

КОНТРОЛЬ ДЕФЕКТОВ В ПРОШЕДШЕМ ЧЕРЕЗ МЕТАЛЛ ИМПУЛЬСНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

© 2021 г. В.В. Павлюченко¹, Е.С. Дорошевич^{1,*}

¹Белорусский Национальный Технический Университет, Беларусь 220013 Минск,
пр-т Независимости, 65
E-mail: *ess.doroshevich@gmail.com

Поступила в редакцию 05.07.2021; после доработки 30.08.2021

Принята к публикации 30.08.2021

Представлены экспериментальные зависимости $U(t)$ электрического напряжения от времени t , снимаемого с индукционной магнитной головки (МГ), движущейся относительно магнитного носителя (МН) с записями магнитных полей дефектов объекта из алюминия. Контактный доступ к поверхности металлического объекта, над которой находится слой воздуха и твердого диэлектрика в произвольной пропорции и общей толщиной более 5 мм, исключен полностью. Доступ к тыльной стороне объекта также отсутствует, так как она представляет собой массивный диэлектрик. На объект с МН воздействовали импульсом магнитного поля сложной формы длительностью от 1 до 200 мкс. Исследования проведены в прошедшем через металл поле. Получены растровые изображения скрытых отверстий диаметром 3 и 6 мм в слоях алюминия толщиной 0,67 мм образцов, составленных из слоев алюминия разной толщины и разделенных слоями диэлектрика (воздуха). Толщина металлических слоев образцов составляла 1,96 и 2,96 мм. Измерения проведены в труднодоступных местах образцов. Составлен алгоритм разработанного метода. Метод позволяет значительно повысить чувствительность и точность контроля параметров дефектов и осуществлять их контроль участков объектов, где контроль другими методами невозможен.

Ключевые слова: дефект, алюминий, импульсное магнитное поле, прошедшая волна, магнитный носитель.

DOI: 10.31857/S0130308221100043

ВВЕДЕНИЕ

Магнитографический контроль первоначально был применен для контроля дефектов сварных швов изделий из ферромагнитных конструкционных сталей. С его помощью могут быть надежно выявлены непровары, трещины, поры, шлаковые включения и другие дефекты сплошности [1—3]. Недостатком этого метода является то, что обнаружению дефектов препятствует наличие усиления валика сварного шва, приводящего к неоднородному намагничиванию этой части объекта, а также наличие неоднородностей поверхности шва и прилегающих к нему участков металла.

Нами осуществлен контроль объектов из диа- и парамагнитных материалов в импульсных магнитных полях с помощью магнитного носителя и показаны преимущества этого метода перед другими. Магнитографический метод обладает высокой чувствительностью, обеспечивает высокое разрешение, позволяет осуществлять запись полей дефектов на значительных площадях поверхности объектов и производить измерения в труднодоступных участках объекта.

Авторами проведены расчеты гистерезисной интерференции (НИ) импульсного магнитного поля на магнитном носителе для перекрывающихся с разными временными задержками импульсами магнитного поля разной полярности с получением сложных импульсов разной формы [4]. Ветви гистерезисных зависимостей электрического напряжения, снимаемого с магнитной головки (МГ) для используемого магнитного носителя $U(H)$, где H — напряженность магнитного поля, представлены функциями арктангенса. Полученные расчетные распределения электрического напряжения, снимаемого с МГ при ее движении вдоль координаты x , позволяют определить с высокой точностью толщину алюминиевых пластин, в том числе алюминиевой фольги толщиной 0,01 мм. Использование НИ позволяет повысить чувствительность измерений и точность контроля толщины в несколько раз по сравнению с безгистерезисными методами.

Еще большую чувствительность и точность определения толщины алюминиевой фольги обеспечивает метод, описанный в [5] при воздействии на магнитный носитель (МН) с объектом сериями разнополярных импульсов магнитного поля линейного индуктора из одного, двух, трех, четырех, пяти и пятнадцати импульсов. Здесь представлен также алгоритм последовательности воздействий.

Как показали наши исследования, определение параметров дефектов в диамагнитных и парамагнитных объектах во многом связано с контролем толщины этих объектов.

