

## Лекция 21

# МАГНИТНЫЕ И ВИХРЕТОКОВЫЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

## Магнитные методы контроля

К *магнитным и электромагнитным (вихретоковым)* методам НК относятся методы контроля различных характеристик изделий, основанные на использовании магнитных и электромагнитных полей для передачи информации о контролируемых параметрах от изделия к измерительной аппаратуре.

**Область применения.** *Магнитные методы* применяются для контроля изделий из ферромагнитных материалов типа проволоки, прутков, труб и листов с целью обнаружения в них трещин, непроваров, шлаковых включений, скоплений пор и других дефектов, выходящих на поверхность изделий или лежащих на небольшой глубине под поверхностью.

Магнитные методы можно разделить на две большие группы:

**I.** Магнитные методы, основанные на регистрации полей рассеяния дефектов намагниченного объекта.

К этой группе относятся:

1. *Магнитопорошковый метод*, основанный на применении ферромагнитного порошка или магнитной суспензии, которыми покрывают предварительно намагниченный объект.

Ферромагнитные частицы порошка размером 0,1-60 мкм или суспензии размером 5-10 мкм под действием полей рассеяния собираются вблизи дефектов и образуют, так называемый, индикаторный рисунок, который указывает о присутствии дефекта.

2. *Магнитографический метод* основан на применении в качестве индикатора полей рассеяния ферромагнитной пленки, которая накладывается на поверхность намагниченного объекта. Полученную запись считывают с помощью магнитных головок. Этот метод применяют для контроля сварных швов трубопроводов.

3. *Магнитоферрозондовый метод*. В качестве первичных преобразователей используют феррозонды — магнитные усилители, в которых под действием внешнего поля возникают четные гармоники сигнала в измерительной катушке. Метод обладает высокой чувствительностью и используется для автоматизированного контроля.

4. *Индукционный метод* основан на регистрации магнитного поля рассеяния дефекта движущейся катушкой, в которой индуцируется ЭДС.

5. *Магнитный метод* основан на измерении силы притяжения постоянного магнита к поверхности изделия и применяется для измерения толщины немагнитных покрытий.

**II.** Магнитные методы, основанные на определении магнитных свойств объекта контроля такие как коэрцитивная сила, остаточная индукция и магнитная проницаемость материала.

**Особенностями** магнитных методов являются

1. Высокая производительность контроля.
2. Возможность сравнительно простой автоматизации процесса контроля.
3. Простота, малые габариты и недорогое оборудование.

### **Основные характеристики магнитных материалов**

1. *Намагниченность* ферромагнетика или плотность магнитного момента —  $I$

$$I = M/V,$$

где  $M$  — магнитный момент объема  $V$ .

2. *Магнитная индукция* —  $B$

$$B = \mu_0 (H + I),$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  — магнитная постоянная;  $H$  — внешнее магнитное поле.

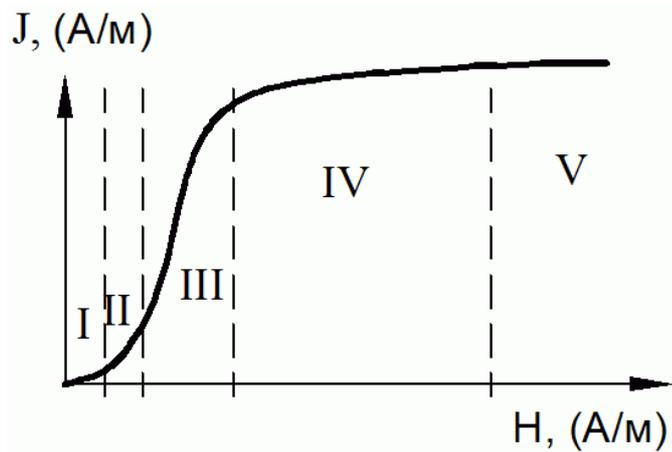
3. *Магнитная восприимчивость* —  $\chi$ .

