

КОНТРОЛЬ ДЕФЕКТОВ СПЛОШНОСТИ В МЕТАЛЛАХ С ПОМОЩЬЮ ПЛЕНОЧНЫХ ФЛЮКС-ДЕТЕКТОРОВ

© 2019 г. В.В. Павлюченко^{1,*}, Е.С. Дорошевич^{1,**}

¹Белорусский национальный технический университет, Беларусь 220013 Минск,
пр-т Независимости, 65Б

E-mail: *vv.pavlyuchenko@gmail.com; **es_doroshevich@mail.ru

Поступила в редакцию 21.06.2018; после доработки 31.08.2018;
принята к публикации 21.09.2018

Представлены результаты исследований применения пленочных флюкс-детекторов для контроля искусственных дефектов сплошности. Приведены фотографии пленочного флюкс-детектора с изображениями магнитных полей отверстий диаметром $2,0 \cdot 10^{-3}$ м в пластине из железа толщиной $6 \cdot 10^{-4}$ м и отверстия диаметром $1,0 \cdot 10^{-2}$ м в пластине из алюминия толщиной $2,0 \cdot 10^{-3}$ м после воздействия импульсами магнитного поля со временем нарастания порядка $2,0 \cdot 10^{-5}$ — $5,0 \cdot 10^{-5}$ с, а также прошедших через зазоры шириной $1 \cdot 10^{-4}$ и $1 \cdot 10^{-5}$ м между состыкованными алюминиевыми пластинами толщиной $3,0 \cdot 10^{-3}$ м при разных направлениях приложенного поля.

Представлены результаты измерений максимальной величины тангенциальной H_{tm} ($3,9 \cdot 10^4$ А/м) и нормальной H_{nm} ($3,3 \cdot 10^4$ А/м) составляющих напряженности суммарного магнитного поля вблизи поверхности алюминиевой пластины (непосредственно возле отверстия в ней) с использованием дискретного датчика магнитного поля.

На основании проведенных исследований разработаны магнитоимпульсные методы контроля дефектов сплошности в объектах из диамагнитных, парамагнитных и ферромагнитных металлов, заключающиеся в воздействии на объект с приложенным к нему пленочным флюкс-детектором импульсом магнитного поля и определении дефектности объекта на основании анализа полученного оптического изображения магнитного поля с исследованием его формы и распределения уровней серого (цветности) в нем с учетом параметров анизотропии и калибровочной характеристики датчика. Предварительно определены амплитуда импульса поля, время его нарастания, форма переднего и заднего фронтов, количество импульсов, параметры выбросов магнитного поля и установлена равномерная освещенность поверхности детектора. Перед применением осуществлено размагничивание или поляризация детектора и определены тип и параметры индуктора магнитного поля. Предложено повысить контрастность изображений путем воздействия на объект с детектором серий импульсов.

Ключевые слова: дефекты сплошности, пленочный флюкс-детектор, оптическое изображение магнитного поля, напряженность магнитного поля, магнитный носитель, индукционная магнитная головка.

DOI:10.1134/S0130308219010007X

ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы является разработка методов контроля дефектов сплошности в объектах из ферромагнитных, парамагнитных и диамагнитных металлов с использованием пленочных флюкс-детекторов, визуализирующих магнитные поля, а также методов и средств измерения магнитных полей и их распределений с помощью этих детекторов.

Мгновенные распределения магнитных полей, несущих информацию о свойствах объектов на значительных площадях поверхности, можно записывать только на пленочные преобразователи магнитного поля, в качестве которых используют магнитные носители, магнитооптические пленки и другие преобразователи. Пленочные датчики для измерения напряженности магнитного поля могут быть составлены из преобразователей Холла, индукционных катушек и других микроскопических датчиков, позволяющих производить измерения в плоскости с высоким разрешением. В [1—3] для контроля нарушений сплошности в объектах использовались магнитографический, магнитооптический и другие методы контроля. В [4, 5] контроль толщины токопроводящих покрытий осуществляли методами вихревых токов и магнитодинамическим. В [6] исследовались магнитные поля дефектов произвольной формы в плоскопараллельной пластине, в [7] рассматривался контроль дефектов в токопроводящих покрытиях топливных баков летательных аппаратов с применением емкостных датчиков. Близкими к рассматриваемой теме являются [8, 9], в которых представлены поля электропроводящих объектов в виде суперпозиции полей элементарных вихревых токов и описана магнитоиндукционная томография электрических схем и приборов. Однако эти методы и средства контроля имеют существенные недостатки и для повышения точности и оперативности определения свойств объектов требуют привлечения других методов контроля, взаимодополняющих друг друга.

Каждый из указанных методов имеет свои преимущества, однако все они имеют существенные недостатки. Так, магнитографический метод не позволяет получать информацию об объектах в реальном масштабе времени, магнитооптический не обладает достаточно большой точностью, токовихревой требует значительного времени для сканирования поверхности контролируемого

объекта датчиком и не позволяет записывать мгновенные распределения полей на большой площади, а емкостной имеет не достаточно высокое разрешение.

В настоящее время магнитные поля постоянных магнитов и остаточных намагниченных объектов из ферромагнитных материалов визуализируют с помощью пленочных флюкс-детекторов, которыми можно контролировать процессы в реальном масштабе времени (близком к нему) или остаточном режиме. Однако они работают в средних и больших магнитных полях и не обладают высокой чувствительностью.

