

Лекция 6

ВОЗБУЖДЕНИЕ И РЕГИСТРАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

Способы возбуждения и регистрация акустических волн

В системах УЗ-контроля применяют различные способы возбуждения и приема волн, действие которых основано на различных физических явлениях.

Для возбуждения волн используют

1. Механический способ.
2. Термоакустический способ:
 - а) электроискровой;
 - б) нагрев лучом импульсного лазера;
 - в) нагрев пучком заряженных частиц.
3. Оптикоакустический способ.
4. Магнитострикционный способ.
5. Электромагнитно-акустический (ЭМА).
6. Пьезоэлектрический способ.

Механический способ возбуждения акустических волн

Механический способ заключается в создании за счет однократных или периодических ударов динамических механических напряжений, распространяющихся от места удара в виде упругих волн с широким спектром частот.

Этот способ применяется при контроле изделий методом *свободных колебаний*.

Достоинства:

1. Простота реализации.
2. Возможность возбуждения колебаний с большой амплитудой и широким спектром частот.

Недостатки:

Невозможность создания монохроматических колебаний и неравномерность спектра частот, определяемого параметрами соударения.

Термоакустический способ возбуждения акустических волн

Термоакустический способ возбуждения волн — основан на термоупругом эффекте.

Суть его заключается в следующем. При быстром нагреве небольшого участка контролируемого объекта температура соседних областей вследствие сравнительно медленного процесса теплопроводности увеличится лишь спустя некоторое время. Из-за быстрого неравномерного нагрева в материале возникают переменные термомеханические напряжения, являющиеся импульсным источником акустических волн, которые распространяются в контролируемом объекте. Это дистанционный метод возбуждения УЗ-волн.

Существует несколько способов быстрого нагрева:

- а) электроискровой нагрев;
- б) нагрев лучом импульсного лазера;
- в) нагрев пучком заряженных частиц, например, электронами.

При электроискровом способе нагрев происходит за счет электрического разряда между электродом и изделием, между которыми имеется зазор 10...15 мм. Разряд повторяется с нужной частотой, при этом частотный диапазон возбужденных сигналов лежит от 10 кГц до 1 МГц.

При нагреве лучом лазера имеют место тепловой и термореактивный эффекты. Последний состоит в том, что из-за быстрого нагрева частицы материала, испаряясь с поверхности, отдают свой механический импульс объекту контроля. Амплитуда механических напряжений может достигать величины $2 \cdot 10^8 \text{ Па} \approx 200 \text{ МПа}$. Таким путем можно получить акустические импульсы амплитудой $10^2 \dots 10^4$ раз больше, чем с помощью пьезопреобразователя. Однако из-за низкой частоты повторяемости импульсов, производительность контроля пока на 2...4 порядка ниже, чем в дефектоскопах с пьезоэлектрическими преобразователями.

При нагреве пучком заряженных частиц также имеют место тепловой и термореактивный эффекты. Достоинства этого метода те же, что и у метода нагрева импульсным лазером — возможность дистанционной генерации акустических импульсов большой амплитуды. Недостаток — необходимо довольно сложное оборудование, например, ускоритель электронов.

Перечисленные способы генерации акустических волн применяются в основном в исследовательских целях для получения УЗ волн большой амплитуды.

Магнитострикционный способ возбуждения и регистрации акустических волн

Магнитострикционный способ возбуждения и регистрации волн основан на эффектах *магнитострикции и магнитоупругости*.

Магнитострикция или эффект Джоуля — изменение размеров твердого тела под действием внешнего магнитного поля.

Различают

- линейную магнитострикцию — с деформацией $10^{-6} \dots 10^{-5}$;
- объемную магнитострикцию.

Последняя сравнительно мала, за исключением с области магнитных фазовых переходов.

Магнитоупругость или эффект Виллари — эффект обратный магнитострикции, изменение магнитной проницаемости при изменении размеров твердого тела.

Если T — упругие напряжения; S — упругая деформация; B — индукция; H — напряженность магнитного поля, то явление магнитострикции можно описать соотношениями:

$$T = T(B; S); \quad H = H(B; S),$$

откуда

$$dT = (\partial T / \partial B)_S dB + (\partial T / \partial S)_B dS;$$

$$dH = (\partial H / \partial B)_S dB + (\partial H / \partial S)_B dS.$$

Так как для магнитно изотропного твердого тела

$$(\partial H / \partial B)_S = 1/\mu; \quad (\partial T / \partial B)_S = \gamma; \quad (\partial H / \partial S)_B = \delta; \quad (\partial T / \partial S)_B = E,$$

где μ — магнитная проницаемость; E — модуль Юнга; γ — магнитострикция, причем из термодинамических соотношений следует, что $\delta = 4\pi\gamma$, тогда

$$dT = \gamma dB + E dS \text{ — магнитострикционный эффект};$$

$$dH = (1/\mu) dB + 4\pi\gamma dS \text{ — магнитоупругий эффект}.$$

Универсальная характеристика магнитострикционного материала — коэффициент магнитомеханической связи K_m , характеризующий эффективность преобразования одного вида энергии в другой. По определению

$$K_m = \sqrt{W_M / W_H},$$

где W_M — упругая механическая энергия; W_H — энергия магнитного поля, вызвавшего деформацию материала и появление упругой энергии. Можно показать, что

$$K_m = \sqrt{\mu \delta^2 E},$$

причем μ и δ являются функцией намагниченности.