Полагают, что  $I \sim H$ , тогда  $I = \chi H$ , откуда

$$B = \mu_0 (1 + \chi) H.$$

4. *Магнитная проницаемость* —  $\mu = \mu_0 (1 + \chi)$ .

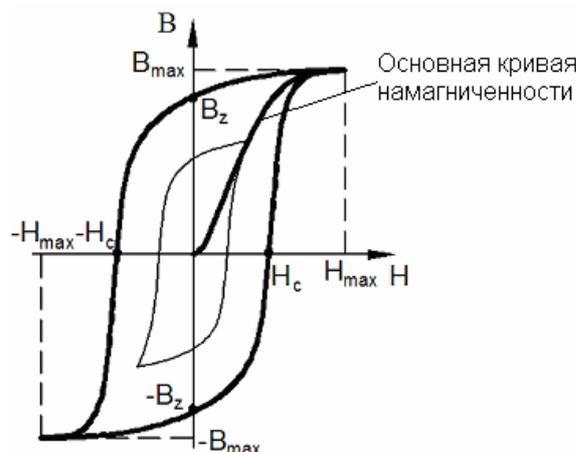
Отношение  $\mu/\mu_0 = 1 + \chi$  называется *относительной магнитной проницаемостью*. В общем случае намагниченность нелинейно зависит от внешнего магнитного поля  $H$ , то есть  $\chi = \chi(H)$ . Кривая намагничивания имеет следующий вид



На кривой намагничивания можно выделить несколько участков:

- I — область начального (обратимого) намагничивания ( $\mu = \text{const}$ );
- II — область Релея;
- III — область наибольших проницаемостей;
- IV — область приближения к насыщению;
- V — область парапроцесса.

Если после намагничивания уменьшать намагничивающее поле  $\mathbf{H}$  и менять его направление, то наблюдается *гистерезис*.



Наибольшая петля гистерезиса называется *предельной петлей* (указана жирной линией). Если первоначальное намагничивание невелико, то при уменьшении и изменении направления  $\mathbf{H}$  наблюдаются *частные* петли гистерезиса. Различают следующие параметры предельной петли:

1.  $H_c$  — коэрцитивная сила;
2.  $B_z$  — остаточная индукция.

Важной характеристикой является *основная* кривая намагниченности. Для основной кривой намагниченности вводятся следующие понятия:

1. Абсолютная магнитная проницаемость:

$$\mu' = B/H\mu_0 = (1 + \chi).$$

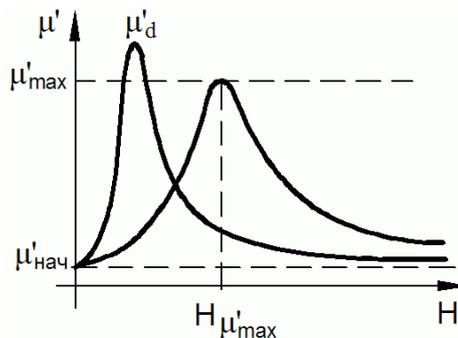
2. Начальная магнитная проницаемость:

$$\mu'_{нач} = \lim_{H \rightarrow 0} B/\mu_0 H.$$

3. Максимальная магнитная проницаемость —  $\mu'_{max}$ .

4. Дифференциальная магнитная проницаемость:

$$\mu'_d = (1/\mu_0) dB/dH = \mu' + H \cdot d\mu'/dH.$$

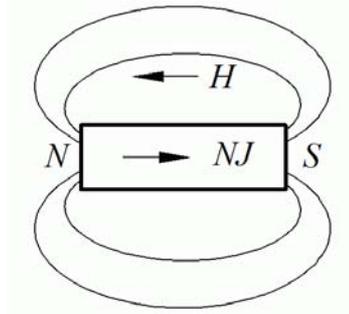


Все рассмотренные характеристики являются характеристиками материала, и описывают процессы намагничивания в бесконечных средах. В первом приближении эти характеристики можно использовать также для однородных магнитных цепей замкнутой формы, например, в форме кольца. Для тел разомкнутой формы имеет место неодинаковая намагниченность по объему тела, так что  $\mathbf{I}$  и  $\chi$  являются функциями координаты.

