

**ОПИСАНИЕ
ИЗОБРЕТЕНИЯ
К ПАТЕНТУ**

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) **ВУ** (11) **11266**

(13) **С1**

(46) **2008.10.30**

(51) МПК (2006)

G 01N 27/72

G 01R 33/02

(54) **СПОСОБ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТНОСТИ,
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ, МАГНИТНЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА**

(21) Номер заявки: а 20060340

(22) 2006.04.13

(43) 2007.12.30

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

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

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

(56) Методы неразрушающих испытаний / Под ред. Р.Шарпа. - М.: Мир, 1972. - С. 394-412.

ВУ 6102 С1, 2004.

ВУ 6236 С1, 2004.

RU 2118816 С1, 1998.

SU 258687, 1969.

SU 1132212 А, 1984.

UA 56801 А, 2003.

JP 2005127963 А, 2005.

(57)

1. Способ магнитного контроля дефектности, электрических, магнитных и механических свойств ферромагнитного материала, заключающийся в том, что на контролируемый материал воздействуют магнитными полями, визуализируют взаимодействие этих полей со структурой материала и по полученным изображениям идентифицируют физико-механические свойства материала по заранее выявленным корреляционным зависимостям, **отличающийся** тем, что накладывают на материал пластину из электропроводящего немагнитного материала, на которой располагают датчик магнитного поля, воздействуют на материал импульсным или постоянным магнитным полем, одновременно воздействуют на пластину с датчиком дополнительным однополярным импульсным магнитным полем меньшей длительности импульсов, измеряют с помощью датчика величину тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля H_t в отраженной волне, по величине которой и ее распределениям на поверхности материала во времени определяют удельную электропроводность материала σ , динамическую магнитную проницаемость материала μ при разных временах нарастания импульсов поля, а также твердость, хрупкость и величину упругих напряжений материала путем сравнения полученных распределений H_t с эталонными распределениями H_t для известных материалов и параметры дефектов материала и глубину их залегания сравнением с эталонными распределениями H_t для известных материалов с известными параметрами дефектов, причем величину H_t на поверхности материала, созданную действующим на материал магнитным полем, находят путем вычитания величины H_t , создаваемой при воздействии на пластину дополнительным магнитным полем, из величины H_t , измеренной на поверхности пластины, а полярность импульсов дополнительного магнитного поля и их амплитуду определяют исходя из величины H_t на

ВУ 11266 С1 2008.10.30

поверхности материала, созданной действующим на материал магнитным полем, и характеристик датчика магнитного поля.

2. Способ по п. 1, **отличающийся** тем, что используют пластину с координатной сеткой в виде упорядоченных сквозных прорезей с разными ориентациями и толщиной, равной эффективной глубине проникновения дополнительного магнитного поля в пластину.

Изобретение относится к контрольно-измерительной технике и может быть использовано для контроля электрических и магнитных свойств материалов и дефектов сплошности в них.

Известен магнитооптический способ контроля изделий [1], заключающийся в том, что накладывают магнитную пленку на поверхность контролируемого изделия, намагничивают последнее и по рисунку, образовавшемуся под воздействием полей рассеяния, судят о качестве изделия.

Однако этот способ не обладает достаточной надежностью.

Прототипом предлагаемого изобретения является магнитоимпульсный способ контроля материалов [2], заключающийся в том, что на контролируемый материал воздействуют магнитными полями, визуализируют взаимодействие этих полей со структурой материала и по полученным изображениям идентифицируют физико-механические свойства материала по заранее выявленным корреляционным зависимостям.

Однако этот способ также не обладает достаточной надежностью.

Задачей изобретения является повышение надежности контроля электрических и магнитных свойств материалов, а также коррелирующих с ними механических свойств и параметров дефектов.