В [6] представлены результаты исследования магнитных полей искусственных дефектов сплошности в пластинах из алюминия толщиной от $1,5 \cdot 10^{-5}$ до $2,0 \cdot 10^{-3}$ м при воздействии на них импульсами магнитного поля со временем нарастания в интервале $(1,5—100) \cdot 10^{-6}$ с с использованием МН. Диаметры неоднородностей от $1 \cdot 10^{-4}$ до $3 \cdot 10^{-3}$ м при их высоте от $1,5 \cdot 10^{-5}$ до $2,5 \cdot 10^{-3}$ м. Здесь представлены зависимости от времени сигнала полей дефектов, снимаемого с МГ с исключением сигнала фона. На основании проведенных исследований получены зависимости амплитуды электрического напряжения датчика от глубины залегания дефектов и толщины слоя материала над ними в указанных диапазонах воздействий. При этом осуществляли запись мгновенных распределений магнитных полей одновременно на значительной площади поверхности объектов.

В [7] проведены исследования сигналограмм, снимаемых с МГ, сканирующей МН с записанными на нем распределениями магнитных полей дефектов сложной формы в виде прорезей в пластинах из алюминия, свинца и меди. Раскрытие дефектов составляло 10—100 мкм при толщине пластин от 60 мкм и выше.

В [8] представлены результаты контроля дефектов сплошности с использованием пленочного флюкс-детектора в сравнении с результатами контроля с помощью магнитного носителя. Здесь показано, что указанными средствами можно вести достаточно точный и оперативный контроль отверстий, щелей и других дефектов в ферромагнитных, парамагнитных и диамагнитных металлах.

Таким образом, как показали наши исследования, МН может быть успешно применен для контроля дефектов сплошности в объектах из диамагнитных и парамагнитных металлов в импульсных магнитных полях.

При этом контроль осуществляли в отраженной волне. Магнитографический метод позволяет записывать мгновенные распределения магнитных полей на площадях в несколько квадратных дециметров с разрешением по координате 0,005 мм и высокими дифференциальной и интегральной чувствительностями. Такими характеристиками не обладает ни один из известных методов контроля, в том числе вихрековые методы [9—12], магнитодинамические [13], магнитоиндукционные [14] и другие магнитные методы [15, 16].

Для повышения скорости контроля информацию с МН можно считывать с помощью магнитооптической пленки. Однако чувствительность и точность измерений при этом уменьшаются по сравнению со считыванием индукционной магнитной головкой.

Во многих случаях условия позволяют проводить испытание материалов в прошедшей волне или одновременно в прошедшей и отраженной волнах, что может значительно повысить качество контроля.

Магнитографический контроль может быть не заменимым при контроле труднодоступных частей объекта, например, поверхностей с узкими щелями между ними, где помещается только тонкий МН. Этот метод обладает рядом других преимуществ перед широко используемыми вихрековыми (не надо сканировать поверхность объекта при записи полей) и ультразвуковыми (не требуется механического контакта с поверхностью объекта) методами.

Целью работы является повышение точности, оперативности и разрешающей способности контроля дефектов сплошности в объектах из диамагнитных и парамагнитных металлов. Поставленная цель достигается тем, что решают задачу контроля в прошедшем через объект импульсном магнитном поле с выделением полей сигналов дефектов из полного сигнала, алгебраическими действиями с этими сигналами, использованием гистерезисной интерференции импульсного магнитного поля и построением алгоритмов воздействующих магнитных полей и условий их распространения.

Таким образом, разрабатываемый метод подобно рентгеновскому методу должен обеспечить получение изображений дефектов в прошедшем через объект поле. Более того, с его помощью можно будет осуществлять контроль дефектов в труднодоступных местах объектов сложной конфигурации, например, в узких щелях, изогнутых и многослойных участках объектов, а также при контроле объектов с нескольких его сторон одновременно или с заданной временной задержкой.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Воздействовали на образцы с приложенным МН импульсами магнитного поля со временем нарастания от 1 до 100 мкс. На рис. 1 — 3 показаны зависимости величины электрического напряжения $U(t)$, снимаемого с МГ, сканирующей МН с записями магнитных полей, от времени t для образца толщиной 2,96 мм. Образец состоял из алюминиевой пластины толщиной 0,67 мм с дефектом в виде отверстия диаметром 6 мм и алюминиевыми пластинами толщиной 1,23 и 1,06 мм над и под пластиной с дефектом соответственно. Масштаб преобразования: одной миллисекунде развертки соответствует отрезок расстояния, равный 1,1 см. Ближняя поверхность указанного образца и всех

