

ОБНАРУЖЕНИЕ ПРОТЯЖЕННЫХ ДЕФЕКТОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ В ТОКОПРОВОДЯЩИХ ПЛАСТИНАХ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТНОГО НОСИТЕЛЯ

© 2019 г. В.В. Павлюченко¹, Е.С. Дорошевич^{1,*}

¹Белорусский национальный технический университет,
Беларусь 220013 Минск, пр-т Независимости, 65Б
E-mail: *es_doroshevich@mail.ru

Поступила в редакцию 12.07.2018; после доработки 06.11.2018;
принята к публикации 09.11.2018

Проведены исследования сигналограмм, снимаемых с магнитной головки, сканирующей магнитный носитель с записанными на нем пространственными распределениями магнитных полей искусственных дефектов сплошности сложной формы в виде прорезей в пластинах из алюминия, свинца и меди. Раскрытие дефектов составляло 10—100 мкм, а толщина пластин — от 60 мкм и больше. Воздействие на них осуществляли импульсами магнитного поля со временем нарастания в интервале 1,5—50 мкс с записью полей дефектов на магнитный носитель. Напряженность первичного магнитного поля, создаваемого плоским индуктором, изменялась в диапазоне 5—30 кА/м. Приведены фотографии пластин с дефектами и зависимости величины электрического напряжения $U(y)$ от координаты y , снятые с индукционной магнитной головки, сканирующей магнитный носитель с записями полей дефектов в пластинах разной толщины и на разной высоте над ними. На основании проведенных исследований найдены условия для выявления закрытых от наблюдения протяженных дефектов сложной формы в объектах в виде пластин из алюминия, свинца и меди и разработан метод магнитоимпульсного контроля протяженных дефектов сложной формы в указанных объектах, который позволяет осуществлять запись мгновенных распределений магнитного поля на площади 10 см² и более с разрешением в плоскости измерения 0,01 мм² с визуализацией импульсных магнитных полей дефектов на экране монитора с построением сигналограмм $U(y)$ на плоскости, соответствующей поверхности контролируемого объекта. Полученные результаты могут быть использованы для скоростного обнаружения дефектов сплошности в электропроводящих объектах, а также при изучении магнитных и электромагнитных методов контроля.

Ключевые слова: дефекты сплошности, импульс магнитного поля, магнитный носитель, индукционная магнитная головка.

DOI:10.1134/S0130308219030060

ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы является разработка метода выявления протяженных дефектов сложной формы в виде прорезей в токопроводящих пластинах с помощью магнитного носителя.

Одними из актуальных задач дефектоскопии являются контроль дефектов в объектах, изготовленных в виде пластин и пленок из электропроводящих материалов, и определение толщины этих объектов. Эти задачи могут быть решены электромагнитными, магнитоимпульсными и другими методами контроля. Так, в [1] предложено выявлять замкнутые протяженные дефекты в виде трещин и прорезей в токопроводящих покрытиях топливных баков летательных аппаратов с применением емкостных датчиков.

Исследования, проводимые нами [2—5] с использованием магнитоимпульсных методов контроля, также могут быть применены для обнаружения указанных дефектов. Более того, они позволяют выявлять как замкнутые, так и незамкнутые дефекты. Незамкнутые дефекты при внешних механических или тепловых воздействиях могут стать замкнутыми, то есть локальными накопителями электрического заряда. Это может привести к воспламенению объекта в случае последующего электрического пробоя.

Указанные исследования основаны на определении величины электрического сигнала, снимаемого с индукционной магнитной головки, воспроизводящей информацию, записанную на магнитном носителе. На магнитный носитель, приложенный к контролируемому объекту, предварительно воздействовали импульсом магнитного поля, а информацию воспроизводили по выбранным линиям сканирования. Амплитуда исследуемого сигнала была пропорциональна величинам напряженности приложенного и вторичного полей, а также величине или градиенту поля дефекта. В случае одиночного импульса магнитного поля без выбросов величина напряженности вторичного импульсного магнитного поля была пропорциональна толщине объекта из электропроводящего материала, а при наличии выбросов эта зависимость имела более сложный характер [2, 3]. С помощью преобразователя Холла получали аналогичные зависимости напряженности импульсного магнитного поля, которые позволяли находить временные зависимости напряженности магнитно-

го поля. Оптические изображения импульсных магнитных полей находили с помощью пленочного флюкс-детектора [5], позволяющего визуализировать магнитные поля.

