

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) ВУ (11) 14145

(13) С1

(46) 2011.04.30

(51) МПК (2009)

G 01N 27/72

(54) СПОСОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ В ИЗДЕЛИИ ИЗ ИЗВЕСТНОГО ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕГО МАТЕРИАЛА, А ТАКЖЕ ЕГО ТОЛЩИНЫ И ПАРАМЕТРОВ ДЕФЕКТОВ В НЕМ

(21) Номер заявки: а 20081685

(22) 2008.12.24

(43) 2010.08.30

(71) Заявитель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(72) Авторы: Дорошевич Елена Сергеевна; Павлюченко Владимир Васильевич (ВУ)

(73) Патентообладатель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(56) ВУ а20060199, 2007.

ВУ 11265 С1, 2008.

RU 2118816 С1, 1998.

EP 1709390 А1, 2006.

JP 58083252 А, 1983.

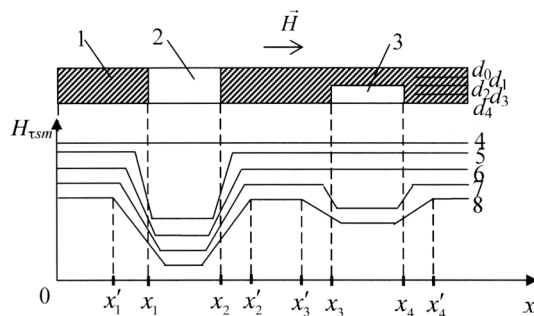
(57)

1. Способ электромагнитного контроля распределения величины удельной электропроводности в изделии из известного электропроводящего материала, а также его толщины и параметров дефектов в нем, в котором воздействуют на изделие сериями одиночных импульсов магнитного поля первичного источника в виде полусинусоиды с максимальной величиной напряженности в зоне контроля от $1 \cdot 10^2$ до $1 \cdot 10^5$ А/м, время нарастания $t_{i \max}$ которых устанавливают в пределах от $1 \cdot 10^{-8}$ до $1 \cdot 10^{-2}$ с таким образом, чтобы в результате воздействия импульсами с одним и тем же временем нарастания разрешить контролируемые свойства изделия в слое материала глубиной $d_{i \text{ раз}}$ в соответствии с выражением

$$t_{i \max} = \frac{\beta}{\rho} d_{i \text{ раз}}^2,$$

где β и ρ - коэффициенты, экспериментально полученные для данного материала, вплоть до полной толщины изделия, для которой задают время нарастания $t_{m \max}$ в соответствии с выражением

$$t_{m \max} = \frac{d_{m \text{ пред}}}{\rho},$$



Фиг. 2

ВУ 14145 С1 2011.04.30

где $d_{m \text{ пред}}$ - экспериментально найденная предельная толщина изделия, при которой выполняется линейная зависимость максимальной тангенциальной составляющей напряженности $H_{\tau \text{ sm}}$ магнитного поля, созданного индукционными токами в материале изделия, от его толщины d , измеряют по точкам на поверхности изделия величины максимальных тангенциальных составляющих $H_{\tau \text{ m}}$ напряженности магнитного поля, по которым путем вычитания из них величин максимальных тангенциальных составляющих $H_{\tau \text{ 0m}}$ напряженности магнитного поля первичного источника находят величины $H_{\tau \text{ sm}}$ в каждой точке, строят зависимости величины $H_{\tau \text{ sm}}$ от координат x и y в плоскости поверхности изделия, затем сравнивают их с аналогичными эталонными зависимостями величины $H_{\tau \text{ sm}}$, полученными заранее при воздействии таких же импульсов на эталонные изделия из того же материала с известной толщиной, распределением удельной электропроводности и с известными параметрами дефектов, и определяют путем указанного сравнения искомые свойства изделия в каждой контролируемой его точке.

2. Способ электромагнитного контроля по п. 1, **отличающийся** тем, что искомые свойства изделия дополнительно определяют по измеренной ширине намагниченных участков поверхности изделия для разных времен нарастания импульсов и по тем временам нарастания импульсов поля, при которых на поверхности изделия начинают появляться магнитные поля участков и дефектов, расположенных на разной глубине, путем сравнения результатов измерения с аналогичными эталонными зависимостями.