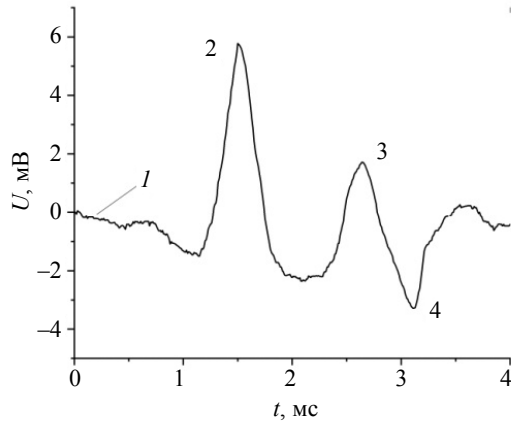


Рис. 1. Зависимость $U(t)$ I для образца из алюминия толщиной 2,96 мм с дефектом.

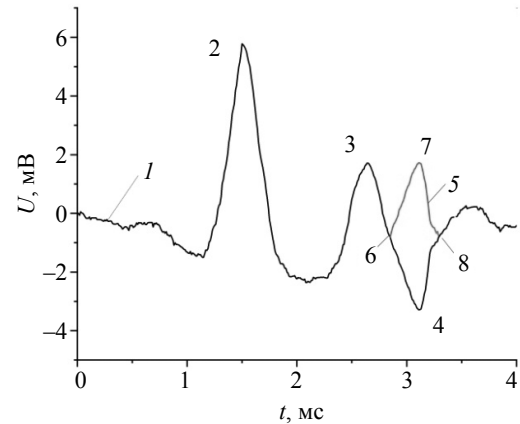


Рис. 2. Прямая I и инвертированная 5 зависимости $U(t)$ для образца из алюминия толщиной 2,96 мм с дефектом.

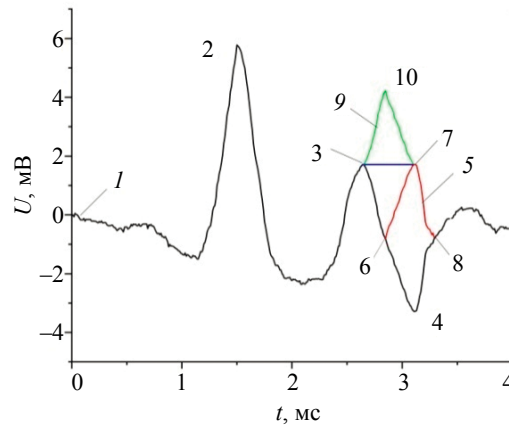


Рис. 3. Прямая I и инвертированные 5 и 9 зависимости $U(t)$ для образца из алюминия толщиной 2,96 мм с дефектом.

остальных образцов, информация о которых показана на последующих рисунках, недоступна для механического контакта, так как над ней находится слой воздуха и твердого диэлектрика. Толщина этого слоя составляет более 5 мм. Воздух и диэлектрик могут чередоваться в нем произвольным образом, что никак не отразится на результатах используемого метода, чего нельзя сказать, например, об ультразвуковом методе. Доступ к тыльной стороне образца, кроме узкого зазора между ней и слоем металла, также отсутствует, так как она представляет собой массивный диэлектрик.

На рис. 1 показана зависимость $U(t)$ с пиком 2 края МН и пиками 3 и 4 сигнала дефекта. Дальнейшая обработка полученной информации представлена на рис. 2, где показана прямая зависимость $U(t)$ I с пиком 2 края МН и пиками дефекта 3 и 4, а также участок инвертированной зависимости $U(t)$ 5 с точкой 6, соответствующей положению оси дефекта, инвертированным пиком дефекта 7 и точкой 8, общей для зависимостей I и 5 .

На рис. 3 изображены те же зависимости $U(t)$, что и на рис. 2, с теми же обозначениями и добавлена вторая инвертированная зависимость 9 с пиком 10 и отрезок прямой $3 - 7$. Ширина дефекта соответствует отрезку времени между пиками 3 (2,63 мс) и 7 (3,1 мс) и согласно масштабу преобразования составляет 5,17 мм, что примерно на 0,8 мм меньше диаметра отверстия.