Поставленная задача достигается тем, что в способе магнитного контроля дефектности, электрических, магнитных и механических свойств ферромагнитного материала, заключающемся в том, что на контролируемый материал воздействуют магнитными полями, визуализируют взаимодействие этих полей со структурой материала и по полученным изображениям идентифицируют физико-механические свойства материала по заранее выявленным корреляционным зависимостям, при этом накладывают на материал пластину из электропроводящего немагнитного материала, на которой располагают датчик магнитного поля, воздействуют на материал импульсным или постоянным магнитным полем, одновременно воздействуют на пластину с датчиком дополнительным однополярным импульсным магнитным полем меньшей длительности импульсов, измеряют с помощью датчика величину тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля H_t в отраженной волне, по величине которой и ее распределениям на поверхности материала во времени определяют удельную электропроводность материала σ , динамическую магнитную проницаемость материала μ при разных временах нарастания импульсов поля, а также твердость, хрупкость и величину упругих напряжений материала путем сравнения полученных распределений H_t с эталонными распределениями H_t для известных материалов и параметры дефектов материала и глубину их залегания сравнением с эталонными распределениями H_t для известных материалов с известными параметрами дефектов, причем величину H_t на поверхности материала, созданную действующим на материал магнитным полем, находят путем вычитания величины H_t , создаваемой при воздействии на пластину дополнительным магнитным полем, из величины H_t , измеренной на поверхности пластины, а полярность импульсов дополнительного магнитного поля и их амплитуду определяют исходя из величины H_t на поверхности материала, созданной действующим на материал магнитным полем, и характеристик датчика магнитного поля. Используют пластину с координатной сеткой в виде упорядоченных сквозных прорезей с разными ориентациями и толщиной, равной эффективной глубине проникновения дополнительного магнитного поля в пластину.

Сущность изобретения состоит в следующем.

Накладывают на материал однородную одинаковой толщины пластину из электропроводящего материала. На пластине располагают датчик магнитного поля в виде магнитооптической пленки, матрицы из датчиков Холла или других датчиков. Воздействуют на материал импульсным магнитным полем и измеряют величину напряженности H_{\max} магнитного поля на поверхности пластины во всех ее точках, на которых расположены датчики магнитного поля. Величину H_{\max} определяют в поляризованном свете по величине смещения границ доменов магнитооптической пленки во всех ее точках (микро-, наноструктуры доменов). Матрицей датчиков Холла величину напряженности магнитного поля в каждой точке определяют по величине снимаемого с каждого датчика электрического напряжения в соответствии с чувствительностью датчиков.

Пусть в результате такого воздействия и во время действия никаких изменений в структуре магнитооптической пленки не произошло и матрицей датчиков Холла никаких сигналов выше уровня шумов не обнаружено.

Поскольку величина максимальной тангенциальной составляющей напряженности действующего магнитного поля выбрана в рабочем диапазоне датчиков в отсутствие исследуемого материала, а в присутствии материала сигнал с датчиков отсутствует, то это означает, что исследуемый материал обладает высокой магнитной проницаемостью μ и является ферромагнетиком.

Для того, чтобы определить величину этой магнитной проницаемости указанными датчиками, надо вывести их в рабочие диапазоны измеряемой величины напряженности магнитного поля.

С этой целью одновременно с первым импульсом в момент максимума его напряженности воздействуют на электропроводящую пластину вторым импульсом магнитного поля, длительность которого во много раз, например в сто, тысячу и т.д., меньше длительности первого импульса. Второй импульс является для пластины непрозрачным или частично прозрачным. В результате воздействия им в электропроводящей пластине возникают индукционные токи, магнитное поле которых увеличивает величину тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности пластины с датчиками. Это увеличение будет от одного до двух раз. Величину $H_{\text{тсм}}$ можно регулировать толщиной электропроводящей пластины и временем нарастания второго импульса.

Получение максимальной чувствительности способа осуществляют также определением оптимального соотношения амплитуд первого и второго импульсов и их полярностей.