В настоящее время ведутся интенсивные разработки других методов контроля объектов, в том числе вихретокового [6—10], магнитоиндукционного и с использованием виброиндукционного преобразователя [11, 12].

В [6] описана диагностика пластины с трещиной вихретоковым методом, а в [7] найдены алгоритмы обработки вихретоковых сигналов при контроле теплообменных труб парогенераторов АЭС.

Проекционные методы многомерного анализа данных при вихретоковом контроле металлических материалов описаны в [8]. Отстройка от электропроводности основания при измерении толщины токопроводящих покрытий методом вихревых токов осуществлена в [9]. В [10, 11] представлены суперпозиции полей элементарных вихревых токов и магнитоиндукционная томография электрических схем, а исследование сигнала, обусловленного полем рассеяния поверхностного дефекта при его регистрации виброиндукционным преобразователем, осуществлено в [12].

Для выявления дефектов сплошности в электропроводящих материалах могут быть использованы результаты исследований [13, 14], где описаны полученная авторами гистерезисная интерференция импульсного магнитного поля и способ контроля физических свойств объекта, закрытого от наблюдения металлическим экраном.

Однако все указанные методы и средства контроля имеют существенные недостатки и требуют своего дальнейшего развития для повышения точности и оперативности определения свойств объектов.

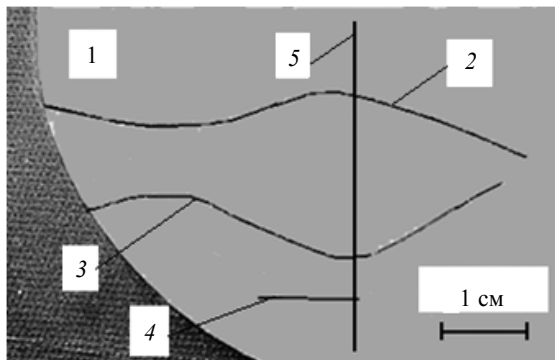
Метод магнитоимпульсного контроля с помощью магнитного носителя позволяет получать информацию об объектах с достаточно большой точностью на значительной площади контролируемой поверхности с высоким разрешением в плоскости измерения и записью мгновенных распределений импульсных магнитных полей.

ОПИСАНИЕ МАГНИТОИМПУЛЬСНОГО МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ДЕФЕКТОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ В ТОКОПРОВОДЯЩИХ ПЛАСТИНАХ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТНОГО НОСИТЕЛЯ

Проведены исследования выявляемости дефектов в металлических пластинах при изменении их толщины.

Изображения сигналов полей дефектов могут быть получены разными способами. Наибольшей скоростью обладает способ автоматического считывания информации вращающейся магнитной головкой с линейно перемещаемого магнитного носителя. Эту операцию можно осуществлять также путем записи сигналограмм по отдельным линиям сканирования магнитного носителя, после чего формировать изображения протяженных дефектов объекта в виде последовательности точек или линий. Построим изображения протяженных дефектов сложной формы с записью сигналограмм цифрового осциллографа по отдельным линиям сканирования магнитного носителя.

На рис. 1 показана фотография, выполненная с коррекцией цветности, алюминиевой пластины 1 толщиной 0,14 мм, в которой сделаны три протяженных дефекта (прорези) разной формы 2, 3 и 4, а также линия сканирования 5 магнитной головкой и масштаб изображения. Сквозные прорезы раскрытием 10—100 мкм сделаны ножницами. С целью исследования полей дефектов на магнитный носитель с объектом воздействовали импульсом магнитного поля, затем его сканировали магнитной головкой по выбранным линиям и получали зависимости электрического напряжения $U(y)$ на выходе магнитной головки от координаты y , по которым определяли свойства объектов.



Время нарастания импульсов составляло 1,5—50 мкс. Напряженность воздействующего магнитного поля изменялась в диапазоне 5—30 кА/м. Использовали магнитные носители с разными магнитными характеристиками. Экспериментальная установка описана в [13]. Исследования проводили с помощью цифрового осциллографа с выводом на монитор, измерения — в отраженном импульсном магнитном поле с использованием сплошного магнитного носителя. Источниками первичного маг-

Рис. 1. Фотография пластины из алюминия с дефектами в виде прорезей.