Результаты измерений для образца из алюминия меньшей толщины (верхний слой 1 мм, пластина 0,67 мм с дефектом диаметром 6 мм, нижний слой 0,06 мм) представлены на рис. 4. Здесь показана прямая зависимость $U(t)$ I с пиком 2 края МН и пиками дефекта 3 и 4, а также участок

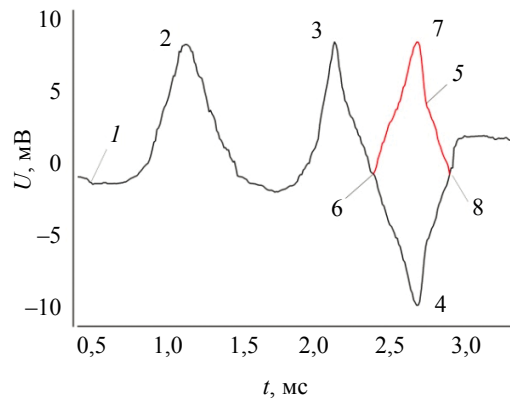


Рис. 4. Прямая 1 и инвертированная 5 зависимости $U(t)$ для образца из алюминия толщиной 1,96 мм с дефектом.

инвертированной зависимости $U(t)$ 5 с пиком 6, соответствующим положению оси дефекта, инвертированным пиком 7 сигнала дефекта и точкой 8, общей для зависимостей 1 и 5. Ширина дефекта соответствует отрезку времени между пиками 3 (2,12 мс) и 7 (2,67 мс) и согласно масштабу преобразования составляет 6,05 мм, что с точностью до 0,05 мм соответствует диаметру отверстия.

Таким образом, полученные результаты позволяют с высокой точностью контролировать параметры внутренних дефектов в виде скрытых отверстий диаметром в несколько миллиметров в алюминиевых образцах толщиной от доли миллиметра до нескольких миллиметров. При этом с увеличением толщины слоя металла за дефектом расстояние между дифференциальными максимумами сигнала дефекта 3 и 4 уменьшается.

При построении графиков на рис. 1—4 была произведена обработка полученной информации с усреднением сигнала по нескольким точкам и его сглаживание, а также с применением других операций. В результате этих действий в несколько раз (в 2 – 10 раз) уменьшено влияние фона приборных и сетевых наводок и помех, эфирного фона электромагнитных помех, фона локальных дефектов МН (локальных изломов и повреждений рабочего слоя при его локальном физическом износе), а также влияние резонансного фона самовозбуждения измерительной системы, фона помех, создаваемых нарушением контакта МГ и МН при контактном коллекторном съеме напряжения с вращающейся МГ.

На последующих рисунках (рис. 5—8) приведены зависимости $U(t)$ без устранения фонов помех, то есть без дополнительной обработки полученной информации.

На рис. 5 показаны зависимости $U(t)$ для образца из алюминия толщиной 1,96 мм с дефектом (отверстие диаметром 6 мм) с разной величиной смещения линии сканирования МГ относительно

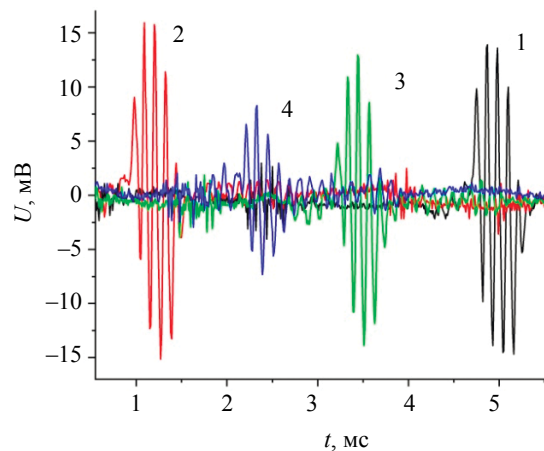


Рис. 5. Зависимости $U(t)$ для образца из алюминия толщиной 1,96 мм с дефектом: 1, 2, 3 и 4 — смещение относительно оси дефекта равно соответственно 0, 1, 2, 3 мм.