Известны работы [10, 11] по использованию пленочных флюкс-детекторов для контроля дефектов в объектах из ферромагнитных материалов, при этом величина цилиндрического дефекта и глубина его залегания определяется с расчетом и экспериментальным исследованием коэффициента отражения визуализирующей магнитные поля пленки. Следует отметить, что магнитографический метод контроля обладает гораздо большей чувствительностью по сравнению с пленочными флюкс-детекторами. Использование магнитооптической пленки [3, 14] позволяет осуществлять контроль в реальном масштабе времени, но он также не обладает достаточно высокой точностью. Применение магнитооптического вихревого и магнитографического методов контроля, а также индуктора вихревых токов со сканером с визуализацией записанных на магнитной ленте полей дефектов осуществляли с помощью магнитооптической пленки в [16, 17], а воздействие на металлический объект производили переменным магнитным полем или при униполярном возбуждении индуктора прямоугольными импульсами напряжения.

Работы по использованию магнитооптической пленки с гигантским фарадеевским вращением для контроля дефектов в металлах, ведущиеся нами, описаны, например, в [18, 19]. Как показали исследования, чувствительность измерений при визуализации информации, записанной на магнитной ленте с помощью магнитооптической пленки, уменьшается в десятки раз по сравнению со считыванием индукционной магнитной головкой. Поэтому магнитооптическая пленка может быть эффективно использована прежде всего для непосредственной визуализации полей дефектов в процессе распространения электромагнитного поля вглубь объекта [3, 18, 19].

Отметим основные преимущества пленочного флюкс-детектора (ПФД):

не создает электрических наводок и не подвержен их влиянию при записи импульсных магнитных полей;

при получении изображений магнитных полей не требуется дополнительных операций, например, поляризации света и устройств (анализаторы, поляризаторы и так далее);

позволяет одновременно записывать информацию с достаточно большой площади объекта (десятки сантиметров и дециметров);

датчик, изготовленный из ПФД, может работать в режиме, близком к режиму реального времени; вносит малое искажение в распределение импульсных магнитных полей в отличие от датчиков, использующих ферро- и ферритмагнитные элементы с высокой магнитной проницаемостью.

Основные недостатки ПФД состоят в следующем:

обладает недостаточной чувствительностью, так как работает только в магнитных полях с большой напряженностью;

обладает недостаточным быстродействием по сравнению с другими датчиками магнитного поля; отсутствие 180-градусной анизотропии понижает его возможности контроля;

наличие зернистости изображения также понижает качество контроля;

используемые в настоящее время флюкс-детекторы не обеспечивают достаточно высокой контрастности изображения;

на результаты измерений оказывают существенное влияние неравномерная освещенность пленочного флюкс-детектора, а также оптические помехи.

Примеров применения пленочных флюкс-детекторов для определения свойств диамагнитных и парамагнитных металлов авторам не известно.

Поэтому возникает актуальный для производства вопрос применения пленочных флюкс-детекторов для контроля объектов из диа- и парамагнитных металлов. Для этого могут быть использованы результаты исследований авторов [12—15], в которых изложены полученные закономерности распределений магнитных полей вблизи электропроводящих объектов и методы контроля свойств объектов с использованием гистерезисной интерференции магнитного поля. Здесь же предложено находить параметры дефектов по оптическим изображениям магнитных полей этих дефектов. При этом величину напряженности магнитного поля определяют по уровню оттенка серого или оттенка цветности в оптическом изображении. Разделение тангенциальной и нормальной составляющих напряженности магнитного поля в каждой точке флюкс-детектора производят с учетом анизотропии указанных пленок.

Одной из особенностей пленочных флюкс-детекторов является тот факт, что они не реагируют на знак поля и обладают, если можно так сказать, «девятистоградусной анизотропией». ПФД позволяют непосредственно оцифровывать оптическое изображение при фотографировании изображений магнитных полей современными цифровыми фотоаппаратами, ставя уровень электрического сигнала фотоизображения в соответствие уровню оттенков серого или цветности. По уровню серого в оптическом изображении можно определять величину тангенциальной и нормальной составляющих напряженности магнитного поля в каждой точке флюкс-детектора, предварительно проведя исследования по изучению анизотропии указанных пленок.

Для разработки методов контроля объектов требуется оценить численные значения параметров ПФД, влияющих на результаты измерений. Для этого следует провести исследования и определить рабочий диапазон ПФД, оценить оптимальную скорость нарастания напряженности магнитного поля при магнитоимпульсном контроле, определить вид и параметры индуктора.

Индуктор в виде плоской катушки используется для обнаружения дефектов в объекте. Его преимущество состоит в создании однородного поля в зоне контроля. При использовании линейного индуктора или других источников неоднородного магнитного поля существенную роль играет величина нормальной составляющей напряженности магнитного поля H_n , способствующая выявлению дефектов. С помощью ПФД нельзя различать положительное и отрицательное направления напряженности магнитного поля, как и его составляющих H_t и H_n . Недостатком ПФД является относительно небольшое по сравнению с магнитооптической пленкой и магнитной лентой быстрое действие, параметры которого следует установить в данной работе.