Изобретение относится к контрольно-измерительной технике и может быть использовано для контроля качества изделий из электропроводящих материалов.

Известен способ электромагнитного контроля [1], заключающийся в том, что на объект воздействуют электромагнитным импульсным полем в виде последовательности пилообразных импульсов с равными амплитудами и регистрируют параметры взаимодействия, по которым определяют состояние объекта.

Однако этот способ обладает недостаточной надежностью.

Прототипом предлагаемого изобретения является магнитоимпульсный способ контроля материалов [2], заключающийся в том, что на контролируемое изделие воздействуют импульсными магнитными полями и по величине напряженности магнитного поля на его поверхности определяют свойства изделия.

Однако этот способ не обладает достаточной надежностью.

Задачей изобретения является повышение надежности контроля изделий из электропроводящих материалов на наличие в них внутренних дефектов и определение электрических свойств материала изделия.

Поставленная задача достигается тем, что в способе электромагнитного контроля распределения величины удельной электропроводности в изделии из известного электропроводящего материала, а также его толщины и параметров дефектов в нем воздействуют на изделие сериями одиночных импульсов магнитного поля первичного источника в виде полусинусоиды с максимальной величиной напряженности в зоне контроля от $1 \cdot 10^2$ до $1 \cdot 10^5$ А/м, время нарастания $t_{i \text{ max}}$ которых устанавливают в пределах от $1 \cdot 10^{-8}$ до $1 \cdot 10^{-2}$ с таким образом, чтобы в результате воздействия импульсами с одним и тем же временем нарастания разрешить контролируемые свойства изделия в слое материала глубиной $d_{i \text{ раз}}$ в соответствии с выражением

$$t_{i \text{ max}} = \frac{\beta}{\rho} d_{i \text{ раз}}^2,$$

где β и ρ - коэффициенты, экспериментально полученные для данного материала, вплоть до полной толщины изделия, для которой задают время нарастания $t_{i \text{ max}}$ в соответствии с выражением

$$t_{m \max} = \frac{d_{m \text{ пред}}}{p},$$

где $d_{m \text{ пред}}$ - экспериментально найденная предельная толщина изделия, при которой выполняется линейная зависимость максимальной тангенциальной составляющей напряженности $H_{\tau sm}$ магнитного поля, созданного индукционными токами в материале изделия, от его толщины d , измеряют по точкам на поверхности изделия величины максимальных тангенциальных составляющих $H_{\tau m}$ напряженности магнитного поля, по которым путем вычитания из них величин максимальных тангенциальных составляющих $H_{\tau 0m}$ напряженности магнитного поля первичного источника находят величины $H_{\tau sm}$ в каждой точке, строят зависимости величины $H_{\tau sm}$ от координаты x и y в плоскости поверхности изделия, затем сравнивают их с аналогичными эталонными зависимостями величины $H_{\tau sm}$, полученными заранее при воздействии таких же импульсов на эталонные изделия из того же материала с известной толщиной, распределением удельной электропроводности и с известными параметрами дефектов, и определяют путем указанного сравнения искомые свойства изделия в каждой контролируемой его точке. Искомые свойства изделия дополнительно определяют по измеренной ширине намагниченных участков поверхности изделия для разных времен нарастания импульсов и по тем временам нарастания импульсов поля, при которых на поверхности изделия начинают появляться магнитные поля участков и дефектов, расположенных на разной глубине, путем сравнения результатов измерения с аналогичными эталонными зависимостями.

Сущность изобретения поясняется фиг. 1 и фиг. 2. На фиг. 1 показаны зависимости величины максимальной тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля вблизи поверхности материала $H_{i \tau m}$ от его толщины d . На фиг. 2 показана пластина из алюминия с участками свинца и распределения напряженности магнитного поля над ней.

Изобретение осуществляют следующим образом.