Рис. 2. Зависимость $U(y)$ от сигналов полей дефектов 2, 3 и 4 в виде прорезей в образце из алюминия.

нитного поля являлись плоские индукторы с площадью рабочей поверхности в несколько десятков квадратных сантиметров. Площадь одного элемента магнитного носителя при разложении информации в растр составляла $0,01 \text{ мм}^2$.

На рис. 2 показана зависимость I величины электрического напряжения $U(y)$ от координаты y , снятая с индукционной магнитной головки с сигналами полей дефектов 2, 3 и 4 в образце из алюминия толщиной $0,14 \text{ мм}$, полученная при сканировании магнитной головкой по линии 5 (см. рис. 1). Одной миллисекунде времени развертки цифрового осциллографа соответствует $1,1 \text{ см}$ расстояния.

На основании полученных результатов сформированы изображения дефектов 2, 3 и 4 (рис. 3), при этом масштаб изображения соответствует масштабу изображения, обозначенному на рис. 1. По оси ординат отложена координата смещения магнитной головки относительно поступательно перемещаемого магнитного носителя в том же масштабе, что и по оси абсцисс.

Для построения изображений дефектов выделены координаты максимумов 2, 3 и 4 зависимости I на рис. 2.

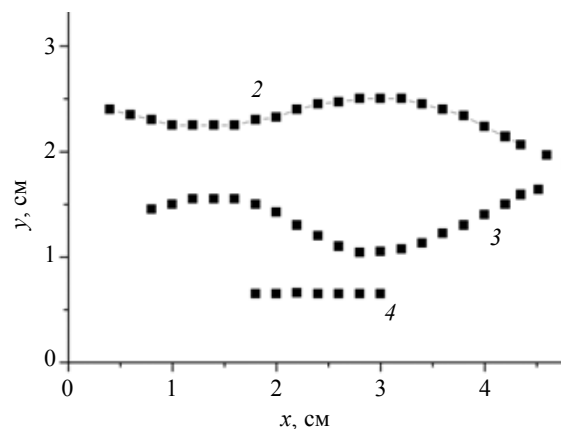
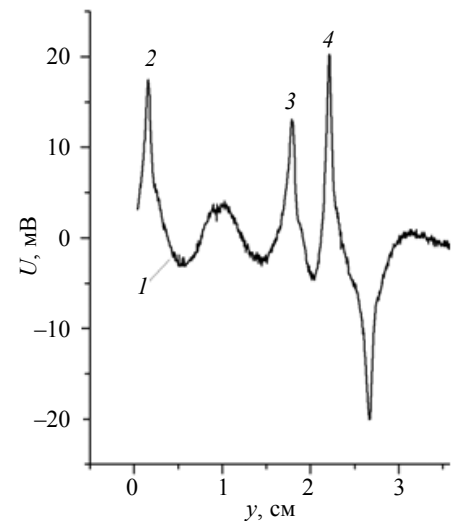


Рис. 3. Точечные изображения полей дефектов 2, 3 и 4 (см. рис.1), построенные по максимумам сигнала на линиях сканирования.

Построим сигналограммы $U(y)$ на линиях сканирования, параллельных показанной на рис. 1 линии 5 и удаленных друг от друга на $2,0 \text{ мм}$ по координате x . В результате получаем изображения полей дефектов в виде совокупностей отдельных точек, соответствующих максимумам сигнала $U(y)$ для каждой линии сканирования (см. рис. 3).

Из сравнения рис. 1 и 3 следует, что изображения полей дефектов 2, 3 и 4, построенные по максимумам сигнала на линиях сканирования, полностью соответствуют изображениям дефектов на фотографии.