ОПИСАНИЕ МАГНИТОИМПУЛЬСНОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЛЕНОЧНЫХ ФЛЮКС-ДЕТЕКТОРОВ

Найдем с помощью пленочных флюкс-детекторов распределение напряженности магнитных полей искусственных дефектов сплошности вблизи металлических объектов при воздействии на них постоянными магнитными полями, а также одиночными импульсами магнитного поля или сериями импульсов.

На рис. 1 показана фотография пластины из оцинкованного железа длиной $1 \cdot 10^{-1}$ м, шириной $2 \cdot 10^{-2}$ м и толщиной $6 \cdot 10^{-4}$ м с тремя искусственными дефектами, а на рис. 2 — изображение магнитных полей этих дефектов на флюкс-детекторе.

Магнитное поле создавали П-образным намагничивающим устройством (электромагнитом, постоянным магнитом). Отпечатки магнитных полей рассеяния от трех указанных дефектов представляют собой темные овальные участки по обе стороны от центра дефектов и обусловлены нормальными составляющими напряженности магнитного поля. Так как анизотропия ПФД позволяет различать толь-



Рис. 1. Фотография пластины из оцинкованного железа с дефектами (сверху вниз): первый — диаметр $2 \cdot 10^{-3}$ м, глубина $3 \cdot 10^{-4}$ м; второй — сквозной диаметром $2 \cdot 10^{-3}$ м; третий — конус в основании $1,5 \cdot 10^{-3}$ м глубиной $2 \cdot 10^{-4}$ м.

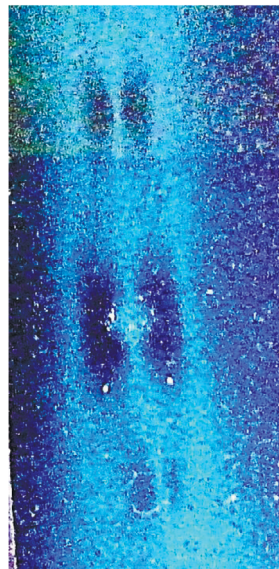


Рис. 2. Фотография флюкс-детектора с изображениями магнитных полей дефектов (см. рис. 1) с бездефектной стороны в постоянном магнитном поле.

Рис. 3. Фотография флюкс-детектора с изображениями магнитных полей дефектов в пластине из оцинкованного железа после воздействия импульсом магнитного поля.

ко тангенциальное (светлое изображение) и нормальное (темное) направления напряженности магнитного поля, то изображения магнитных полей дефектов с обеих сторон от отверстий темные. Сплошные темные полосы с левой и правой сторон фотографии обусловлены действием нормальной составляющей напряженности магнитного поля первичного источника магнитного поля. Изображение в виде светлого круга на фотографии соответствует сквозному отверстию.

Аналогичные изображения магнитных полей дефектов можно получить, воздействуя на пластину с пленочным флюкс-детектором импульсами магнитного поля линейного индуктора, плоской катушки или других источников магнитного поля. Воздействовали на пленочный детектор с указанной пластиной импульсом магнитного поля линейного индуктора. Амплитуда импульсов магнитного поля при измерениях изменялась в пределах от $5 \cdot 10^3$ до $1 \cdot 10^5$ А/м. Время нарастания импульсов магнитного поля t_{\max} находилось в диапазоне $1 \cdot 10^{-6}$ — $5 \cdot 10^{-4}$ с. При этом осуществляли воздействие дополнительным импульсным магнитным полем с градиентом напряженности в плоскости измерения порядка $1 \cdot 10^6$ А/м². Проекция оси индуктора совпадала (была близка) с прямой линией, проходящей через центры отверстий.

На рис. 3 представлена фотография пленочного флюкс-детектора с изображениями магнитных полей дефектов сплошности в пластине из оцинкованного железа, полученная с бездефектной стороны в прошедшем магнитном поле. Источник поля расположен с обратной по отношению к ПФД стороны пластины.

Измерение напряженности магнитного поля осуществляли следующим образом. Пусть оптическое изображение намагниченного до насыщения ПФД в нормальном к его плоскости направлении соответствует уровню сигнала 0 (уровню черного), а намагниченного до насыщения ПФД в его плоскости — уровню 256 градаций (уровню белого). При этом уровень оттенка серого размагниченного ПФД равен 128. Создадим шкалу оттенков серого в интервале 0—256 в виде оптического изображения полосы, в которой уровень черного (первый участок) постепенно переходит в уровень белого (256-й участок). Как показали наши исследования, величина напряженности магнитного поля, соответствующая уровню 0 для используемого нами ПФД (максимум нормальной составляющей), составляет $1,1 \cdot 10^5$ А/м, а уровню 256 (максимум тангенциальной составляющей) — примерно такая же величина. Тогда 256 уровню соответствует диапазон полей в $2,2 \cdot 10^5$ А/м. Отсюда определяем чувствительность измерений в цифровом представлении: $1,16 \cdot 10^{-3}$ дел·м/А (через «дел», то есть делений, обозначено число градаций) по 256-уровневой шкале. Таким образом, величину напряженности магнитного поля в разных точках полученных оптических изображений магнитного поля на ПФД вычисляли с учетом найденной чувствительности ПФД в импульсном магнитном поле. Уровень оттенка серого в изображении магнитного поля сравнивали с уровнями серого шкалы и находили величину одной из составляющих напряженности. В общем случае при наличии двух составляющих разность их величин пропорциональна величине отклонения уровня серого в точке измерения от уровня серого, соответствующего размагниченному состоянию ПФД.

