

Лекция 23

Помехи при контроле феррозондовым дефектоскопом

Наиболее существенными факторами, являющимися источником помех являются:

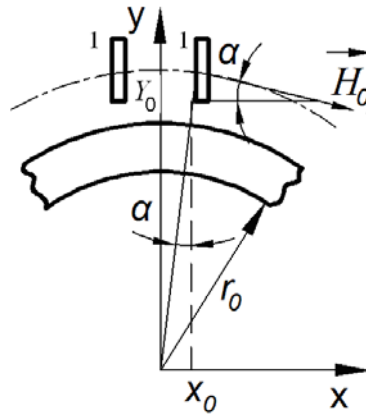
- 1) пространственная неоднородность магнитных свойств изделий;
- 2) изменение взаимного расположения преобразователя и контролируемого изделия;
- 3) промышленные помехи;
- 4) нестабильность элементов электронных схем дефектоскопа.

Неоднородность магнитных свойств. Контроль проводится в приложенном или остаточном магнитном поле. В обоих случаях основным фактором, ограничивающим порог реагирования измерительной аппаратуры, является неоднородность магнитных свойств, вызванная неоднородностью структуры материала или изделия и локальным наклепом металла.

Локальный наклеп, особенно в малоуглеродистых и легированных сталях, приводит к появлению резких неоднородностей магнитных свойств, создающих при остаточной намагниченности поля рассеяния, близкие по величине и распределению в пространстве к полям рассеяния от дефектов. Значительное изменение магнитных свойств особенно сильно проявляется в области слабых и средних полей. Отсюда следует, что для снижения уровня помех от локальных наклепов контроль изделий необходимо проводить в сильном приложенном поле.

Однако контроль в приложенном поле приводит к тому, что на феррозонд действует не только поле дефекта, но и само намагничивающее поле. В результате на выходе феррозонда создается сильный фон, который может привести к существенному снижению чувствительности феррозонда и появлению *ложных* сигналов.

Помехи из-за изменения положения преобразователя и изделия. Такие сигналы возникают при изменении положения феррозонда относительно изделия. Для иллюстрации причины появления помех рассмотрим контроль трубки градиентометрическим феррозондом.



Элементы градиентометрического феррозонда 1 параллельны и их ось симметрии перпендикулярна поверхности трубы. Труба намагничивается циркулярно и напряженность поля в центре феррозонда с координатами $(x_0; y_0)$ равна H_0 . На феррозонд действует только составляющая поля H_y :

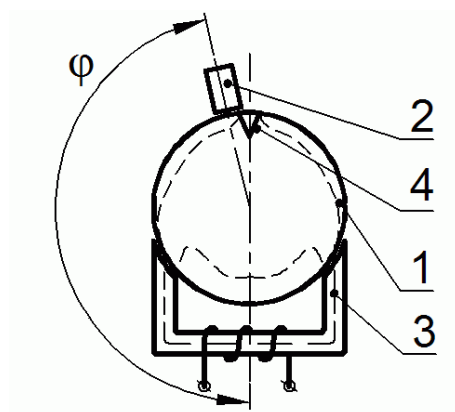
$$H_y = H_0 \sin \alpha = H_0 x_0 / \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$$

Оценим порядок величины H_y . Если $x_0 = 0,15$ см; $y_0 = 2,2$ см; $z_0 = 2$ см. Пусть H_0 у поверхности изделия равно 80 А/см, что соответствует току 1000 А, тогда $H_y = 5,5$ А/см и на феррозонд градиентометра действует разность полей $\Delta H_0 = 2H_y = 11$ А/см.

Поверхностная трещина глубиной $0,3$ мм дает при токе по трубе 1000 А усредненную по высоте 5 мм направленность поля рассеяния около $0,75$ А/см. С другой стороны изменение координаты x_0 феррозонда на ± 1 мм приводит к изменению поля $\Delta H'_y = \pm 6$ А/см, что дает сигнал, на порядок превышающий сигнал от дефекта.

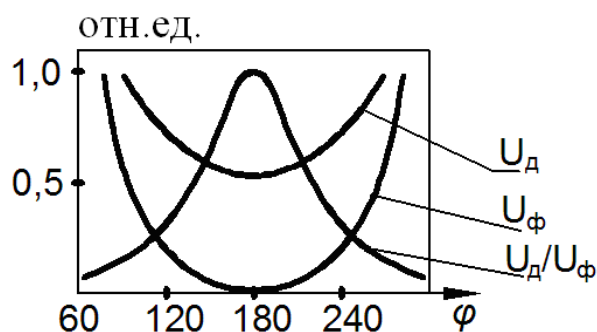
С целью снижения этого рода помех в феррозондовых дефектоскопах применяют различные системы ориентации и стабилизации положения феррозонда относительно изделия. Чаще всего это механические системы в виде роликов или износостойчивых прокладок, помещаемых между феррозондом и изделием. Радикальный способ — контроль в остаточном поле, однако при этом необходимо помнить о влиянии наклепа.