Используя те же сигналограммы $U(y)$ на параллельных линиях сканирования, получаем изображения полей дефектов в виде сплошных линий, соответствующих максимумам сигнала $U(y)$ для каждой линии сканирования и обозначенных на рис. 4 как 2, 3 и 4. На этом рисунке показана фотография пластины

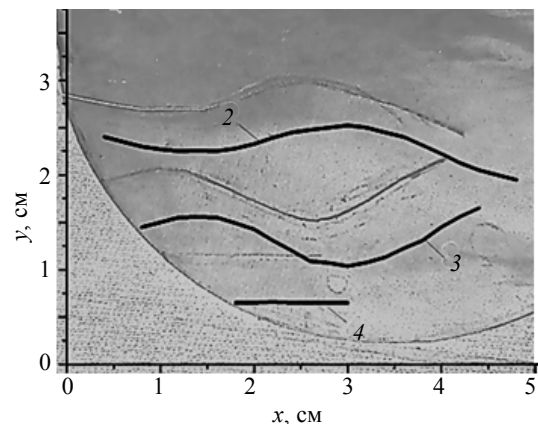


Рис. 4. Линейные изображения полей дефектов 2, 3 и 4, построенные по максимумам сигнала на линиях сканирования совместно с фотографией пластины.

из алюминия с дефектами в виде прорезей (см. рис. 1). Для построения совместного изображения полей дефектов и оптического изображения применены операции обработки изображений или цифрового вычисления в графическом редакторе. Для того чтобы изображения сигналов полей дефектов не перекрывали оптические изображения прорезей, рисунки смещены друг относительно друга в двух измерениях. Все графики построены в компьютерной программе.

Построение изображений полей может быть осуществлено при автоматическом сканировании перемещаемого поступательно магнитного носителя вращающейся магнитной головкой с получением вида на объект сверху. При этом можно достигнуть высокой производительности контроля замкнутых и незамкнутых протяженных дефектов в виде трещин и прорезей в токопроводящих покрытиях в изделиях различного ответственного назначения.

С увеличением скорости контроля объектов и в силу действия других причин возникает вопрос о влиянии изменения толщины объекта и расстояния от его поверхности до магнитного носителя на результаты измерения полей дефектов сплошности металлических покрытий.

С этой целью изготовлен образец, состоящий из двух плотно сжатых алюминиевых пластин толщиной 0,06 мм каждая, на котором были сделаны две прорези (разрезы ножницами) с расстоянием между ними около 5,0 мм.

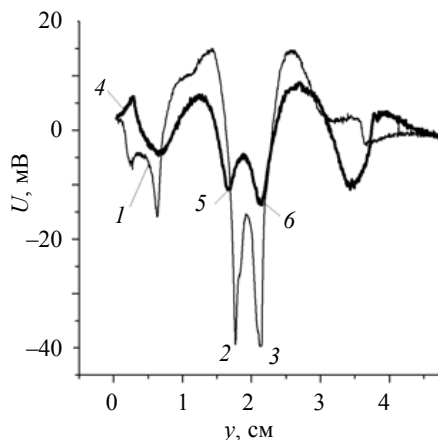


Рис. 5. Зависимость $U(y)$ 1 с сигналами полей дефектов 2, 3 и зависимость $U(y)$ 4 с сигналами полей дефектов 5, 6 в виде прорезей в образце из алюминия.

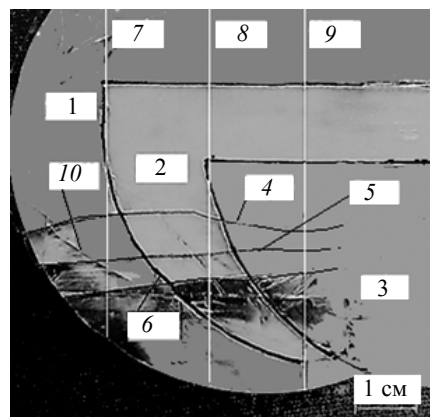


Рис. 6. Фотография образца из трех алюминиевых пластин, наложенных внахлест, с дефектами в виде прорезей.

На рис. 5 показана зависимость 1 величины электрического напряжения $U(y)$ от координаты y , снятая с индукционной магнитной головки с сигналами полей дефектов 2, 3 (указанные прорези), полученная на расстоянии 0,04 мм от поверхности образца до магнитного носителя, и зависимость $U(y)$ 4 с сигналами полей дефектов 5, 6 (те же прорези) в объекте из алюминия толщиной 0,12 мм, полученная на расстоянии 1,0 мм от поверхности образца до магнитного носителя.

Сравнение сигналов полей дефектов 2, 3 и 5, 6 на рис. 5 показывает, что достаточно точное выявление прорезей может быть осуществлено вплоть до высоты 1,0 мм над поверхностью образца из алюминия.