Для более эффективной работы магнитострикционных излучателей задают постоянное магнитное поле смещения, пропуская постоянный ток через вспомогательную катушку. Смещающее поле выполняет и другую функцию. При отсутствии смещения частота механических колебаний равна удвоенной частоте возбуждения тока, так как магнитострикционный эффект не зависит от направления вектора магнитного поля H . При наличии подмагничивания результирующее магнитное поле, изменяющееся в пределах от $H_{\min}$ до $H_{\max}$, не меняет направление. Такое поле называется *пульсирующим*. Поэтому частота механических колебаний равна частоте возбуждающего тока.

Магнитострикционные преобразователи представляют собой сердечник из магнитострикционного материала с обмоткой.

В режиме излучения — энергия переменного магнитного поля, создаваемого в сердечнике протекающим по обмотке током, преобразуется в механические колебания сердечника.

В режиме приема — механические колебания сердечника изменяют его магнитную проницаемость и, следовательно, магнитный поток через обмотку, в которой наводится ЭДС. Последняя регистрируется измерительными приборами.

Для изготовления сердечника применяются следующие материалы:

1. Никель — технологичен, но имеет температуру точки Кюри T_K .
2. Альфер (сплав железа с алюминием) — технологичен.
3. Пермендюр (сплав железа с кобальтом) — обладает высокой температурой Кюри T_K , требует термообработки, придающей материалу необходимые магнитные характеристики.
4. Никель-кобальтовые сплавы.

Преобразователи из указанных материалов применяются для работы на частотах до 40 кГц. При более высоких частотах слишком велики потери за счет токов Фуко.

Для сердечников, работающих на более высоких частотах, применяют:

1. Ферриты.
2. Оксиферы.

Благодаря высокому удельному сопротивлению, эти материалы имеют малые потери из-за токов Фуко.

Магнитострикционные преобразователи позволяют возбуждать продольные и сдвиговые волны в зависимости от взаимной ориентации постоянного и переменного магнитного поля.

Магнитные свойства указанных материалов практически не зависят от дозы ионизирующего излучения, но сами материалы сильно активируются.

Электромагнитный акустический способ возбуждения и регистрации акустических волн

Электромагнитный акустический способ (ЭМА) — получил наибольшее распространение среди бесконтактных способов возбуждения и регистрации акустических колебаний.

Достоинства:

1. Возможность возбуждения и регистрации УЗ волн при высоких температурах — до 1300°C. Существуют системы контроля толщины стенок горячекатаных труб и проката в процессе обработки на прокатных станах.

2. Возможность бесконтактного возбуждения и приема УЗ-колебаний.

Вследствие этого:

- высокая чувствительность преобразователей;
- широкополосность преобразователей;
- возможность возбуждения волн разного типа;
- нечувствительность к качеству поверхности (наличие окалины, краски и т.п.);
- высокая радиационная стойкость преобразователей, например, свойства сердечников из пермендюра не меняются вплоть до набора флюенса быстрых нейтронов 10^{20} см⁻².

Недостатки:

1. Громоздкость преобразователей.

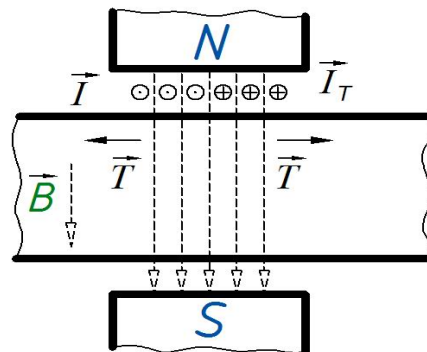
2. Меньшая чувствительность по сравнению с пьезопреобразователями.

Работа ЭМА-преобразователей основана на использовании следующих эффектов:

- магнитострикции;
- магнитного взаимодействия;
- электродинамического взаимодействия.

Магнитострикцию и магнитоупругий эффект уже рассмотрели.

Магнитное взаимодействие заключается во взаимном притяжении и отталкивании ферромагнитного материала и проводника (катушки) с переменным электрическим полем



Под действием постоянного магнитного поля изделие намагничивается. Катушка с переменным током J будет попеременно притягиваться и отталкиваться от изделия в зависимости от направления создаваемого ею магнитного поля H , причем усилие взаимодействия пропорционально векторному произведению $T \sim \{J \times B\}$. Притяжение и отталкивание катушки будет оказывать обратное механическое воздействие на контролируемый объект, что приводит к возбуждению упругих колебаний. Силы, возбуждающие колебания, сосредоточены в приповерхностном слое материала, где находится магнитный полюс намагниченного объекта.