Контроль в приложенном поле в современных автоматизированных дефектоскопах часто реализуется при поперечном намагничивании протяженного контролируемого изделия вращающимся электромагнитом.



1 – изделие; 2 – феррозонд;
3 – электромагнит; 4 – дефект

Для получения минимального фона от постоянного поля H_0 феррозонд следует помещать как можно дальше от полюсов электромагнита и ориентировать его ось в направлении, перпендикулярном H_0 .



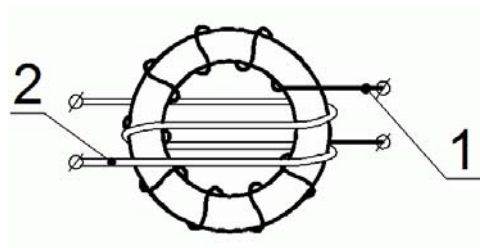
На этом рисунке показана зависимость напряжения фона, дефекта и их отношения от взаимного углового положения электромагнита и преобразователя. Наибольшее отношение сигнал/шум достигается при $\varphi = 180^\circ$.

Так как поле рассеяния дефекта локализовано в малых объектах над поверхностью изделия, феррозондовые преобразователи должны иметь малые размеры. В настоящее время используют феррозондовые преобразователи двух типов:

а) с двумя параллельными пермалоевыми сердечниками диаметром 0,1 мм и длиной 2 мм, расположенными на расстоянии 1-2 мм друг от друга;

б) с кольцевым сердечником (как в вычислительной технике).

В этом случае эффективный объем феррозонда может быть сделан близким к объекту, занимаемому полем рассеяния дефекта. Так существует феррозонд с наружным диаметром 0,8 мм и высотой 0,3 мм.



Обмотка возбуждения *1* (первичная) состоит из нескольких витков, а сигнальная (вторичная) *2* намотана по диаметру сердечника. Чувствительность феррозонда при токе возбуждения $0,65\text{ А}$ и уровне фона $10\text{--}30\text{ мВ}$ составляет $15\text{ мВ}\cdot\text{см}/\text{А}$.

С **промышленными помехами** и помехами, обусловленными **нестабильностью элементов электронных схем** дефектоскопа, борются традиционными методами.

Таким образом, все способы повышения помехозащищенности феррозондовых дефектоскопов можно разделить на *три группы*:

1. Конструктивные — реализуются при разработке конструкции преобразователя и намагничивающего устройства (максимальное удаление от намагничивающих полюсов, регистрация нормальной составляющей поля; стабилизация зазора);
2. Схемные — реализуются при разработке электронных блоков дефектоскопов.
3. Логические — реализуются за счет разработки специальных алгоритмов обработки информации.

Феррозондовые дефектоскопы позволяют выявлять дефекты на наружной поверхности величиной $0,15\ldots 0,2\text{ мм}$, а на глубине порядка 8 мм — $0,2\ldots 0,3\text{ мм}$. Скорость контроля — $1\ldots 1,5\text{ м/с}$. Феррозондовые дефектоскопы по функциональному назначению, области применения и основным техническим характеристикам подобны индукционным дефектоскопам. Высокая чувствительность феррозондовых дефектоскопов может быть реализована только при контроле «малозумящих» изделий с чистой поверхностью и при хорошей стабилизации взаимного положения преобразователя и изделия.

Применение магнитных методов контроля в энергетическом комплексе

Магнитные методы и приборы в настоящее время широко используются для оценки качества изделий после различных упрочняющих обработок (отжиг, закалка, отпуск, поверхностное упрочнение, пластическая деформация и др.), а так же начинают применяться для анализа изменений напряженного и структурного состояний и физико-механических свойств

в ферромагнитных изделиях в процессе эксплуатации. Производство приборов и установок, реализующих магнитные методы, составляет примерно 17% от общего числа приборов для неразрушающего контроля и диагностики состояния материалов и изделий.

С помощью магнитных или магнитоупругих методов в ряде случаев можно осуществлять контроль такой важной характеристики изделий и действующих конструкций, как уровень макро- и микронапряжений. В настоящее время существует широкий спектр преобразователей, в том числе матричных, позволяющих снимать информацию с достаточно большой площади поверхности объекта контроля. С использованием таких преобразователей связано важное направление магнитной дефектоскопии — восстановление образа дефекта по его магнитному полю. Микродатчики Холла дают возможность измерения магнитного потока рассеяния от трещин на поверхности контролируемого объекта. При этом одним из эффективных подходов является представление поля в виде ряда гармонических полиномов, что соответствует разложению функции в ряд Тейлора. Такое представление является удобным в связи с тем, что коэффициенты разложения (или их комбинации) содержат информацию об источнике магнитного поля и могут рассматриваться как признаки при его идентификации и дефектометрии.