Электропроводящая пластина является полностью прозрачной для длительного импульса. Величина напряженности магнитного поля на поверхности пластины в результате воздействия на материал длительным импульсом зависит от величины магнитной проницаемости материала μ таким образом, что величина максимальной тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности материала $H_{\text{тм}}$ тем меньше, чем больше μ материала. В то же время для ферромагнитных материалов при воздействии на них длительным импульсом величина $H_{\text{тм}}$ возрастает за счет поля индукционных токов в материале, причем это возрастание зависит от толщины материала и времени нарастания импульса.

Поэтому для определения μ и удельной электропроводности σ материала предварительно находят частотные зависимости $H_{\text{тм}}$ на поверхности различных материалов с известными величинами μ и σ и путем сравнения аналогичных зависимостей для исследуемого материала находят его магнитную проницаемость и удельную электропроводность. При этом в указанных зависимостях заложена информация сразу и о величине μ и о величине σ . И эта информация является однозначной, т.к. нет одинаковых числовых зависимостей $H_{\text{тм}}$ для материалов с разными μ и σ .

Магнитные свойства материалов коррелируют с их механическими свойствами. Так, магнитомягкие материалы, имеющие низкую коэрцитивную силу H_c и большую величину μ , являются, как правило, легкоподдающимися деформациям изгиба, легко обрабатываются механически, например напильником, и т.д. Материалы с большой H_c и малой μ называются магнито жесткими, они трудно обрабатываемые и имеют большие твердость, хрупкость и т.д.

Поэтому при осуществлении предложенного способа предварительно находят корреляционные зависимости величины напряженности магнитного поля на поверхности материала, т.е. суммарного поля первичного и вторичного источников, с физико-механическими свойствами материалов, например, с их твердостью и жесткостью. Эти зависимости получают таким образом, что каждой величине напряженности магнитного поля соответствует определенная величина магнитной проницаемости.

При осуществлении способа визуализируют взаимодействие полей со структурой материала на телевизионном экране или экране монитора. При этом получают оптические изображения распределения магнитных полей по поверхности материала. При использовании магнитооптической пленки это распределение доменной структуры магнитооптической пленки, снятое в поляризованном свете и записанное на элементы электронной памяти в виде распределения электрического напряжения яркостного сигнала или сигнала цветности.

Каждое из таких распределений, представленное в виде кадра, несет информацию о распределении магнитных полей на поверхности материала по точкам его поверхности и, значит, соответствует определенному распределению μ , σ и дефектов сплошности в материале, а также коррелирующими с величиной μ твердостью и жесткостью материала.

При использовании матрицы из датчиков Холла оптическое изображение полей формируют таким образом, что каждой величине сигнала каждого датчика Холла (прямо пропорциональна величине H_{tm}) соответствует свой уровень записи электрического сигнала.

Таким образом, при осуществлении данного способа можно получать изображения поверхности материала в виде распределений уровней сигнала, соответствующих величине H_{tm} в каждой точке поверхности материала, а значит, величине μ в материале под этими точками поверхности и коррелирующими с ними физико-химическими свойствами материала в этих участках.

Параметры дефектов выявляют следующим образом. Воздействуя на материал полями длительных импульсов с разными временами нарастания и формируя соответствующие каждому импульсу телевизионные кадры с изображениями магнитных полей, можно получить большой объем информации о "всплытии" магнитных полей рассеяния дефектов сплошности на поверхность материала. Объем информации настолько велик, что при его полной обработке можно однозначно и с высокой точностью определить размеры дефекта и глубину его залегания в материале.

Воздействуем на материал толщиной d одиночными однополярными импульсами магнитного поля со временами нарастания, обеспечивающими эффективную глубину проникновения поля δ (глубину, на которой амплитуда напряженности магнитного поля уменьшается в e раз), равную соответственно $\delta_1 = \frac{d}{n}$, $\delta_2 = \frac{d}{n-1}$, $\delta_3 = \frac{d}{n-2}$, ..., $\delta_n = \frac{d}{1} = d$, где n - целое число.