Тогда уровень оттенков серого магнитных полей дефектов (см. рис. 3, темные овальные участки вблизи дефектов) с учетом перевода цветного изображения в черно-белое будет соответствовать примерно уровню сигнала 50, а значит, величина нормальной составляющей напряженности магнитного поля равна $6,7 \cdot 10^4$ А/м. Уровень сигнала фона в непосредственной близости от изображений этих полей (см. рис. 3, светлый фон) составляет 180, что соответствует величине тангенциальной составляющей $4,5 \cdot 10^4$ А/м.

Изображения магнитных полей дефектов на пленочных флюкс-детекторах нами получены и для объектов из диамагнитных и парамагнитных металлов. Так, на рис. 4—6 показаны фотографии пленочного флюкс-детектора с изображениями остаточных магнитных полей дефекта сплошности в пластине из алюминия толщиной $2,0 \cdot 10^{-3}$ м, полученные в прошедшем магнитном поле, диаметр сквозного отверстия $1 \cdot 10^{-2}$ м.

Изображение магнитных полей на ПФД, показанное на рис. 4, получено в результате воздействия на пластину одним импульсом магнитного поля источника. Видно, что характеристики используемого ПФД таковы, что при однократном воздействии импульсом магнитного поля получается не достаточно контрастное изображение магнитных полей дефектов.



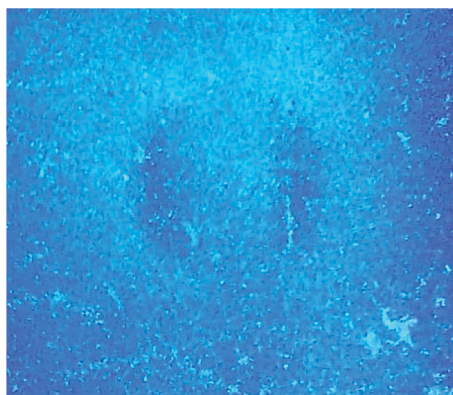


Рис. 4. Фотография флюкс-детектора с изображениями магнитных полей отверстия диаметром $1,0 \cdot 10^{-2}$ м в пластине из алюминия толщиной $2,0 \cdot 10^{-3}$ м после воздействия одним импульсом магнитного поля.



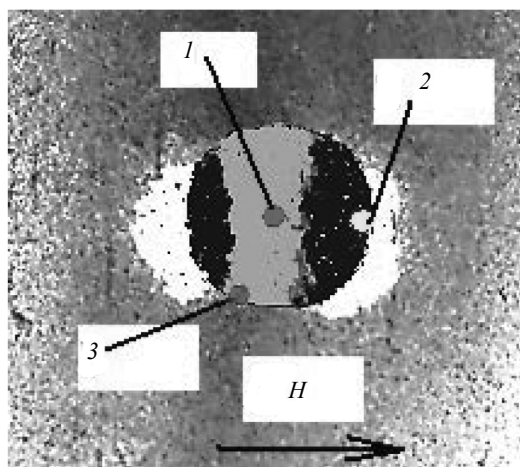
Рис. 5. Фотография флюкс-детектора с изображениями магнитных полей отверстия диаметром $1,0 \cdot 10^{-2}$ м в пластине из алюминия толщиной $2,0 \cdot 10^{-3}$ м после воздействия пятью импульсами магнитного поля.

Поэтому для получения контрастных изображений на пластину с ПФД воздействовали серией одиночных импульсов. Изображение на рис. 5 получено в результате воздействия на ПФД с объектом пятью импульсами поля. Изображения магнитных полей, аналогичные изображениям, показанным на рис. 4 и 5, получены также при установке ПФД на высотах $1,0 \cdot 10^{-3}$; $2,0 \cdot 10^{-3}$ и $3,0 \cdot 10^{-3}$ м над поверхностью пластины.

Амплитуда импульса воздействующего поля была порядка $8,0 \cdot 10^4$ А/м. Средняя за четверть периода импульса скорость нарастания напряженности магнитного поля составляла $3 \cdot 10^9$ А/м·с. Как показали проведенные исследования, при воздействии одним импульсом чувствительность в три раза меньше, чем при воздействии пятью импульсами, и равна $3,9 \cdot 10^{-4}$ дел·м/А.

Наличие алюминиевой фольги толщиной $7,0 \cdot 10^{-5}$ м на поверхности пластины с отверстием существенного влияния на изображение магнитных полей, показанных на рис. 4 и 5, не оказывает. С целью более контрастного выделения полей дефекта с изображением этих полей (см. рис. 5) проведены операции вычисления и коррекции, в результате чего получено изображение, представленное на рис. 6. Здесь показаны точка 1 над центром отверстия диаметром $1,0 \cdot 10^{-2}$ м в алюминиевой пластине толщиной $2,0 \cdot 10^{-3}$ м и точка 2 над краем отверстия, а также край отверстия 3 и направление приложенного магнитного поля H .

