направления поляризующего магнитного поля.

Коэффициент удаления зигзагообразного индуктора имеет вид (3). Поскольку для обычно используемого мегагерцевого диапазона частот ультразвуковых волн шаг решетки составляет доли миллиметра, то технологический зазор также должен быть очень маленьким. Это ограничивает возможности применимости наклонного ввода ЭМА способом на частотах выше 1...2 МГц.

Для коротких решеток с соотношением длины к шагу менее 4 шаг решетки не соответствует в точности размеру $2a$. Влияет фактор конечного эффекта. Его можно компенсировать, сделав первый и последний полушаг или шаг змеевидной катушки индуктивности, немного меньше расчетной.

Коэффициент двойного преобразования имеет структуру (1), умноженной на квадрат числа K шагов решетки.

Ширина возможного диапазона используемых ультразвуковых волн зависит от числа периодов решетки индуктора ЭМАП и равна приблизительно f/K , где f – рабочая частота. При проектировании генератора ЭМА измерителя следует учитывать определенную полосу используемых для контроля частот.

Функция диаграммы направленности ЭМАП с зигзагообразным индуктором описывается следующим выражением:

$$\Phi(\theta) = \frac{\sin(2\pi \sin(\theta - \pi))}{2 \sin(\pi \sin(\theta - \pi))} \times \frac{\sin(K\pi \sin \theta)}{K \sin(\pi \sin \theta)}. \quad (8)$$

Для зигзагообразной катушки индуктивности диаграмма направленности имеет два главных лепестка, распространяющихся во взаимно противоположных направлениях под одинаковыми углами к поверхности металла.

Периодическую возмущающую силу можно создавать разными участками высокочастотной катушки индуктора ЭМАП. При этом необходимо формировать заданное фазовое смещение тока от одного участка катушки к другому. Формируется цепочка участков, на которых воздействие сил с различной фазой и заданными уровнями в среднем соответствует

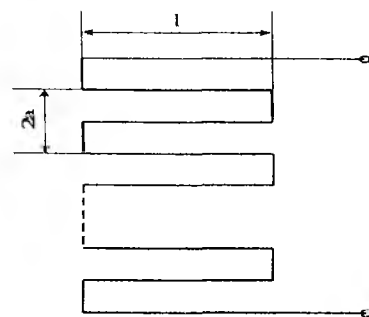


Рис. 3

многошаговому преобразователю, но с шириной полосы, как у однородного преобразователя. Это преимущество достигается за счет применения более сложной электроники, необходимой для создания пространственного фазового распределения возмущающих сил. Т. е. аналогично радиолокатору с фазированными решетками или мозаичным ПЭП (используется в ультразвуковых томографах) [8].

При использовании зигзагообразного ЭМАП могут возбуждаться и другие типы волн, например поверхностные. Для их устранения необходимо длину рабочего участка катушек индуктивности изготавливать равной половине отношения этой длины к полушагу зигзага. В таком случае сводится к минимуму возбуждение и прием третьей и четных гармоник.

Для змеевидного ЭМАП наиболее эффективно SV волны возбуждаются под углом около 45 градусов.

При проектировании ЭМАП для SV волн, возбуждаемых под углом, следует уделить особое внимание подавлению продольных L и сдвиговых с горизонтальной поляризацией SH волн, распространяющихся под углом и нормально поверхности ввода, а также подавлению поверхностных волн.

Выводы

1. На основании анализа результатов известных исследований и исследований, выполненных авторами, систематизированы данные о конструкциях ЭМАП для возбуждения и приема объемных продольных упругих колебаний, а также акустических колебаний, возбуждаемых и принимаемых под углом к поверхности металла.

2. Получены расчетные формулы для оценки влияния факторов, определяющих чувствительность и погрешность измерений с помощью ЭМА преобразователей.

3. Получена формула для расчета диаграммы направленности «наклонных» ЭМАП.

4. Определены требования к построению элементов ЭМА преобразователей, выполнение которых позволяет существенно уменьшить влияние мешающих факторов.

Список литературы: 1. *Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник* / Под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 1995. 488 с. 2. *Сучков Г. М.* О главном преимуществе ЭМА способа // Дефектоскопия. 2000. № 10. С. 67 – 70. 3. *Сучков Г. М.* Разработка и внедрение технологии сплошного автоматического обнаружения дефектов макроструктуры объемно-закаленных рельсов бесконтактным ультразвуковым методом // Автореф. дисс... канд. техн. наук. Харьков: ХАДИ. 1988. 22 с. 4. *Сучков Г. М.* Определение сечения рассеяния сдвиговых линейно поляризованных ультразвуковых колебаний с произвольной ориентацией вектора поляризации на длинном круговом цилиндрическом дефекте // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2000. № 2. С. 3 – 9. 5. *Себко В. П., Сучков Г. М.* Электромагнитно – акустический способ неразрушающего контроля. Ч.1. Эффект электромагнитно – акустического преобразования// Украинський метрологічний журнал. 2003. Вып. 1. С. 35 – 38. 6. *Себко В. П., Сучков Г. М., Горкунов Б. М.* Электромагнитно – акустический способ неразрушающего контроля. Ч.2. Электромагнитно – акустические преобразователи// Украинський метрологічний журнал. 2003. Вып. 2. С. 20 – 25. 7. *Виноградова М. Б., Руденко О. В., Сухоруков А. П.* Теория волн. М.: Наука, 1979. 384 с. 8. *Никифоренко Ж. Г., Булавин А. Н., Рокитро Б. И др.* УЗК литых аустенитных труб с помощью ЭМА – преобразователей// В мире неразрушающего контроля. 2003. № 1. С. 22 – 23.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 11.10.2003