оси дефекта. В качестве датчика использован дискретный датчик магнитного поля (ДДМП), состоящий из магнитных полос. Амплитуда пиков ДДМП при воздействии на него одним импульсом магнитного поля пропорциональна максимальной величине напряженности измеряемого магнитного поля. В случае воздействия несколькими импульсами амплитуды пиков соответствуют напряженностям магнитного поля, определяемым по установленным нами арктангенсным зависимостям ветвей гистерезиса используемого магнитного носителя [5].

Сравнение пиков сигнала дефекта 3 и 4 на рис. 1 и максимальных пиков распределения 1, соответствующих сканированию МГ по оси дефекта, позволяет определить преимущества использования сплошного и дискретного датчиков магнитного поля. Так, дифференциальные зависимости (см. рис. 1) дают довольно точные границы дефекта, а интегральные (см. рис. 5) обладают большей чувствительностью и дают возможность находить распределение напряженности магнитного поля над (под) дефектом и на других участках поверхности объекта.

Для повышения чувствительности измерений откорректируем параметры элементов измерительной системы в сторону приближения частоты ее собственных колебаний к частоте получаемых сигналов и сравним полученные зависимости с зависимостями на рис. 5. Так, на рис. 6 показаны зависимости $U(t)$ для образца из алюминия толщиной 1,96 мм с внутренним дефектом диаметром 6 мм. Зависимости 1 и 3 получены с начальной чувствительностью, соответствующей чувствительности измерений на рис. 5, а 2 и 4 — с повышенной чувствительностью. Из сравнения рис. 5 и рис. 6 видно, что относительное распределение пиков осталось прежним, а их амплитуда увеличилась примерно в 1,35 раза. При этом пики резонансных частот (дополнительные пики) в зависимостях на рис. 6 не проявляются.

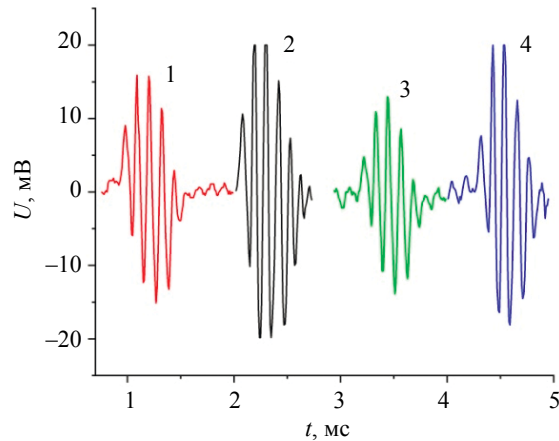


Рис. 6. Зависимости $U(t)$ для образца с дефектом: 1, 2 — сдвиг относительно оси дефекта 1 мм; 3 и 4 — сдвиг 2 мм.

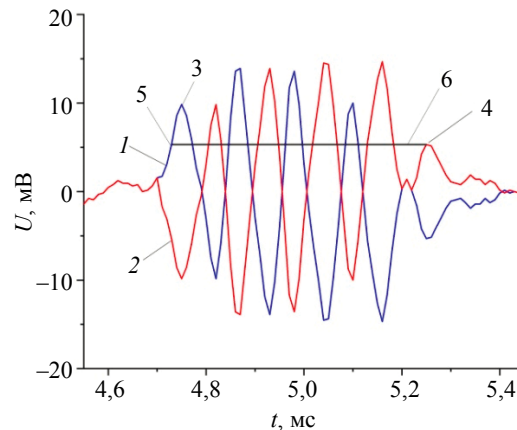


Рис. 7. Прямая 1 и инвертированная 2 зависимости $U(t)$ с пиками 3 и 4 и отрезком изображения дефекта 6 между точками 5 и 4 по горизонтальной оси дефекта.

Перенесем зависимость $U(t)$ 1 рис. 5 на рис. 7 и обозначим ее цифрой 1. Построим инвертированную ей зависимость 2. Найдем временную координату пика 4 (5,25 мс; 5,3125 мВ), построим отрезок прямой $U = 5,3125$ мВ до пересечения с зависимостью 1 в точке (4,73 мс; 5,3125 мВ).