Воздействуют на изделие серией одиночных импульсов магнитного поля первичного источника в виде полусинусоиды и в каждой точке на поверхности изделия измеряют максимальную величину тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля $H_{\tau m}$. Предварительно находят распределение тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля первичного источника $H_{o \tau m}$ по соответствующим поверхности изделия точкам пространства в отсутствие изделия. Вычитают из $H_{\tau m}$ величину напряженности первичного источника $H_{o \tau m}$ и получают распределения максимальной тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля вторичного источника $H_{\tau sm}$, т.е. поля, созданного индукционными токами в изделии, по всем точкам контролируемой поверхности изделия. Пользуясь предварительно полученными экспериментальными данными о корреляционных зависимостях σ и параметров дефектов с величиной $H_{\tau sm}$ и ее распределением, находят величины σ и параметры дефектов под каждой контролируемой точкой поверхности изделия.

Согласно экспериментальным исследованиям авторов, зависимость величины $H_{i \tau sm}$ поля индукционных токов на поверхности материала:

$$H_{i \tau sm} = k_i \cdot d, \quad (1)$$

где k_i - коэффициент, зависящий от $t_{i \max}$ и от σ и являющийся характеристикой материала. Предельная толщина материала $d_{i \text{ пред}}$, при которой выполняется соотношение (1) равна:

$$d_{i \text{ пред}} = p \cdot t_{i \max}, \quad (2)$$

где p - коэффициент, зависящий от σ материала.

Величина максимальной тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности материала $H_{i \tau m}$ при величине напряженности воздействующего магнитного поля $H_{i \tau 0m}$ равна:

$$H_{i \tau m} = H_{i \tau 0m} + H_{i \tau sm}. \quad (3)$$

Из (3) находим величину максимальной тангенциальной составляющей напряженности $H_{i\tau sm}$ магнитного поля вторичного источника:

$$H_{i\tau sm} = H_{i\tau m} - H_{i\tau 0m}. \quad (4)$$

Длительность импульса поля первичного источника $t_{i\max}$, вторичное поле которого несет информацию о свойствах изделия по всей его толщине $d = d_{m\text{пред}}$, определяют из формулы:

$$t_{m\max} = \frac{d_{m\text{пред}}}{p}, \quad (5)$$

где $d_{m\text{пред}}$, - предельная толщина изделия, при которой выполняется линейная зависимость $H_{\tau sm}$ от толщины изделия d .

Определив экспериментально величины $k_i = k_i(t_{i\max})$ для разных материалов находят σ материалов контролируемых изделий. Формула (5) получена также эмпирически.

Несмотря на то, что импульс поля с $t_{m\max}$, рассчитанным по формуле (5), позволяет разрешать свойства изделия по всей его толщине, он несет информацию о слое изделия гораздо большем, чем толщина изделия, так как величина указанного $d_{m\text{пред}}$ значительно меньше эффективной глубины проникновения магнитного поля в изделие δ .

Поэтому для разрешения свойств изделия по глубине задают толщины $d_{i\text{раз}}$ разрешаемых по свойствам слоев изделия, представляя глубину слоя, разрешающего свойства материала изделия, равной эффективной глубине проникновения магнитного поля в материал δ . Анализ полученных данных показал, что $d_{i\text{пред}}$ и δ связаны следующим соотношением:

$$\delta_i = \sqrt{\frac{d_{i\text{пред}}}{\beta}}, \quad (6)$$

где β - коэффициент, зависящий от σ материала изделия.

Согласно (6) находят величину новой предельной толщины для разрешения свойств изделия по всей толщине, принимая во внимание то, что за δ следует принять толщину изделия d .

Тогда в формуле (6) следует положить толщину изделия d , равной эффективной глубине проникновения δ , по которой найти новую предельную толщину $d_{k\text{пред}}$:

$$d_{k\text{пред}} = \beta \cdot \delta^2 = \beta \cdot d^2. \quad (7)$$

Подставляя значение $d_{k\text{пред}}$ из (7) в (2) получают время нарастания импульса для разрешения свойств изделия по всей его толщине:

$$t_{m\max} = \frac{\beta}{p} d^2, \quad (8)$$

а по слоям толщиной $d_{i\text{раз}}$:

$$t_{i\max} = \frac{\beta}{p} d_{i\text{раз}}^2. \quad (9)$$

Воздействуя на изделие импульсами поля с указанными временами нарастания, получают разрешение свойств материала, т.е. распределение по глубине σ и дефектов, по соответствующим этим временам $t_{i\max}$ слоям изделия толщиной $d_{i\text{раз}}$.