Определим величину максимальной тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля H_{tm} в точке 1 на высотах $(0,5—3,0) \cdot 10^{-3}$ м над пластиной, а также величину H_{tm} и величину максимальной нормальной составляющей H_{nm} в точке 2 на таких же высотах. Для этого воспользуемся методом [10, 11] измерения напряженности магнитного поля с использованием дискретного датчика магнитного поля (ДДМП), состоящего из набора параллельных полос магнитного носителя. В результате измерений произведена оценка величины максимальной тангенциальной составляющей напряженности в точке 1 и величины максимальной тангенциальной и нормальной составляющих в точке 2 (табл. 1).



Расчетная величина H_{tm1} на высоте $0,6 \cdot 10^{-3}$ м в отсутствие пластины равна $7,0 \cdot 10^4$ А/м. Экспериментально измеренная величина H_{tm1} над центром отверстия равна $3,9 \cdot 10^4$ А/м. Таким образом, максимальная величина H_{tm} поля, прошедшего через отверстие в пластине, уменьшилась в 1,8 раза. Пользуясь данными табл. 1, можно определить параметры датчиков для контроля объектов из алюминия.

Изображения на ПФД магнитных полей искусственных дефектов в виде зазоров между алюминиевыми пластинами, моделированных как глубинные трещины, представлены на рис. 7—9.

Рис. 6. Фотография флюкс-детектора с изображениями магнитных полей отверстия в пластине из алюминия с применением операций вычисления и коррекции.

Таблица 1

Распределение составляющих напряженности магнитного поля вблизи отверстия

$h \cdot 10^{-3}$ м	0,6	1,0	2,0	3,0
$H_{\text{тм1}} \cdot 10^4$ А/м	3,9	3,3	2,9	2,5
$H_{\text{тм2}} \cdot 10^4$ А/м	2,7	2,55	2,25	
$H_{\text{тм2}} \cdot 10^4$ А/м	3,3	2,85	2,6	2,35

Так, на рис. 7 показано изображение 5 на ПДФ 4 поля линейного индуктора, прошедшего через зазор b шириной $1 \cdot 10^{-4}$ м между двумя пластинами 1 и 2 из алюминия толщиной $3,0 \cdot 10^{-3}$ м. Здесь на обе пластины наложена пластина 3 толщиной $2,3 \cdot 10^{-4}$ м, перекрывающая указанный зазор. Индуктор расположен под пластинами, его ось совпадает с проекцией оси зазора (показан масштаб изображения). Из рисунка следует, что пластина толщиной $2,3 \cdot 10^{-4}$ м не препятствует выявлению зазора b . Исследования показали, что указанные зазоры могут быть обнаружены при толщине покрывающих их пластин $1,0 \cdot 10^{-3}$ и $1,5 \cdot 10^{-3}$ м.

Прохождение импульсного магнитного поля через зазоры между алюминиевыми пластинами при направлении поля перпендикулярно плоскости пластин показано на рис. 8 и 9. На рис. 8 изображены алюминиевые пластины 1, 2 и 3 толщиной $3,0 \cdot 10^{-3}$ м, состыкованные между собой таким образом, что их края образуют Т-образный зазор шириной около $1 \cdot 10^{-5}$ м. Сверху к пластинам приложен пленочный флюкс-детектор 4. Знаком \otimes обозначено направление напряженности приложенного импульсного магнитного поля H , а также показаны масштаб изображения и возникающие оптические изображения магнитных полей 5 на пленочном флюкс-детекторе 4.

Индуктор расположен под алюминиевыми пластинами. Его рабочая зона составляет $1,0 \cdot 10^{-3}$ м² и может быть увеличена в десять и более раз. Таким образом, разработанным методом можно получать мгновенные (за $1,0 \cdot 10^{-4}$ с) фотографии пленочных флюкс-детекторов с изображениями магнитных полей дефектов и структурных неоднородностей на площади поверхности объекта порядка $1,0 \cdot 10^{-2}$ м². При этом разрешение свойств в плоскости измерения составляет приблизительно $1,0 \cdot 10^{-8}$ м².

На рис. 9 показаны те же самые, что и на рис. 8, алюминиевые пластины 1—3 с приложенным к ним пленочным флюкс-детектором 4. Сверху на пластины наложена алюминиевая фольга 6 тол-

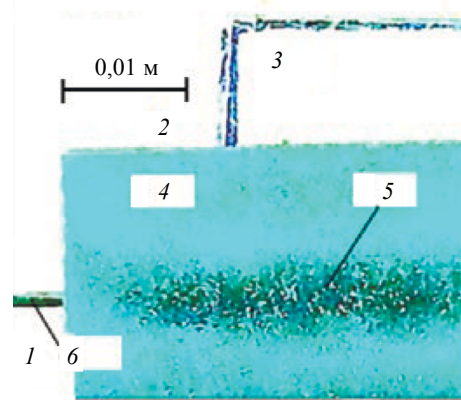


Рис. 7. Фотография флюкс-детектора с изображением магнитного поля, прошедшего через зазор между алюминиевыми пластинами.