Для контроля промышленных изделий и элементов конструкций разработаны различные типы магнитных приборов: для контроля качества объемной и поверхностной термических обработок, механических свойств проката и изделий — коэрцитиметры и многофункциональные структуроскопы; для оценки структуры и фазового состава сталей или пористости металлокерамических изделий — дифференциальные магнитные структуроскопы. В приборах предусмотрено использование как проходных преобразователей — для контроля малогабаритных изделий, так и накладных преобразователей (приставных электромагнитов) для контроля любых изделий, размеры которого превышают площадь накладного преобразователя.

При протекании процессов, предшествующих разрушению металла, в зонах концентрации напряжений происходит изменение намагниченности металла. Это послужило основой для создания метода диагностики, основанного на магнитной памяти металла. На контролируемом участке измеряют нормальную составляющую напряженности магнитного поля рассеяния H_p . Если на контролируемой поверхности обнаруживается участок, где меняется знак H_p , ему уделяется дополнительное внимание как потенциально опасному участку.

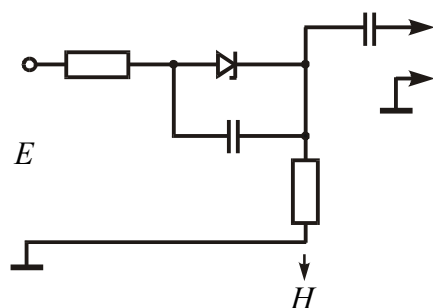
Разработаны сканеры магнитного поля для систем визуализации дефектов, которые во многом свободны от указанных выше недостатков. Их работа основана на электронном сканировании приповерхностных магнитных полей с помощью матрицы магниточувствитель-

ных элементов при перемещении матрицы относительно поверхности объекта. В качестве магниточувствительных элементов использованы гальваномагнитные преобразователи: датчики Холла, мостовые тонкопленочные, магниторезисторы и двухстоковые полевые или двухколлекторные биполярные магнитотранзисторы.

Основные технические характеристики гальваномагнитных сканеров: чувствительность к магнитному полю рассеяния 300 Ом/Тл; динамический диапазон — от 1 до 1000 мТл; разрешающая способность — до 10 мкм); количество элементов в строках матрицы — до 128; потребляемая мощность — 0,1 мВт; габаритные размеры — 90×60×20 мм.

Применение в качестве магниточувствительных элементов магнитотранзисторов позволяет использовать метод частичной дешифрации элементов матрицы, что дает возможность упростить их коммутацию и снизить затраты на аппаратуру аналогового мультиплексирования. При использовании датчиков Холла и магниторезисторов можно добиться максимальной чувствительности сканера, что позволяет ему работать в режиме, когда объект контроля не намагничен до насыщения.

Из последних наиболее интересных, по нашему мнению, разработок отметим высокочувствительный измеритель магнитного поля, конструкция которого отличается простотой и представлена на рисунке.



Упрощенная схема датчика магнитного поля с использованием полоски аморфного металла

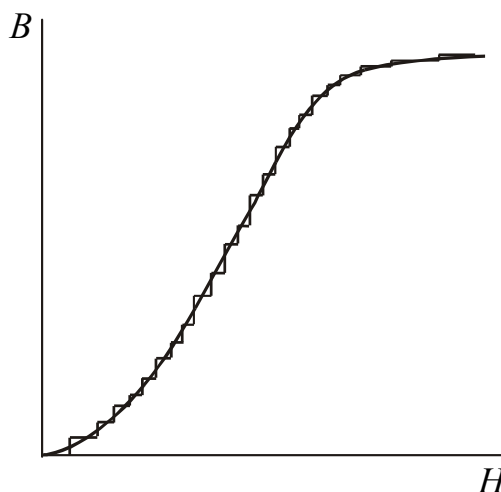
Последовательно включенные источник питания напряжением 20...200 мВ, туннельный диод (в проводящем направлении), шунтированный конденсатором, полоски из аморфного металла образуют автоколебательную систему. Генерируемое напряжение снимается с точки между диодом и полоской. Измеряется поле вдоль длины полоски. Эффект изменения частоты автоколебаний предположительно возникает от разного намагничивания током, протекающим через диод, кромки и объема полоски. Частота автоколебаний составляет около 110 МГц.