Кроме того, воздействуют импульсом, определяемым соотношением (5) и с наибольшей точностью определяют разнотолщинность изделия по величине напряженности магнитного поля $H_{\tau sm}$ в разных точках поверхности изделия в соответствии с зависимостью (1). Так, если толщина материала данного участка изделия меньше, чем толщина остального изделия, то и величина $H_{\tau sm}$, соответствующая величине $d_{m\text{пред}}$, также будет меньше.

Принцип действия предложенного изобретения поясним следующим примером его осуществления.

Для образцов из алюминия авторами найдены следующие значения коэффициентов: $p = 5$ м/с, $\beta = 200$ 1/м.

Предельная толщина слоя $d_{i\text{пред}}$, при которой выполняется линейная зависимость величины максимальной тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля

вторичного источника $H_{\tau sm}$ от толщины изделия d из алюминия, в соответствии с результатами авторов при времени нарастания импульса $t_{i \max} = 4 \cdot 10^{-6}$ с равна $d_{1 \text{ пред}} = 2 \cdot 10^{-5}$ м.

Материал изделия - алюминий. Толщина изделия неизвестна. Воздействуют на изделие серией импульсов с временами нарастания $t_{i \max} = 4,2 \cdot 10^{-6}$ с, $18 \cdot 10^{-6}$ с, $50 \cdot 10^{-6}$ с, $105 \cdot 10^{-6}$ с и получают зависимости 1-4 (фиг. 1) величины максимальной тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности материала $H_{i \text{ tm}}$ от его толщины d . Находят величину $H_{\tau sm}$. Она оказывается равной соответственно 3900 А/м, 2500 А/м, 1300 А/м, 500 А/м. На основании зависимостей 1-4 фиг. 1 находят толщину изделия $d = 1 \cdot 10^{-4}$ м, а если σ неизвестна, то и величину σ . Зависимости 1-4 извлекают из банка данных, в котором записаны зависимости величины $H_{\tau sm}$ для эталонных материалов с разными величинами σ и d , полученные при воздействии на эти материалы заданными импульсами магнитного поля. Наличие таких данных позволяет однозначно и одновременно определить и σ и d . Например, указанные кривые 1-4 характеризуют только изделия из алюминия, а для материалов с большей величиной σ зависимости будут сдвинуты в сторону меньших значений d , с меньшей σ - в сторону больших d .

Задают толщину слоя $d_{i \text{ раз}}$ для разрешения свойств изделия по глубине. Пусть толщина первого слоя будет равной $d_{i \text{ раз}} = 1 \cdot 10^{-5}$ м. Тогда по формуле $t_{i \max} = \frac{B}{\rho} d_{i \text{ раз}}^2$ находят время нарастания первого импульса для разрешения свойств указанного поверхностного слоя.

Так как для алюминия $\rho = 5$ м/с, $\beta = 200$ 1/м, то $t_{i \max} = \frac{B}{\rho} d_{i \text{ раз}}^2 = \frac{200}{5} \cdot 1 \cdot 10^{-10} = 4 \cdot 10^{-9}$ (с).

Задают толщину второго слоя $d_{2 \text{ раз}} = 1 \cdot 10^{-5}$ м. Тогда получают $t_{2 \max} = 1,6 \cdot 10^{-8}$ с.

Для импульса, разрешающего свойства изделия по всей его толщине, получают $t_{m \max} = 4 \cdot 10^{-7}$ с.

Если известна величина удельной электропроводности материала изделия σ , то время нарастания импульсов $t_{i \max}$ для разрешения свойств изделия по слоям толщиной $d_{i \text{ раз}}$ можно также найти по формуле

$$t_{i \max} = 0,25 \pi \mu_0 \sigma \delta_i^2,$$

где μ - магнитная проницаемость среды, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная постоянная, δ_i - эффективная глубина проникновения магнитного поля. Это выражение получено из известной формулы для определения величины эффективной глубины проникновения магнитного поля путем выражения циклической частоты через период колебания T , причем $t_{i \max} = 0,25T$.