Если дефект начинается на глубине $\delta_3 = \frac{d}{n-2}$ (третий импульс), то при воздействии на материал первыми двумя импульсами в поле рассеяния дефекта на поверхности материала не появится, а, начиная с третьего импульса, начнет появляться и расти в плоскостных размерах и по уровню сигнала изображения с каждым импульсом. Если нижняя часть дефекта не доходит до нижней части пластины, то с некоторого импульса изображение

поля дефекта перестает расти. Используя предварительно найденные изображения полей известных дефектов в разных материалах с найденными изображениями, находят параметры дефекта и глубину его залегания. Сравнение может быть также произведено с теоретическими расчетами.

Определение удельной электропроводности σ для немагнитных материалов (диа- и парамагнитные материалы) проще, т.к. относительная магнитная проницаемость у них одинакова и с большой точностью равна единице. Однако время нарастания импульсов для разрешения их свойств по глубине во много раз меньше, чем для ферромагнитных материалов. Рассмотрим более подробно определение величины магнитной проницаемости μ .

Согласно решению задачи Сирла [Хэг Б. Электромагнитные расчеты ОНТИ НК ТП СССР. - М.-Л.: Госэнергонадзор, 1934] величина тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля H_t на поверхности материала в виде полупространства при воздействии на него магнитным полем линейного токопровода уменьшается в $\frac{\mu+1}{2}$ раз по сравнению с H_t в отсутствии материала. Здесь μ - магнитная проницаемость материала. Токопровод расположен параллельно его поверхности.

Следовательно, воздействуя на материал импульсами магнитного поля токопровода и измеряя на его поверхности величину H_t , можно определить величину магнитной проницаемости материала μ . При этом для одного и того же материала при разных временах нарастания импульсов (разных частотах) величина μ будет разной, т.е. измеряют динамическую магнитную проницаемость.

При больших величинах μ величина H_t на поверхности материала будет малой и с помощью датчиков Холла и магнитооптической пленки измерить величину H_t не представляется возможным. Для того чтобы вывести датчик в рабочий диапазон, надо увеличить H_t . Это осуществляют с помощью электропроводящей пластины, которую накладывают на поверхность материала и путем воздействия на нее значительно более коротким импульсом, чем импульсы воздействия на материал, достигают нужной величины H_t . Вследствие малой длительности этого импульса сквозь пластину он практически не проникает и никакого существенного влияния на материал не оказывает.

Напряженность отраженного от пластины поля складывается алгебраически с напряженностью поля, полученной при воздействии на материал более длительными импульсами. Для определения величины H_t , несущей информацию о величине μ материала, из измеренной величины H_t вычитают величину H_t отраженного от пластины поля.

Известно, что величина коэрцитивной силы материала H_c и величина магнитной проницаемости μ коррелируют с физико-механическими свойствами материала. В частности, чем меньше твердость и хрупкость материала и чем больше материал гибок, тем больше его μ .

Поэтому, предварительно определяя зависимости величины μ от величины H_t , по полученным результатам измерений можно определить твердость и хрупкость материалов, степень их закалки и упругие напряжения в материале.

Визуализация взаимодействия магнитных полей со структурой материала осуществляется следующим образом.

Воздействуют на материал импульсным магнитным полем, измеряют величину тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля H_t в каждой точке поверхности материала и получают распределения H_t в разные моменты времени t с начала воздействия полем в виде зависимостей H_t от координат x и y в плоскости поверхности материала.

Эти распределения переводят в распределения электрического напряжения U . Если датчиком является датчик Холла, то сразу на его выходе получаем величину напряжения,

ВУ 11266 С1 2008.10.30

прямо пропорциональную величине H_T . Если используем магнитооптическую пленку, то распределение U формируем в видеосигнале телевизионного передатчика по тракту: источник света - поляризатор - магнитооптическая пленка - анализатор - преобразователь оптического изображения в электрический сигнал - предварительный усилитель - видеоусилитель телевизионного передатчика (указанного преобразователя).

Эти распределения U записывают на элементы памяти с усилением напряжения и формированием кадра телевизионного разложения.

После этого каждой величине U записанного в памяти сигнала вводят в соответствие уровни яркостного сигнала или сигнала цветности и получают на экране телевизионного приемника оптическое изображение распределения магнитных полей на поверхности материала в заданный момент времени.