Спектральная плотность шума — около 200 мкВ/Гц^{1/2} вблизи нулевой частоты, 70 мкВ/Гц^{1/2} — на частоте 100 Гц, что при чувствительности 360 кВ/Тл приводит к уровню магнитных шумов около 300 пТл/Гц^{1/2}. Крутизна преобразования датчика равна 110

ГГц/Тл при частоте модуляции 233 Гц и индукции магнитного поля 250 мкТл. Крутизна преобразования при измерении изменения индуктивности 0,03% /мкТл, при измерении величины сопротивления цепи — примерно в 2 раза выше. В целом чувствительность датчика примерно на порядок выше, чем у коммерческого холловского магнитометра среднего класса стоимостью 8000 DM при измерении амплитуды магнитного поля 180 мкТл на частоте 233 Гц. В экспериментах на опытных образцах крутизна по индуктивности составила 0,2% /мкТл, по сопротивлению — вдвое меньше.

Перспективным представляется применение методик, основанных на силовых взаимодействиях в магнитных полях, когда исследуемый объект является составляющей частью поля, нарушающей его однородность. Основными преимуществами такого подхода являются высокая чувствительность, помехоустойчивость измерительных цепей к влиянию внешних магнитных полей, возможность достаточно простой компенсации погрешностей при варьировании намагничивающего поля в широких пределах. Последние два фактора особенно важны при контроле реальных объектов, содержащих примеси железа и других ферромагнитных веществ.

Магнитно-шумовой метод. Магнитный шум (шум Баркгаузена) проявляется при намагничивании ферромагнитных материалов, к числу которых относится наиболее широко распространенный конструкционный материал — сталь (заметим, что большинство нержавеющей сталей немагнитны). Намагничивание ферромагнетиков происходит за счет переориентации вдоль приложенного магнитного поля относительно крупных структурных образований в материале — магнитных доменов, при отсутствии внешнего поля или остаточной намагниченности имеющих случайную ориентацию. По мере увеличения приложенного поля все большее количество доменов скачкообразно ориентируется в направлении напряженности поля, намагниченность также меняется скачкообразно. Если на намагничиваемое тело (например стержень) намотать катушку, то указанные скачки приведут к возник-



Характер намагничивания ферромагнитного материала (H — напряженность магнитного поля, B — его индукция)

новению в ней шумовой ЭДС, которая может быть зарегистрирована и проанализирована известными методами.

До настоящего времени применение шума Баркгаузена не получило широкого распространения из-за трудности получения однозначных зависимостей между измеряемыми и контролируемыми параметрами, что обусловлено влиянием на шумовую ЭДС большого числа структурных факторов материала, зависящих от термообработки, наклепа, предыдущего намагничивания и т. д. Например, содержание 0,0035% водорода в конструкционной стали 15Г увеличивает уровень (среднеквадратическое значение) шума на 10 ... 15%.

Обнаружено, что шумы Баркгаузена наиболее интенсивно проявляют себя на границе дефекта в области концентрации напряжений. Поэтому использование концентраторов магнитного потока позволяет достаточно точно определить местоположение дефекта. Магнитный шум наблюдали также при электрохимическом растворении металлов.

Скачку Баркгаузена объема V (объем, преодолеваемый границей домена при единичном скачке) соответствует энергия, определяемая соотношением

$$V \overline{H^2} / 8\pi = kT/2,$$

где $\overline{H^2}$ — дисперсия величины магнитного поля вблизи границы домена, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура. Величина V составляет от 10^{-11} до 10^{-6} см³.

Наиболее интенсивны попытки применения магнитного шума для определения внутренних напряжений в материалах конструкций. Для стали 20 и 17ГТС уровень магнитного шума возрастает с ростом растягивающих напряжений вплоть до предела текучести, причем в широкой области изменения напряжений полученные зависимости линейны. В трансформаторной стали скачки сопровождаются деформацией порядка 10^{-9} см³.

Как и в случае акустической эмиссии, можно выделить два класса сигналов — относительно редких с большой амплитудой и множество мелких скачков, создающих непрерывный шумовой сигнал.

После резкого изменения внешнего магнитного поля могут наблюдаться запаздывающие скачки Баркгаузена с временем запаздывания до 30 с.

Поскольку шумы Баркгаузена экранируются собственными вихревыми токами, высокочастотный шум характеризует состояние поверхностных слоев.

С магнитным шумом связан *акустический шум Баркгаузена* — упругая волна, излучаемая при резком изменении поля упругих напряжений при динамическом взаимодействии стенок доменов с дефектами, а также связанная с магнитострикцией, обусловленной поворотом доменов.

Метод магнитных шумов является одним из шумовых методов, которые используют для диагностики объектов в сочетании с другими методами, в частности шумовыми. Преимущество всех магнитных методов вообще — возможность дистанционного измерения без непосредственного контакта с контролируемым объектом.