Для того чтобы разрешить свойства изделия по всей его толщине d , надо принять $d_{m \text{ раз}} = d = \delta_m$, где индекс m означает максимальные значения толщины разрешаемого слоя и эффективной глубины проникновения магнитного поля.

Поскольку найденная толщина изделия равна $d = 1 \cdot 10^{-4}$ м, то при $\mu = 1$ (вакуум, воздух) для изделия из алюминия получаем максимальную длительность импульса $t_{m \max} = 4 \cdot 10^{-7}$ с. Таким образом, получена такая же величина $t_{m \max}$.

Для определения дефектов изделия и участков с отличными от остального материала величиной σ действуют следующим образом.

Воздействуют на изделие импульсом магнитного поля, разрешающим свойства в поверхностном слое. Если материал изделия в этом слое однороден и величина удельной электропроводности σ во всех его участках одна и та же, то величина максимальной тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля вторичного источника $H_{\tau sm}$ во всех точках поверхности изделия будет одинаковой и может быть определена указанным выше способом. Если в некотором участке этого слоя удельная электропроводность σ меньше, чем в остальных участках слоя и это отличие начинается не от самой поверхности изделия, а ниже первого разрешаемого поверхностного слоя, то и величина $H_{\tau sm}$ над

этим участком будет меньше, чем над остальными участками и может быть определена из линейной зависимости $H_{\tau sm}$ от толщины изделия при данном времени нарастания импульса $t_{2 max}$ с поправкой на то, что над этим участком с отличными свойствами находится слой материала $d_{1 раз}$ с величиной σ , как для всего остального материала.

Для разрешения свойств изделия по всей толщине задают толщину разрешаемого слоя $d_{1 пред}$, равную толщине всего изделия и находят время нарастания импульса $t_{m max}$.

Способ осуществляют путем построения зависимостей величины максимальной тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля вторичного источника $H_{\tau sm}$ от координаты x $H_{\tau sm} = H_{\tau sm}(x)$ и от координаты y $H_{\tau sm} = H_{\tau sm}(y)$ в плоскости поверхности изделия.

Осуществление способа поясняется чертежом на фиг. 2, где показаны:

1 - пластина из алюминия, в которой имеются участки 2 и 3 из свинца с обозначениями толщины слоев d_0, d_1, d_2, d_3, d_4 . Здесь же показаны зависимости 4-8 величины $H_{\tau sm}$ от расстояния x на поверхности пластины, полученные при воздействии на пластину импульсными магнитными полями в виде полусинусоиды с разными временами нарастания, а также координаты проекций краев участков из свинца 2 и 3 и их "магнитных полей" на ось x , и направление вектора напряженности магнитного поля H первичного источника.

Воздействуют на пластину 1 мгновенно нарастающим импульсом магнитного поля, в результате чего получают зависимость 4 величины $H_{\tau sm}$ на поверхности пластины. Эта зависимость разрешает свойства пластины в бесконечно тонком поверхностном слое пластины. В случае металлов мгновенно нарастающим можно считать импульс магнитного поля со временем нарастания t_{max} менее $1 \cdot 10^{-8}$ с.

Воздействуют на пластину 1 импульсом магнитного поля с большим, чем для первого импульса временем нарастания, с помощью которого разрешают свойства слоя толщиной d_1 . Распределение величины $H_{\tau sm}$ на поверхности пластины для этого импульса соответствует зависимости 5. Эта зависимость имеет уровни $H_{\tau sm}$ над участками из алюминия ниже уровней, полученных для мгновенно нарастающего сигнала 4. Над участком из свинца 2 величина $H_{\tau sm}$ будет значительно меньше, чем над участками из алюминия. При определенных условиях можно добиться того, что ее величина будет в девять раз меньше (удельная электропроводность свинца в девять раз меньше, чем у алюминия). Уровень d_1 в пластине находится выше уровня участка свинца 3 и поэтому никакого влияния этот участок свинца 3 на распределение 5 не окажет.