Влияние толщины металлического покрытия на результаты контроля исследовали с помощью образца, состоящего из трех алюминиевых пластин 1, 2 и 3 толщиной 0,06 мм каждая, наложенных друг на друга внахлест, в форме частей круга с левой стороны (рис. 6).

На рисунке показаны также масштаб изображения и складка прозрачного скотча 10 толщиной 0,04 мм, покрывающего все три пластины.

На указанном образце были сделаны сквозные прорезы 4, 5 и 6 (разрезы ножницами), проходящие через одну, две и три сложенные пластины. Таким образом, толщина образца возле прорезей по линиям сканирования 7, 8 и 9 была 0,06, 0,12 и 0,18 мм соответственно.

Результаты сканирования образца по указанным линиям представлены на рис. 7—9 ($U(y)$ — зависимость величины электрического напряжения на выходе магнитной головки от координаты y), из которых видно, что изменение толщины объекта в указанных пределах существенного влияния на выявляемость дефектов не оказывает.

При этом амплитуда полей дефектов с уменьшением толщины образца уменьшается с 70 до 8 мВ. Четвертый пик 11 обусловлен краем магнитного носителя или краем одной из пластин по

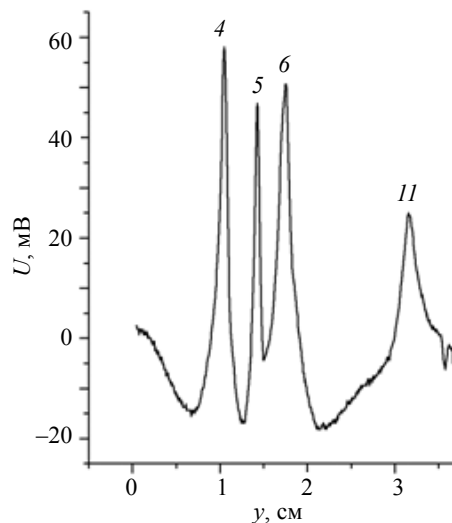


Рис. 7. Зависимость $U(y)$ с сигналами полей дефектов 4, 5 и 6 в виде прорезей в образце из алюминия толщиной 0,18 мм по линии сканирования 9.

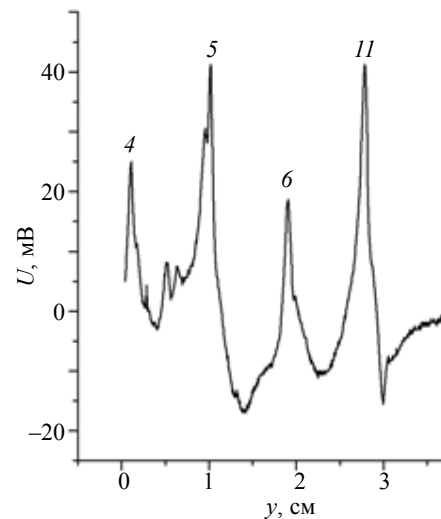


Рис. 8. Зависимость $U(y)$ с сигналами полей дефектов 4, 5 и 6 в виде прорезей в образце из алюминия толщиной 0,12 мм по линии сканирования 8.

линии сканирования, или и тем и другим. Уменьшение амплитуды сигнала поля дефекта с уменьшением толщины образца соответствует полученной авторами зависимости величины тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля от толщины электропроводящего объекта [2].

Запись полей дефектов осуществляли также воздействием на магнитный носитель с контролируемым объектом несколькими импульсами магнитного поля с перемещением плоского индуктора, что значительно расширяло возможности контроля и повышало его производительность.

Проведены исследования выявляемости протяженных дефектов в пластинах из свинца толщиной 0,23 мм и меди толщиной 0,04 мм. Расстояние между двумя прорезями в пластине свинца было 5,5 мм, а между прорезями меди — 3,5 мм. Измерения проведены на высоте 0,1 мм над пластинами. На рис. 10 показана зависимость $U(y)$ с сигналами полей указанных дефектов в пластинах из свинца 1, 2 и меди 3, 4. Здесь же обозначен сигнал поля границы 5 между двумя пластинами, установленными с наложением 2,0 мм друг на друга.