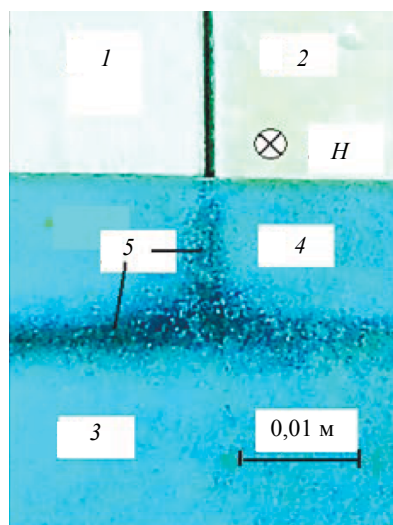


Рис. 8. Фотография флюкс-детектора с изображением магнитного поля, прошедшего через зазор между алюминиевыми пластинами.

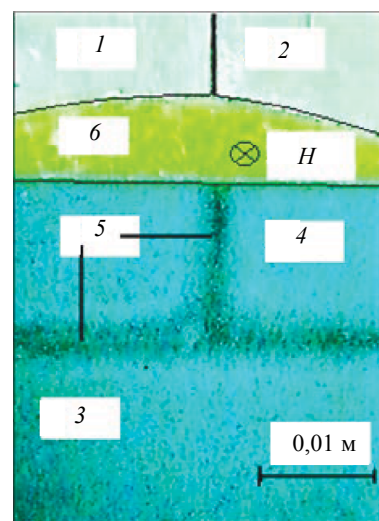


Рис. 9. Фотография флюкс-детектора с изображением магнитного поля, прошедшего через зазор между алюминиевыми пластинами с алюминиевой фольгой.

щиной $7,0 \cdot 10^{-5}$ м. Из сравнения этих рисунков следует, что наличие фольги на указанных пластинах никакого существенного влияния на выявляемость зазоров между пластинами не оказывает.

Разработанные методы контроля свойств объектов и измерение напряженности магнитного поля включают:

- 1) определение диапазона воздействующих магнитных полей $(5—100) \cdot 10^3$ А/м;
- 2) определение направления напряженности магнитного поля (тангенциальная, нормальная составляющие);
- 3) выбор типа контроля (в прошедшем и отраженном полях);
- 4) выбор параметров импульса магнитного поля в зависимости от удельной электропроводности материала объекта и его толщины (амплитуды, времени нарастания, формы, параметров выбросов) и свойств ПФД. Для объектов из диамагнитных и парамагнитных металлов найдено время нарастания импульса, которое находится в интервале $t_{\max} = (1—100) \cdot 10^{-6}$ с и зависит от толщины объекта и удельной электропроводности его материала;
- 5) воздействие дополнительным импульсным магнитным полем с градиентом напряженности в плоскости измерения порядка $1 \cdot 10^6$ А/м²;
- 6) выбор начального состояния ПФД (размагниченное, поляризованное тангенциально или поляризованное нормально);
- 7) установление равномерной освещенности ПФД с отсутствием изображений источников света и бликов в отраженном свете;
- 8) определение свойств объекта по уровню оттенков серого в оптическом изображении магнитного поля ПФД на поверхности объекта;
- 9) измерение напряженности магнитного поля по уровню оттенков серого в оптическом изображении магнитного поля ПФД путем сравнения уровней серого его элементов с уровнями созданной шкалы оттенков серого для датчика с 90° анизотропией;
- 10) учет быстрого действия ПФД. Так, осуществление контроля объектов и измерение напряженности магнитного поля возможны при средней скорости нарастания напряженности магнитного поля $3 \cdot 10^9$ А/м·с.

Перечисленные пункты дают возможность разработать несколько методов контроля свойств электропроводящих материалов. К ним относятся, например, описанный выше метод контроля в прошедшем поле, метод контроля в отраженном поле и другие методы. Ввиду 90° анизотропии используемых пленочных флюкс-детекторов и их свойств, отличных от свойств магнитных носителей и других датчиков магнитного поля, разработанные методы существенно отличаются от известных методов.

К разработанным средствам относятся источники воздействующего импульсного магнитного поля и источники дополнительного импульсного магнитного поля (их параметры указаны выше), датчики ПФД, откалиброванные в импульсном магнитном поле, индукторы в виде контуров, плоских катушек, П-образные электромагниты и постоянные магниты, плоский постоянный магнит.

На основании проведенных исследований разработаны магнитоимпульсные методы контроля дефектов сплошности в объектах из диамагнитных, парамагнитных и ферромагнитных металлов, заключающиеся в воздействии на объект с приложенным к нему пленочным флюкс-детектором импульсом магнитного поля и определении дефектности объекта на основании анализа полученного оптического изображения магнитного поля на флюкс-детекторе. Анализ изображения проводят путем исследования его формы и распределения уровней серого (уровней цветности) в нем с учетом параметров анизотропии датчика. Предварительно определяют амплитуду импульса поля, время его нарастания, форму переднего и заднего фронтов, количество импульсов, количество и параметры выбросов магнитного поля и устанавливают равномерную освещенность поверхности детектора без бликов и изображений источников света в отраженном свете.

Перед применением осуществляют размагничивание или поляризацию ПФД, выводя все его точки на одинаковый уровень черного (темного) или белого (светлого), воздействуя на него соответственно магнитным полем тангенциального или нормального к его плоскости направления. Предварительно рассчитывают тип и параметры индуктора магнитного поля (линейный, плоский или другой формы), линейные размеры и площадь его рабочей поверхности с заданными погрешностями измерения.