Сформируем цветное оптическое изображение распределения магнитного поля на поверхности пластины таким образом, что величине H_T , равной H_T в воздухе в отсутствие материала, введем в соответствие уровень цветности зеленого сигнала, а уровню H_T над низкокоэрцитивной сталью - уровень цветности красного сигнала. Таким образом, мы визуализировали взаимодействие магнитных полей с твердостью (жесткостью) материала.

Если сталь является среднекоэрцитивной, то μ у нее будет меньше, чем у низкокоэрцитивной стали, и величина H_T больше, а значит, твердость также больше. Окрасим этот участок в желтый цвет.

Если сталь высококоэрцитивная, μ у нее еще меньше, H_T намного больше и твердость также больше. Окрасим ее в синий цвет.

Ввиду того, что записи H_T осуществляют в разные моменты времени, то в результате получается большое количество кадров телевизионной развертки, несущих информацию о свойствах материала в разные моменты действия поля.

Идентифицируя эти данные с эталонными распределениями для материалов с известными σ , μ и параметрами дефектов, определяют искомые свойства контролируемых материалов.

Корреляционные зависимости величины напряженности магнитного поля с физико-механическими свойствами материалов - это в данном случае следующие зависимости:

1). Время нарастания импульса магнитного поля $t_{\max} = (1 \div 500) \cdot 10^{-6} \text{с}$.

Электропроводящие диа-, пара- и ферромагнетики.

Корреляционные зависимости - зависимость величины максимальной напряженности магнитного поля H_{tm} от удельной электропроводности материала σ : $H_{\text{tm}} = H_{\text{tm}}(\sigma)$.

Используются найденные авторами закономерности для диа- и парамагнитных электропроводящих материалов: линейная зависимость $H_{\text{тSm}}$ (вторичного поля) от толщины материала d , переходящая в зависимость вида "единица минус экспонента". На линейном участке величина $H_{\text{тSm}}$ вторичного поля прямо пропорциональна величине σ :

$$H_{\text{тSm}} = A \cdot \sigma,$$

где A - постоянная.

Для ферромагнетиков нами получены зависимости максимальной суммарной напряженности магнитного поля H_{tm} на поверхности материала от величины μ и величины σ .

2). Время $t_{\max} > 5 \cdot 10^{-3} \text{с}$.

Ферромагнетики.

Корреляционные зависимости величины напряженности магнитного поля H_{tm} на поверхности материала с его динамической магнитной проницаемостью μ , которая, в свою очередь, коррелирует с твердостью, хрупкостью материала и величиной упругих напряжений.

3). $5 \cdot 10^{-4} \text{с} < t_{\max} < 5 \cdot 10^{-3} \text{с}$.

Корреляционные зависимости H_{tm} и от σ и от μ , которые зависят от твердости, хрупкости материала и величины упругих напряжений.

ВУ 11266 С1 2008.10.30

В силу большого объема информации о полях дефектов, представленных в виде оптических изображений в разные моменты времени, можно с большой точностью определить размеры дефектов и глубину их залегания.

Изобретение осуществляют следующим образом.

Накладывают на контролируемый материал однородную одинаковой толщины пластину из электропроводящего немагнитного материала, например из алюминия. На пластине располагают датчик магнитного поля в виде магнитооптической пленки, матрицы из датчиков Холла или другие датчики. После этого воздействуют на материал импульсным или постоянным магнитным полем. Величина напряженности магнитного поля на поверхности материала зависит от магнитной проницаемости μ материала, а при воздействии импульсными магнитными полями еще и от его удельной электропроводности σ . Кроме того, над участками в материале, где имеются дефекты, возникают магнитные поля рассеяния в магнитных материалах и локальные искажения распределения магнитного поля в немагнитных материалах при воздействии на них импульсными магнитными полями. Таким образом, по величине напряженности магнитного поля и ее распределению на поверхности материала определяют величину магнитной проницаемости μ и удельной электропроводности σ материала и их распределение, а также параметры дефектов сплошности.