Запись полей дефектов обеих пластин осуществлена одновременно одним импульсом поля. Из рис. 10 следует, что указанный метод обнаружения дефектов применим для контроля объектов из диамагнитных и парамагнитных металлов с разной величиной удельного сопротивления, которая может изменяться в широких пределах, например, от $1,7 \cdot 10^{-8}$ (медь) до $2,2 \cdot 10^{-7}$ (свинец) Ом·м.

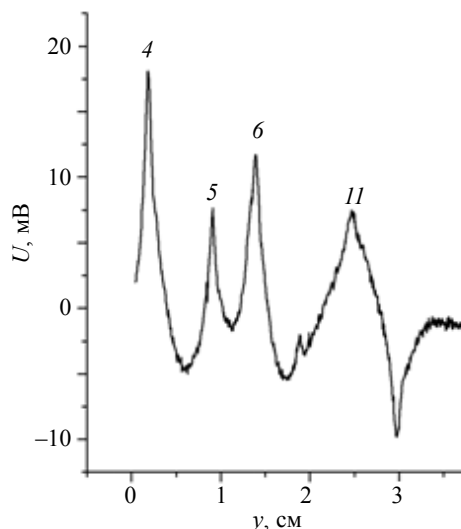


Рис. 9. Зависимость $U(y)$ с сигналами полей дефектов 4, 5 и 6 в виде прорезей в образце из алюминия толщиной 0,06 мм по линии сканирования 7.

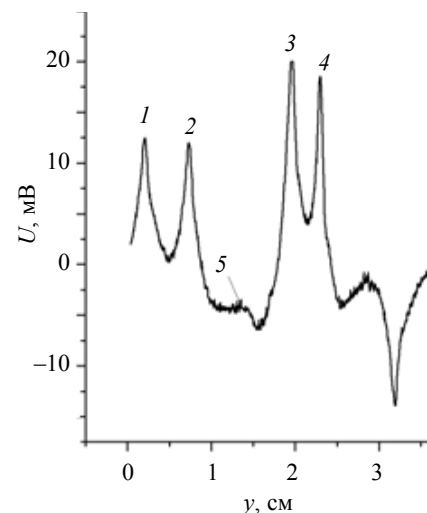


Рис. 10. Зависимость $U(y)$ с сигналами полей дефектов в виде прорезей в образцах из свинца 1, 2 и меди 3, 4 с сигналом поля границы 5.

Исследования показали, что разработанный метод позволяет обнаруживать протяженные дефекты и в объектах из ферромагнитных металлов.

Производительность контроля может быть определена следующим образом. Запись полей дефектов проводили на магнитный носитель шириной 3,5 и длиной 20 см. Таким образом, контролируемая площадь объекта равна 70 см^2 . Воздействие на магнитный носитель с объектом осуществляли пятью импульсами магнитного поля длительностью 0,1 мс каждый. Время считывания в случае воспроизведения с автоматически перемещаемым магнитным носителем составляет 5 с. Значит, скорость контроля равна $14 \text{ см}^2/\text{с}$. При необходимости она может быть увеличена на порядок.

В случае использования пленок, визуализирующих магнитные поля, в реальном масштабе времени можно достигнуть скорости контроля $0,1 \text{ м}^2/\text{с}$.

Представленный метод магнитоимпульсного контроля позволяет выявлять протяженные дефекты в металлических объектах разной формы и конфигурации (с углами, изгибами и т.д.). Диапазон толщин контролируемых объектов может быть значительно увеличен в обе стороны. К тому же разработанный метод не требует настройки на одну определенную толщину объекта.

Разработанным нами методом могут быть обнаружены протяженные дефекты в виде прорезей и трещин в металлических объектах, подвергнутых пластической деформации. Локальные и протяженные неровности поверхности объектов из электропроводящих материалов и их пластическая деформация, в результате которой поверхности объектов становятся неплоскими, существенного влияния на результаты обнаружения указанных дефектов не оказывают.

ВЫВОДЫ

Приведены результаты исследований сигналограмм, снимаемых с магнитной головки, сканирующей магнитный носитель с записанными на нем пространственными распределениями магнитных полей искусственных дефектов сплошности сложной формы в виде прорезей в пластинах из алюминия, свинца и меди. Раскрытие дефектов составляло 10—100 мкм, а толщина пластин — от 60 мкм и больше. Воздействие на них проводили одиночными импульсами магнитного поля со временем нарастания в интервале 1,5—50 мкс с записью полей дефектов на магнитный носитель. Напряженность первичного магнитного поля, создаваемого плоским индуктором, изменялась в диапазоне 5—30 кА/м.