Этот отрезок прямой является отрезком изображения дефекта и соответствует положению его диаметра по горизонтали. Установим шаг сканирования МН магнитной головкой, равный 0,43 мм, и на основании полученных табличных данных измерений построим изображение 9 дефекта на рис. 8 в виде 15 отрезков линий (растровое изображение, вид сверху).

На рис. 8 показана также зависимость $U(t)$, изображенная на рис. 2, с такими же обозначениями 1—8. Здесь для привязки к координатам МН представлена растровая полоса 10, соответствующая переднему краю МН с выбранным уровнем сигнала в точке (1,48 мс; 5,156 мВ) вблизи пика 2 и растровая полоса 11 с уровнем сигнала в точке (3,83 мс; -0,5 мВ).

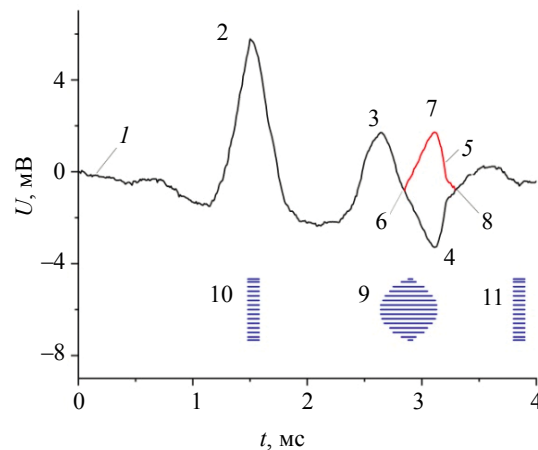


Рис. 8. Прямая 1 и инвертированная 5 зависимости $U(t)$ для образца из алюминия толщиной 2,96 мм с растровым изображением дефекта 9.

Растровое изображение дефекта 9 и полос 10 и 11 выполнено в следующем масштабе: одной миллисекунде развертки соответствует отрезок 1,1 см расстояния по горизонтали, а одному милливольту сигнала соответствует отрезок 2,25 мм расстояния по вертикали. Положению вертикальной оси изображения дефекта 9 соответствует координата точки 6 на рис. 8.

Таким образом, получено изображение дефекта в прошедшем через объект поле, аналогичное рентгеновскому изображению этого дефекта.

Растровое изображение внутреннего дефекта в прошедшей волне может быть получено не только с помощью ДДМП, как это показано выше. Для этого может быть использована дифференциальная зависимость $U(t)$ 1, соответствующая движению МГ вдоль горизонтальной оси дефекта, а также зависимости $U(t)$ при движении МГ вдоль параллельных этой оси направлений с заданным шагом сканирования. При этом положению дефекта соответствуют координаты точек 3 и 4 зависимости 1 на рис. 1 и аналогичные точки зависимостей $U(t)$ сканирования в параллельных направлениях. То же самое может быть сделано с использованием точек 3 и 7 зависимости 1 на рис. 2. При другом способе выделения информации сигнал $U(t)$ 1 на рис. 1 может быть проинтегрирован с помощью электронного интегрирующего устройства в процессе считывания информации с МН или при ее последующей обработке и получена зависимость, близкая по своим параметрам к зависимости 9 на рис. 3. В результате будет построен отрезок горизонтальной прямой между точками 3 и 7 зависимости 1 на рис. 3, соответствующий положению диаметра дефекта.

Преимущества метода могут быть показаны с использованием чертежа на рис. 9. Здесь последовательно сверху вниз изображены: слой диэлектрика 1 толщиной 0,5 мм, слой воздуха 2 (5 мм), алюминиевая пластина 3 (0,4 мм), слой воздуха 4 (0,5 мм), алюминиевая пластина 5 (1 мм), алюминиевая пластина 6 (0,67 мм) с отверстием 7 диаметром 3 мм, алюминиевая пластина 8 (0,18 мм), слой воздуха 9 (0,5 мм) с магнитным носителем 10 и массивный слой диэлектрика 11 (5 мм и более).