Разработанный метод включает использование дополнительных источников магнитного поля разного типа, способствующих выявлению дефектов импульсом магнитного поля с установленными параметрами.

Представляем некоторые численные характеристики разработанного метода, используемые в данной работе. Амплитуда импульса поля в месте контроля — $8,0 \cdot 10^4$ А/м, время его нарастания —

$1,0 \cdot 10^{-6}$ с и более, количество импульсов — от 1 до 5, количество выбросов — от 1 до 3, расстояние до поверхности контролируемого объекта — до $3,0 \cdot 10^{-3}$ м, но возможно существенно большее, линейные размеры подповерхностных локальных выявляемых дефектов — от $1,0 \cdot 10^{-3}$ м, а протяженных (зазоры) — шириной $1 \cdot 10^{-5}$ м и более, глубина залегания выявляемых дефектов зависит от их линейных размеров, толщины объекта и удельной электропроводности его материала.

Для повышения чувствительности и точности контроля объектов из диамагнитных и парамагнитных металлов в импульсных магнитных полях следует повысить на порядок и более чувствительность флюкс-детекторов.

Разработанный метод измерений позволяет определять величину напряженности как импульсного, так и постоянного магнитного поля по распределению уровня серого в оптическом изображении флюкс-детектора, откалиброванного в соответствующих магнитных полях. Повысить контрастность изображений, а следовательно, точность контроля предложено выделением полученных изображений магнитных полей посредством дополнительных воздействий на детектор полями других источников.

Определены оптимальные параметры импульсов магнитного поля (амплитуда, время нарастания) для получения информации о свойствах объектов из диамагнитных, парамагнитных и ферромагнитных металлов с помощью ПФД в импульсных магнитных полях, а также рабочий диапазон ПФД, который начинается от величины напряженности магнитного поля, равной $1 \cdot 10^4$ А/м. Средняя за четверть периода импульса скорость нарастания напряженности магнитного поля, используемого нами при контроле объектов из диамагнитных и парамагнитных материалов, составляет $3 \cdot 10^9$ А/м·с, а максимальная скорость на отдельных участках зависимости $H = H(t)$ достигала $1 \cdot 10^{10}$ А/м·с.

В результате проведенных исследований сделан вывод о том, что с помощью современных ПФД можно осуществлять запись процессов, протекающих или изменяющихся за время порядка $1 \cdot 10^{-5}$ с.

ВЫВОДЫ

1. Представлены результаты исследований применения пленочных флюкс-детекторов для контроля искусственных дефектов сплошности. Приведены фотографии пленочного флюкс-детектора с изображениями магнитных полей отверстий диаметром $2,0 \cdot 10^{-3}$ м в пластине из оцинкованного железа толщиной $6 \cdot 10^{-4}$ м и флюкс-детектора с изображениями магнитных полей отверстия диаметром $1,0 \cdot 10^{-2}$ м в пластине из алюминия толщиной $2,0 \cdot 10^{-3}$ м после воздействия импульсами магнитного поля со временем нарастания порядка $2,0 \cdot 10^{-5}$ – $5,0 \cdot 10^{-5}$ с, а также пленочного флюкс-детектора с изображениями магнитных полей, прошедших через зазор шириной $1 \cdot 10^{-4}$ м между состыкованными алюминиевыми пластинами толщиной $3,0 \cdot 10^{-3}$ м и состыкованных алюминиевых пластин такой же толщины с зазором шириной $1 \cdot 10^{-5}$ м при направлении приложенного поля перпендикулярно плоскости пластин, накрытых алюминиевой фольгой и без нее.

2. Представлены результаты измерений максимальной величины тангенциальной H_{tm} ($3,9 \cdot 10^4$ А/м) и нормальной H_{nm} ($3,3 \cdot 10^4$ А/м) составляющих напряженности суммарного магнитного поля, созданного линейным индуктором и полем индукционных токов в алюминиевой пластине вблизи ее поверхности непосредственно возле отверстия с использованием дискретного датчика магнитного поля, изготовленного из магнитного носителя.

3. На основании проведенных исследований разработаны магнитоимпульсные методы контроля дефектов сплошности в объектах из диамагнитных, парамагнитных и ферромагнитных металлов, заключающиеся в воздействии на объект с приложенным к нему пленочным флюкс-детектором импульсом магнитного поля и определении дефектности объекта на основании анализа полученного оптического изображения магнитного поля на флюкс-детекторе. Анализ изображения проводят путем исследования его формы и распределения уровней серого (уровней цветности) в нем с учетом параметров анизотропии и калибровочной характеристики датчика. Предварительно определяют амплитуду импульса поля, время его нарастания, форму переднего и заднего фронтов, количество импульсов, количество и параметры выбросов магнитного поля и устанавливают равномерную освещенность поверхности детектора без бликов и изображений источников света в отраженном свете, рассчитывают тип и параметры индуктора магнитного поля. Повысить контрастность изображений, а следовательно, точность контроля предложено путем воздействия на объект с детектором серией импульсов, а также выделением полученных изображений магнитных полей посредством дополнительных воздействий на детектор полями других источников с заданными градиентами напряженности магнитного поля в плоскости измерения.