Воздействуют на пластину 1 импульсом магнитного поля с еще большим временем нарастания, с помощью которого разрешают свойства слоя толщиной d_2 . Распределение величины $H_{\tau sm}$ на поверхности пластины для этого импульса соответствует зависимости 6. Эта зависимость имеет уровни $H_{\tau sm}$ над участками из алюминия и над участком 2 из свинца ниже уровней 5, полученных при воздействии на пластину вторым импульсом. Над участком из свинца 3 величина $H_{\tau sm}$ будет значительно меньше, чем над участками из алюминия. Уровень d_2 в пластине находится на одном уровне с верхней частью участка свинца 3 и поэтому никакого влияния этот участок свинца 3 на распределение 6 не окажет.

Воздействуя на пластину импульсами магнитного поля с еще большими временами нарастания t_{max} , получают зависимости 7 и 8 величины $H_{\tau sm}$ от x , соответствующие разрешению слоев пластины на глубину d_3 и d_4 (толщина слоя d_4 совпадает с толщиной всей пластины). При этом уровни 7 и 8 находятся ниже уровня 6. Кроме того, "проявляется" участок 3 свинца, над которым величина $H_{\tau sm}$ меньше аналогичной величины над алюминием.

Таким образом, можно разрешать свойства материалов по глубине, пользуясь предложенными в изобретении формулами авторов, полученными с учетом того, что в определенных интервалах времени нарастания импульсов величины соответствующих им $H_{\tau sm}$ на поверхности электропроводящего материала зависят от его толщины. При этом величину удельной электропроводности σ участков определяют по величинам $H_{\tau sm}$ над этими

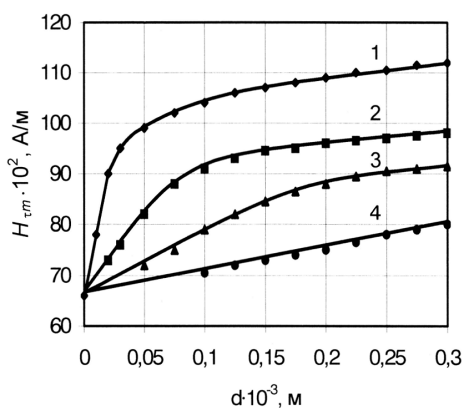
участками при разных временах нарастания импульса магнитного поля, а также по ширине "магнитных полей участков" x_1-x_2 и x_3-x_4 для разных времен нарастания импульсов и по временам нарастания импульсов поля, при которых начинают "проявляться" "магнитные поля участков". Все эти зависимости предварительно находят для материалов разной толщины с разными величинами σ .

Если удельная электропроводность материала изделия неизвестна, а известна его толщина, то предложенным способом можно найти удельную электропроводность однородного материала или путем усреднения результатов измерений по всей поверхности изделия - для изделия с локальными дефектами сплошности или участками с отличной величиной электропроводности σ . Для этого воздействуют на изделие импульсом магнитного поля длительностью, найденной ориентировочно в предположении, что величина удельной электропроводности равна такой-то величине, соответствующей, например, электропроводности свинца. В результате воздействия по соответствию измеренной величины максимальной тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля вторичного источника $H_{\tau sm}$ величине $H_{\tau sm}$ известного материала (в данном случае свинца) определяют абсолютную величину удельной электропроводности материала. Это осуществляют, пользуясь экспериментальными зависимостями величины коэффициента k_i от времени нарастания импульса $t_{i max}$ для разных материалов, как это указано в описании изобретения, $k_i = k_i(t_{i max})$, найденными предварительно, где k_i - коэффициент, входящий в формулу (1).

Экспериментальные результаты и проведенные расчеты позволяют установить следующие пределы применения предложенного способа. Нижний предел времени нарастания импульса $t_{i max} = 1 \cdot 10^{-8}$ с определяют исходя из параметров датчиков магнитного поля (быстродействие датчиков), верхний предел $t_{i max} = 1 \times 10^{-2}$ с находят по измерениям $H_{\tau sm}$ для изделий конечной толщины. Максимальную напряженность магнитного поля первичного источника в интервале $1 \cdot 10^2 \div 10^5$ А/м определяют исходя из свойств применяемых датчиков магнитного поля.

Источники информации:

1. Мельгуй М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей. - Минск: Наука и техника, 1980. - С. 157-162.
2. Методы неразрушающих испытаний / Под ред. Шарпа. - М.: Мир, 1972. - С. 394-412 (прототип).



Фиг. 1