Поле внутри изделия, например бруска, можно представить в виде

$$H_{вн} = H - N I_1,$$

где  $N$  — коэффициент размагничивания или размагничивающий фактор;  $\mathbf{H}$  — внешнее поле;  $I_1$  — намагниченность.



Такая зависимость обусловлена тем, что на границах изделия возникают магнитные полюса, и силовые линии магнитного поля замыкаются через окружающее пространство. Поскольку для бесконечной среды  $\mu' = B/\mu_0 H_{\text{вн}}$ ,  $I = \chi H_{\text{вн}}$  и  $H \equiv H_{\text{вн}}$ , то для магнитной проницаемости тела можно записать

$$\mu'_T = B/\mu_0 H = B/\mu_0 (H_{\text{вн}} + NI) = B/\mu_0 (H_{\text{вн}} + N\chi H_{\text{вн}}) = B/\mu_0 H_{\text{вн}} (1 + N(\mu' - 1)),$$

таким образом,

$$\mu'_T = \mu' / (1 + N(\mu' - 1)).$$

Если  $\mu' \rightarrow \infty$ , то

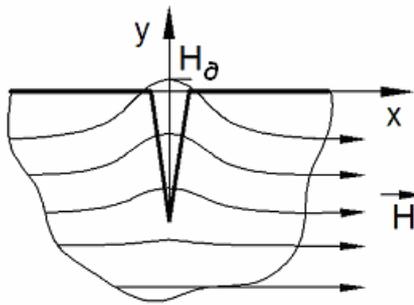
$$\mu'_T = 1/N = \mu'_\phi,$$

где  $\mu'_\phi$  — магнитная проницаемость формы. В частности, для стержня круглого сечения, введя обозначение  $\lambda = l/D$ ,  $l$  и  $D$  — соответственно длина и диаметр стержня,  $\mu'_\phi$  имеет вид

$$\mu'_\phi = \lambda^2 / (\ln 2\lambda - 1).$$

### Магнитное поле дефектов

Если в сечении детали имеется трещина или другая неоднородность, то на поверхности также образуются магнитные полюсы, которые создают поле рассеяния  $H_\delta$ . Это поле тем больше, чем больше дефект и чем ближе он к поверхности, над которой проводится измерение.



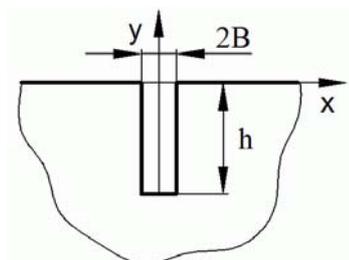
По величине и пространственному распределению  $H_0$  в принципе можно судить о величине и расположении дефекта. Но необходимо отметить, что установить точную взаимосвязь  $H_0$  с геометрическими параметрами дефектов и магнитными характеристиками изделий в аналитической форме, как правило, не представляется возможным. Для оценки этой связи пользуются различными моделями и приближениями.

Для регистрации  $H_0$  используют индикаторы двух типов:

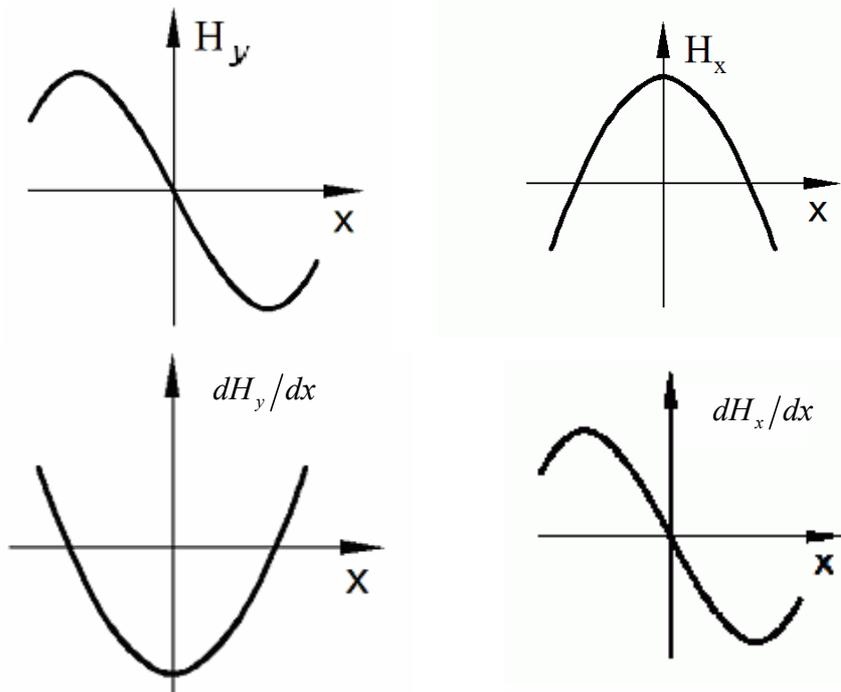
1. Полемеры — для считывания магнитного поля.
2. Градиентометры — для регистрации разности напряженности поля в двух соседних точках в направлении перемещения индикатора.

По этой причине для анализа  $H_0$  используют нормальную  $H_y$  и касательную составляющие поля  $H_x$  и их производные  $dH_y/dx$  и  $dH_x/dx$  по направлению перемещения индикатора.

При анализе полей рассеяния дефект представляется в идеализированной форме, например, в виде выреза прямоугольной формы сечения глубиной  $h$  и шириной  $2b$ .



Для указанного дефекта зависимость  $H_y$ ,  $H_x$  и их производных имеет вид:



## Способы намагничивания объектов контроля

Обязательным во всех магнитных методах является намагничивание объекта контроля. Для этого применяют:

- постоянный ток;
- переменный ток;
- импульсный ток.

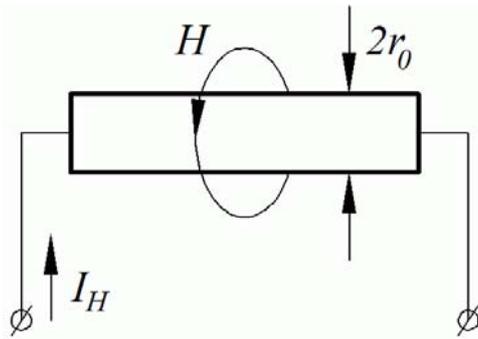
Для создания оптимальных условий выявления дефектов применяют четыре способа намагничивания:

1. Циркулярное.
2. Полюсное:
  - 2.1. Продольное;
  - 2.2. Поперечное.
3. Комбинированное.

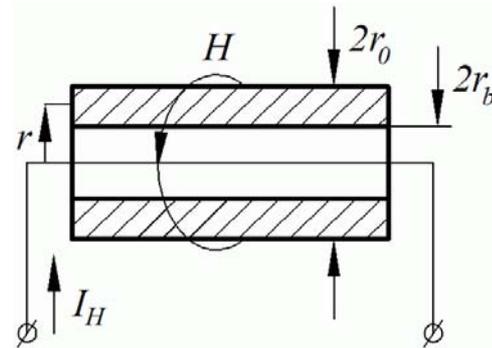
Выбирают тот способ намагничивания, который обеспечивает наилучшее выявление характерных дефектов в испытываемых деталях. Дефекты хорошо обнаруживаются, когда направление намагничивания перпендикулярно направлению дефекта.

Рассмотрим эти методы:

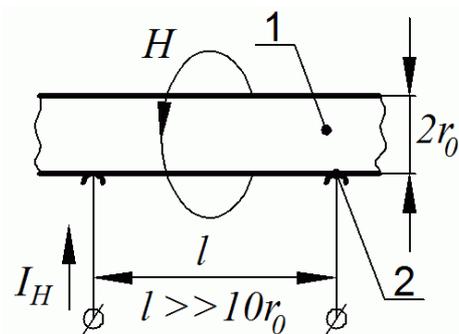
1. *Циркулярное намагничивание* — осуществляют пропуская ток по контролируемой детали или по проводнику, проходящему через отверстие в детали.