4. На основании проведенных исследований мы можем заключить, что ПФД впервые применен: для визуализации импульсных магнитных полей и непосредственной визуализации импульсных магнитных полей дефектов; для визуализации магнитных полей дефектов объектов из диамагнитных и парамагнитных электропроводящих материалов; для измерения импульсных магнитных полей и их пространственно-временных распределений.
5. Полученные результаты могут быть использованы для определения параметров дефектов сплошности в электропроводящих объектах, а также для визуализации мгновенных распределений магнитных полей дефектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов В.С. Техника магнитографической дефектоскопии. Минск.: Вышэйшая школа, 1976. 256 с.
2. Михайлов С.П., Щербинин В.Е. Физические основы магнитографической дефектоскопии. М.: Наука, 1992. 238 с.
3. Магнитооптический дефектоскоп. Пат. 12742 Респ. Беларусь, МПК С1 ВУ, G 01 N 27/72. В.В. Павлюченко, Е.С. Дорошевич; заявитель БНТУ, № а20071581; заявл. 19.12.2007; опубл. 07.10.09 // Афіцыйны бюл. Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2009. № 6. С. 121—122.
4. Лухвич А.А., Булатов О.В., Лукьянов А.Л., Полякова М.Н., Мосякин В.В. Контроль магнитодинамическим методом толщины никелевых покрытий под хромовыми на двухслойных (неферромагнетик—ферромагнетик) основаниях // Дефектоскопия. 2015. № 1. С. 3—10.
5. Атавин В.Г., Узких А.А., Исхужин Р.Р. Отстройка от электропроводности основания при измерении толщины токопроводящих покрытий методом вихревых токов // Дефектоскопия. 2018. № 1. С. 58—64.
6. Шур М.Л., Новослугина А.П., Смородинский Я.Г. Магнитное поле дефекта произвольной формы в плоскопараллельной пластине // Дефектоскопия. 2015. № 11. С. 14—27.
7. Скворцов Б.Г., Самсонов А.С., Борминский С.А., Живоносная Д.М. Теоретические основы контроля токопроводящих покрытий топливных баков летательных аппаратов // Дефектоскопия. 2017. № 5. С. 46—54.
8. Суханов Д.Я., Совпель Е.С. Магнитоиндукционная томография электрических схем и приборов // Изв. высш. учебных заведений. 2015. Т. 58. № 10/3. С. 73—75.
9. Суханов Д.Я., Завьялова К.В. Представление поля электропроводящего объекта в виде суперпозиции полей элементарных вихревых токов и их томография // Изв. высш. учебных заведений. 2017. Т. 60. № 11. С. 28—34.
10. Новиков В.А., Шилов А.В., Кушнер А.В. Визуализация полей дефектов ферромагнитных объектов с помощью пленки «Flux-detector» // Контроль. Диагностика. 2010. № 5. С. 18—22.
11. Новиков В.А., Шилов А.В. Расчет коэффициента отражения визуализирующей магнитные поля пленки в зоне дефекта при контроле ферромагнитных объектов // Дефектоскопия. 2014. № 2. С. 25—33.
12. Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С. Использование магнитного гистерезиса при контроле объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях // Дефектоскопия. 2013. № 6. С. 53—68.
13. Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С. Неразрушающий контроль объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях // Дефектоскопия. 2010. № 11. С. 29—40.
14. Способ магнитооптического контроля магнитного электропроводящего материала. Пат. 10440 Респ. Беларусь, МПК С2 ВУ, G 01 N 27/00. В.В. Павлюченко, Е.С. Дорошевич; заявитель БНТУ, № а 20060200; заявл. 09. 03. 2006; опубл. 30.04.08 // Афіцыйны бюл. Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2008. № 2. С. 97.
15. Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С. Применение пленочных флюкс-детекторов для определения свойств электропроводящих и магнитных объектов // Дефектоскопия, 2018. № 1. С. 52—57.
16. Вишневецкий В.Г., Бержанский В.Н., Козик Г.П., Михайлов В.И., Панков Ф.Н., Левый С.В., Агалиди Ю.С. Магнитооптический вихретоковый контроль: интроскопический и магнитографический методы // Ученые записки Таврического национ. ун-та им. В.И. Вернадского. Серия «Физ.-мат. науки». Симферополь. 2011. Т. 24 (63). № 2. С. 127—140.
17. Патент 2464555 МПК С1 RU G01N27/90. Индуктор вихревых токов для магнитографической дефектоскопии и сканер на его основе. С.В. Левый (UA), Ю.С. Агалиди (UA), И.П. Шумский (BY). Заявл. 1.07.2009, опубл. 20.10.2012.
18. Павлюченко В.В., Сычик В.А., Дорошевич Е.С. Разработка магнитооптических систем контроля / Приборостроение-2008. Матер. междунар. науч.-техн. конф. БНТУ. Минск, 2008. С. 109—110.
19. Дорошевич Е.С., Павлюченко В.В. Устройство контроля качества изделий из магнитных и электропроводящих материалов / Приборостроение-2009. Матер. 2-й междунар. науч.-техн. конф. БНТУ. Минск, 2009. С. 57—58.