При колебаниях поверхности объекта контроля происходит сближение и удаление объекта от катушки. При этом изменяется магнитное поле, пронизывающее катушку, что приводит к наведению в ней регистрируемой ЭДС. Таким образом, регистрируются колебаний контролируемого объекта.

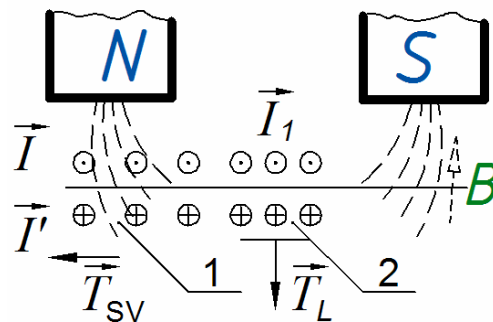
Электродинамическое взаимодействие заключается в следующем. В приповерхностном слое токопроводящего материала переменным магнитным полем катушки возбуждаются вихревые токи. Эти токи, взаимодействуя с постоянным магнитным полем в объекте, описываемым вектором магнитной индукцией B , приводят к колебаниям электронного газа. За счет электрического взаимодействия электронный газ передает колебания решетке положительных ионов. Например, вихревые токи направлены перпендикулярно плоскости рисунка, а сила $T \sim \{J \times B\}$ параллельно поверхности изделия. В результате возбуждается волна, поляризованная вдоль радиуса. Вихревые токи распределены в слое конечной толщины, поэтому и силы, возбуждающие колебания, сосредоточены в этом слое, причем с увеличением частоты тока из-за скин-эффекта толщина этого слоя уменьшается.

Обратный эффект — упругая волна приводит к смещению ионов решетки относительно положения равновесия. За счет электрического взаимодействия ионов с электронами электронного газа в материале возникает переменный ток и соответствующее переменное магнитное поле. Последнее пронизывает измерительную катушку и приводит к появлению в ней ЭДС, которая регистрируется измерительными приборами.

Эффекты магнитострикции и магнитного взаимодействия позволяют возбуждать продольные УЗ-волны как в ферромагнитных металлах, так и в магнитодиэлектриках. За счет эффекта магнитострикции при определенной ориентации подмагничивающего и переменного полей можно возбуждать поперечные волны.

За счет электродинамического эффекта можно возбуждать волны разных типов в любых токопроводящих материалах. В ферромагнитных материалах, например в железе, имеют место все три эффекта. В ферромагнитных материалах продольные волны возбуждаются хуже, так как силы электродинамического и магнитного взаимодействия направлены противоположно и компенсируют друг друга.

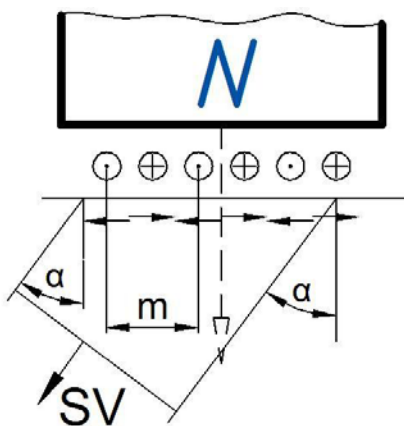
При проектировании ЭМА следует иметь в виду, что при электродинамическом взаимодействии $\mathbf{T} \sim \{\mathbf{J} \times \mathbf{B}\}$, то есть направление колебаний в волне перпендикулярно векторам $\mathbf{J}$, так и $\mathbf{B}$. Продольные и поперечные волны можно возбуждать отдельно, располагая катушки под участками магнитного поля с единственной нормальной или касательной составляющей по отношению к поверхности объекта контроля



Чтобы возбудить волну под углом α к поверхности объекта, необходимо обеспечить сдвиг фаз между проводниками катушки. Если m — расстояние между витками, ток в которых находится в одинаковой фазе, то

$$m \sin \alpha = \lambda_t,$$

где λ_t — длина поперечной волны.



Кроме того, ЭМА-преобразователи позволяют возбуждать волны Рэлея и Лэмба, если расстояние между проводниками с одинаковым фазой тока сделать равным соответствующим длинам волн.

Оценки чувствительности показывают, что чувствительность ЭМА-преобразователей примерно в 100 раз меньше чувствительности пьезопреобразователей. Поэтому ЭМА используются там, где нет необходимости в высокой чувствительности контроля.

В литературе приводятся данные о максимальной чувствительности установок с ЭМА-преобразователями, позволяющими выявлять искусственные дефекты диаметром 3 мм на глубине 150...200 мм от поверхности объекта контроля.