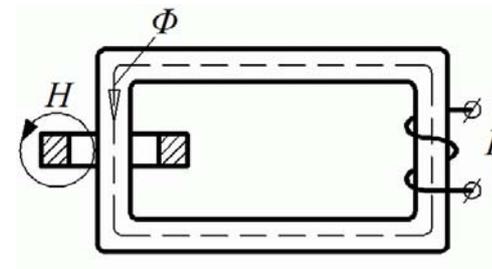
$$H = I_n r / 2\pi r_0^2$$



$$H = I_n (r^2 - r_b^2) / 2\pi r (r_0^2 - r_b^2)$$



$$H = I_n r / 2\pi r_0^2$$

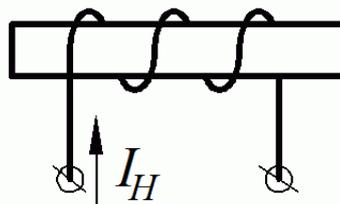
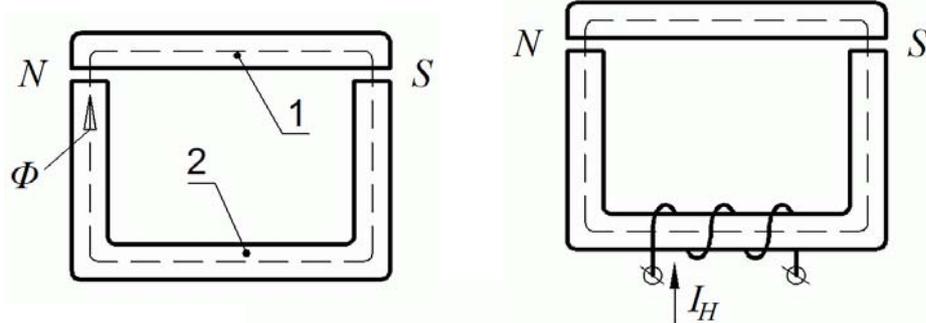


Величина намагничивающего тока составляет  $I_n \approx 1,5 \cdot 10^4 \text{ A}$ , при импульсном намагничивании —  $I_n \approx 2 \cdot 10^4 \text{ A}$ .

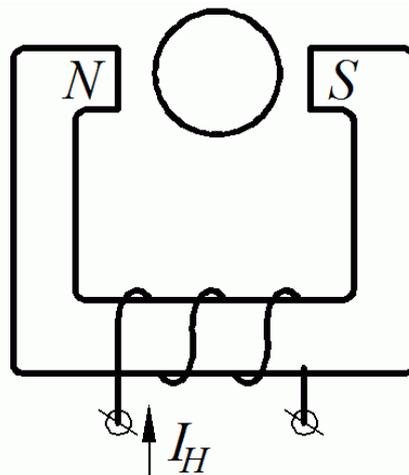
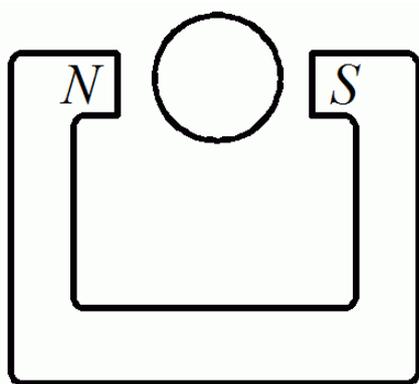
2. *Полюсное намагничивание* осуществляется с помощью постоянных магнитов и электромагнитов:

- намагничивание вдоль наибольшего размера детали – *продольное*;
- намагничивание вдоль наименьшего размера детали – *поперечное*.

В обоих случаях на краях детали образуются полюсы, создающие размагничивающее поле обратного направления.