На основании проведенных исследований найдены условия для выявления закрытых от наблюдения протяженных дефектов сложной формы в объектах из алюминия, свинца и меди в виде пластин и разработан метод магнитоимпульсного контроля протяженных дефектов сложной формы в указанных объектах. Метод позволяет осуществлять запись мгновенных распределений магнитного поля на площади 10 см^2 и более с разрешением в плоскости измерения $0,01 \text{ мм}^2$ с визуализацией импульсных магнитных полей дефектов на экране монитора с построением сигналограмм $U(y)$ на плоскости, соответствующей поверхности контролируемого объекта.

Установлено также, что изменение толщины контролируемой пластины из алюминия в пределах от 0,06 до 0,18 мм не препятствует обнаружению сквозных прорезей при воздействии на объект импульсом магнитного поля с одними и теми же параметрами, то есть без их корректировки для каждой толщины объекта. Метод испытан для объектов из материалов с удельным электрическим сопротивлением от $1,7 \cdot 10^{-8}$ до $2,2 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Проведенные исследования показали, что изменение расстояния от магнитного носителя до контролируемого объекта из алюминия от 0,1 до 1,0 мм существенного влияния на результаты контроля дефектов разработанным методом не оказывает.

Полученные результаты могут быть использованы для определения параметров дефектов сплошности в электропроводящих объектах, а также при изучении магнитных и электромагнитных методов контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сковрцов 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.
2. Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С. Неразрушающий контроль объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях // Дефектоскопия. 2010. № 11. С. 29—40.
3. Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С. Компьютерные методы нахождения распределений импульсных магнитных полей вблизи объектов из электропроводящих материалов // Дефектоскопия. 2016. № 3. С. 48—56.

4. Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С., Пивоваров В.Л. Расчеты распределений импульсных магнитных полей при гистерезисной интерференции // Дефектоскопия. 2018. № 2. С. 41—47.
5. Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С. Применение пленочных флюкс-детекторов для определения свойств электропроводящих и магнитных объектов // Дефектоскопия. 2018. № 1. С. 52—57.
6. Астахов В.И., Данилина Э.М., Еришов Ю.К. К вопросу о диагностике пластины с трещиной вихретоковым методом // Дефектоскопия. 2018. № 3. С. 39—49.
7. Жданов А.Г., Жулис Е.Г., Лунин В.П., Столяров А.А. Алгоритмы предварительной обработки вихретоковых сигналов при контроле теплообменных труб парогенераторов АЭС // Дефектоскопия. 2018. № 4. С. 54—64.
8. Егоров А.В., Поляков В.В. Вихретоковый контроль металлических материалов с помощью проекционных методов многомерного анализа данных // Дефектоскопия. 2018. № 5. С. 55—62.
9. 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.
10. Суханов Д.Я., Завьялова К.В. Представление поля электропроводящего объекта в виде суперпозиции полей элементарных вихревых токов и их томография // Известия высших учебных заведений. 2017. Т. 60. № 11. С. 28—34.
11. Суханов Д.Я., Совпель Е.С. Магнитоиндукционная томография электрических схем и приборов // Известия высших учебных заведений. 2015. Т. 58. № 10/3. С. 73—75.
12. Николаев Ю.Л., Шкатов П.Н., Чернова А.В. Исследование сигнала от тангенциальной составляющей магнитных потоков рассеяния поверхностного дефекта при его регистрации виброиндукционным преобразователем // Дефектоскопия. 2018. № 5. С. 50—54.
13. 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.
14. Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С. Способ магнитного контроля формы, ориентации и физических свойств объекта, выполненного из электропроводящего магнитного материала и закрытого от прямого наблюдения плоским ферромагнитным экраном / Пат. 20074 Респ. Беларусь, МПК С1 ВУ, G 01 N 27/72. Заявитель БНТУ. № а 20131085. Заявл. 17. 09. 2013. Опубл. 27.01.16 // Афіцыйны бюл. Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. 2016. № 2. С. 110—111.