Величина тангенциальной составляющей магнитного поля вблизи поверхности ферромагнетика меньше величины тангенциальной составляющей напряженности действующего на него магнитного поля. Поэтому при контроле магнитной проницаемости μ и удельной электропроводности σ материала воздействуют на пластину дополнительным импульсным магнитным полем той же полярности (направления), что и действующее на материал поле для того, чтобы вывести датчик магнитного поля в рабочий диапазон. При этом контроль производят в моменты максимумов дополнительного импульсного магнитного поля и действующего на материал импульсного магнитного поля или в другие моменты действия дополнительного магнитного поля. Толщину пластины выбирают равной эффективной глубине проникновения дополнительного магнитного поля в нее для того, чтобы увеличить напряженность магнитного поля на поверхности пластины и для того, чтобы это поле не оказывало существенного влияния на магнитное состояние материала. Длительность (время нарастания) импульсов дополнительного магнитного поля выбирают существенно меньшей, чем длительность импульсов действующего на материал магнитного поля, например, в сто и более раз. Так, для алюминия эффективная глубина проникновения импульсов магнитного поля со временем нарастания $t_{\max} = 4 \cdot 10^{-6}$ с составляет $3,2 \cdot 10^{-4}$ м. Воздействуя такими импульсами на пластину толщиной $d = 3,2 \cdot 10^{-4}$ м, получают увеличение максимальной напряженности дополнительного магнитного поля на ее поверхности до двух раз. При этом действующие на материал импульсы магнитного поля со временем нарастания $5 \cdot 10^{-4}$ с и более, проходя через алюминиевую пластину, вызывают на ее поверхности незначительное увеличение напряженности магнитного поля, вызванное индукционными токами в пластине, и существенного влияния на результаты контроля свойств материала не оказывают. Амплитуду дополнительного поля устанавливают в зависимости от характеристик используемых датчиков магнитного поля, т.е. от диапазона измеряемых ими полей, и от величины напряженности магнитного поля, созданного на поверхности материала действующим на него магнитным полем.

Величину напряженности магнитного поля на поверхности материала, созданную действующим на материал магнитным полем, находят путем вычитания величины напряженности магнитного поля, создаваемого указанной пластиной при воздействии на нее дополнительным магнитным полем, из измеренной на ее поверхности напряженности магнитного поля.

Контроль дефектов сплошности в ферромагнитных материалах осуществляют в достаточно больших магнитных полях, выводящих материал в состояние доменной структуры,

ВУ 11266 С1 2008.10.30

близкое к насыщению. При этом датчики магнитного поля также оказываются в состоянии магнитного насыщения. Поэтому при контроле дефектов воздействуют на пластину с датчиком дополнительным импульсным магнитным полем противоположной полярности действующему на материал полю. Величину максимальной напряженности дополнительного магнитного поля выбирают такой, чтобы вывести датчик в рабочий диапазон, в частности полностью скомпенсировать действующее на материал поле, выделив только магнитные поля рассеяния дефектов.

Для того, чтобы осуществить "привязку" датчика к контролируемым частям материала, используют пластину с координатной сеткой в виде упорядоченных прорезей в пластине с разными ориентациями. Например, располагают эти прорези по периметру пластины и при этом изменяют угол поворота каждой прорези на одну и ту же величину по отношению к предыдущей. Величина тангенциальной составляющей магнитного поля над прорезями будет резко отличаться от напряженности магнитного поля над остальными участками пластины и по ее величине и направлению прорезей можно находить края изделия из контролируемого материала, направление действующего магнитного поля и осуществлять "привязки" пластины, а значит, и датчика магнитного поля к каким-либо естественным или созданным искусственно отличительным точкам поверхности материала.

Источники информации:

1. А.с. СССР 452786, МПК G 01 N 72/82, 1974.
2. Методы неразрушающих испытаний / Под ред. Р.Шарпа. - М.: Мир, 1972. - С. 394-412 (прототип).