продольное

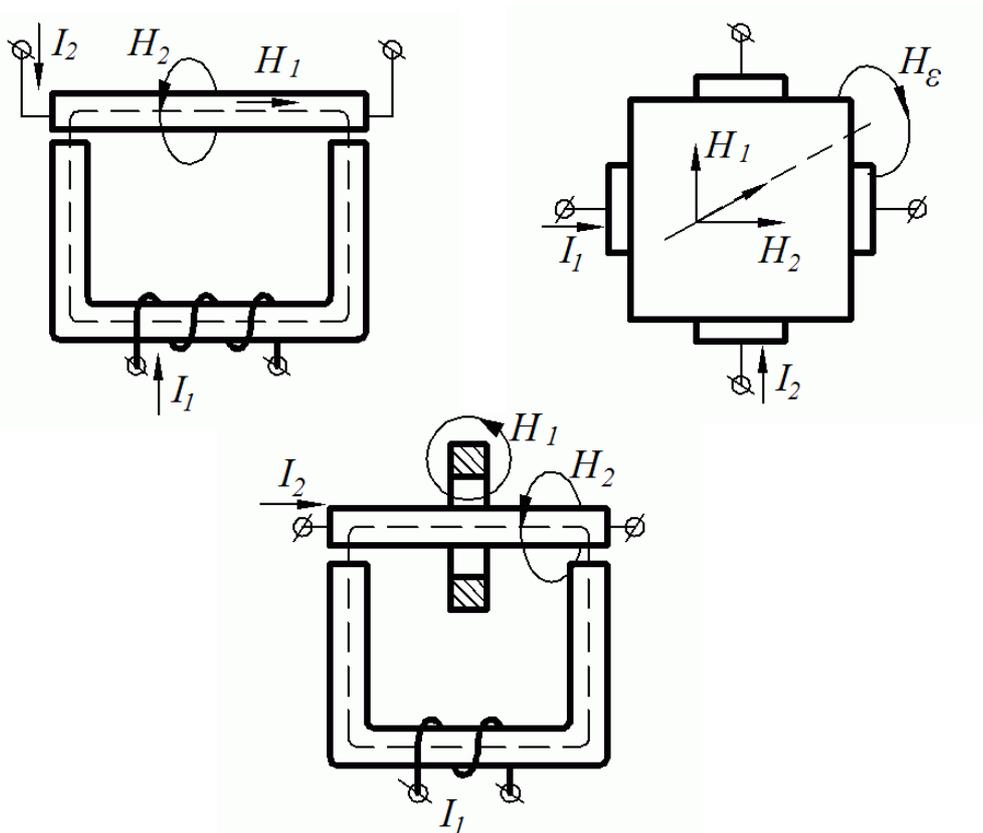


поперечное

### 3. Комбинированное намагничивание.

Если известно, что дефекты в проверяемых деталях имеют различную ориентацию, то для таких деталей следует применять комбинированное намагничивание, так как ни один из вышеуказанных способов не обеспечивает требуемого направления поля по отношению ко всем дефектам.

Комбинированное намагничивание осуществляют несколькими полями, различно ориентированными в пространстве и отличающимися законами изменения во времени. Результирующий вектор  $\mathbf{H}$  можно по разному ориентировать в пространстве и изменять во времени, так чтобы вероятность выявления дефектов была максимальной.



В последнем случае  $I_1$  и  $I_2$  сдвинуты по фазе на  $90^\circ$ , так что результирующее поле  $H_2$  является вращающимся.

### Размагничивание деталей

Многие детали после контроля необходимо размагнитить. Существует два основных способа размагничивания:

1. Нагрев до температуры  $T$  больше точки Кюри.
2. Помещение в переменное поле, убывающее от максимального значения равного  $H_{max}$  в детали, до нуля.

Первый способ применяется редко, так как при этом ухудшаются механические характеристики металлических объектов. Во втором случае частота  $f$  тока составляет  $0,1 \dots 50$  Гц. Чем толще деталь, тем ниже частота тока и соответственно магнитного поля. Если  $H_c = 10 \dots 15$  А/см, то при  $f = 50$  Гц толщина размагничиваемых деталей составляет  $h = 2 \dots 5$  мм; при  $f = 1$  Гц —  $h$  до 30 мм.