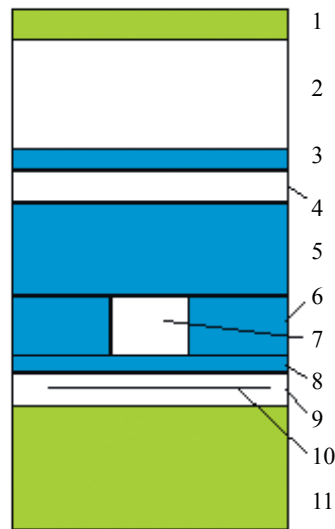


Рис. 9. Образец из алюминия с дефектом и слоями воздуха, диэлектрика и алюминия.

Слой воздуха 2, в котором могут находиться части твердого или жидкого диэлектрика в любой пропорции, удаляет объект контроля от средств контроля и не позволяет достаточно эффективно использовать ультразвуковые, магнитные и электромагнитные методы контроля.

Тонкий слой воздуха 9 не может обеспечить доступ в него преобразователей магнитного поля, кроме магнитного носителя толщиной менее 0,1 мм, работающего в режиме остаточного намагничивания.

В результате воздействия на указанный образец с МН импульсом магнитного поля получена зависимость $U(t)$ (рис. 10) с пиками сигнала 2 и 6 края МН, пиком сигнала дефекта МН 3, пиками сигнала дефекта образца 4 и 5 и сигналами фона помех и наводок 7. На основании указанной зависимости построено растровое изображение 8 дефекта образцас изображением полос, соответствующих пикам краев МН 2 и 6 и пику дефекта МН 3.

Изображение дефекта 7 (рис. 9) было получено также при толщине пластины 8 (см. рис. 9) из алюминия около 1 мм и больше.

Исследования показали, что дефект 7 может быть выявлен при толщинах слоев диэлектрика и металла 1 — 5, более чем в 3 раза превосходящих их указанные размеры.

Представленный метод позволяет значительно повысить чувствительность и точность определения параметров дефектов за счет оптимизации параметров импульсов первичного магнитного

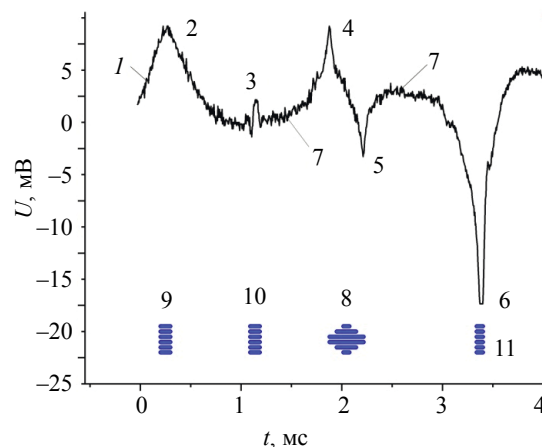


Рис. 10. Зависимость $U(t)$ для образца, изображенного на рис. 9, с растровым изображением дефекта 8.

поля и способов записи, обработки и выделения полей дефектов и фона и осуществлять контроль труднодоступных участков объектов, где другие методы неприменимы.

Составлен алгоритм разработанного метода с указанием геометрических размеров и формы источника первичного магнитного поля, максимальной напряженности магнитного поля в зоне контроля, амплитуды и времени нарастания импульса поля, параметров переднего и заднего фронтов импульса, амплитуд и времени нарастания выбросов поля, характеристик гистерезисных ветвей используемого магнитного носителя. Алгоритм содержит также методы обработки полученной информации с выделением сигнала поля дефекта из полного сигнала с исключением фона сигнала, обусловленного неоднородностью магнитного поля локального источника, фона дефектов и структурных неоднородностей объекта, эфирного электромагнитного фона, фона самовозбуждения измерительной системы, включающей МГ, на сигналах краев МН, дефектов МН, приборных и сетевых наводок и помех, дефектов объекта, эфирных электромагнитных полей, а также с исключением фона контактного коллекторного съема с МГ.

Разрабатываемые нами алгоритмы контроля с помощью МН могут быть применены при использовании других известных преобразователей, например, матриц индукционных катушек и вихретоковых преобразователей, матриц преобразователей Холла, магнитооптической пленки, пленочных флюкс-детекторов.

ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований получены экспериментальные зависимости $U(t)$ электрического напряжения от времени t , снимаемого с индукционной магнитной головки (МГ), движущейся относительно магнитного носителя (МН) с записями магнитных полей дефектов в виде отверстий в алюминиевых пластинах, закрытых слоями металла. При этом контактный доступ к поверхности металлического объекта, над которой находится слой воздуха и твердого диэлектрика, исключен полностью. Толщина этого слоя составляет более 5 мм. Воздух и диэлектрик могут чередоваться в нем произвольным образом. Доступ к тыльной стороне объекта также отсутствует, так как она представляет собой массивный диэлектрик. Внутри образца также отсутствуют воздушные зазоры, затрудняющие процесс контроля. Их ширина составляет 0,5 мм.

На объект с МН воздействовали импульсом магнитного поля сложной формы с выбросами магнитного поля общей длительностью от 1 до 200 мкс. Исследования проведены в прошедшем через металл поле. Получены растровые изображения скрытых отверстий диаметром 3 и 6 мм в слоях алюминия толщиной 0,67 мм образцов, составленных из слоев алюминия разной толщины и разделенных слоями диэлектрика (воздуха). Суммарная толщина металлических слоев образцов составляла 1,96 и 2,96 мм. Показаны результаты измерения в труднодоступном месте образца, а именно, в щели шириной 0,5 мм между металлическими и диэлектрическими слоями образца. Составлен алгоритм разработанного метода с указанием параметров переднего и заднего фронтов импульса поля, амплитуд и времени нарастания выбросов поля, выделением сигнала поля дефекта из полного сигнала с исключением фона сигнала, обусловленного неоднородностью магнитного поля локального источника, фона дефектов МН и структурных неоднородностей, фона самовозбуждения измерительной системы, других фонов электрических помех и наводок.

Представленный метод позволяет значительно повысить чувствительность и точность определения параметров дефектов за счет оптимизации параметров импульсов первичного магнитного поля и способов записи, обработки и выделения полей дефектов и фона и осуществлять контроль труднодоступных участков объектов, где другие методы не применимы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фалькевич А.С., Хусанов М.Х.* Магнитографический контроль сварных соединений. М.: Машиностроение, 1966. 176 с.
2. *Козлов В.С.* Техника магнитографической дефектоскопии. Мн.: Вышэйшая школа, 1976. 256 с.
3. *Михайлов С.П., Щербинин В.Е.* Физические основы магнитографической дефектоскопии. М.: Наука, 1992. 238 с.
4. *Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S.* Hysteretic Interference of Time-Overlapping Magnetic Field Pulses // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 12. P. 949—956.
5. *Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S.* Imaging Electric Signals of a Magnetic Field Transducer with Hysteretic Interference for Testing Metals in Pulsed Magnetic Fields // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 11. P. 907—914.

6. *Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S.* A Method of Pulsed Magnetic Testing for Discontinuities in Objects Made of Diamagnetic and Paramagnetic Metals Using a Magnetic Carrier // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 12. P. 877—886.
7. *Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S.* Detecting Extended Complex-Shaped Defects in Electroconductive Plates Using a Magnetic Carrier // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 3. P. 217—224.
8. *Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S.* Testing for Discontinuities in Metals Using Film Flux // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 1. P. 48—58.
9. *Ферстер Ф.* Неразрушающий контроль методом магнитных полей рассеяния. Теоретические и экспериментальные основы выявления поверхностных дефектов конечной и бесконечной глубины // Дефектоскопия. 1984. № 12. С. 13—18.
10. *Егоров А.В., Поляков В.В.* Вихретоковый контроль металлических материалов с помощью проекционных методов многомерного анализа данных // Дефектоскопия. 2018. № 5. С. 55—62.
11. *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.
12. *Астахов В.И., Данилина Э.М., Ершов Ю.К.* К вопросу о диагностике пластины с трещиной вихретоковым методом // Дефектоскопия. 2018. № 3. С. 39—49.
13. *Лухвич А.А., Булатов О.В., Лукьянов А.Л.* Возможности магнитодинамического метода контроля толщины покрытий с неоднородными свойствами (эксперимент) // Дефектоскопия. 2009. № 11. С. 46—53.
14. *Суханов Д.Я., Совпель Е.С.* Магнитоиндукционная томография электрических схем и приборов // Известия высших учебных заведения. 2015. Т. 58. № 10/3. С. 73—75.
15. *Новослугина А.П., Смородинский Я.Г.* Анализ топографии магнитных полей рассеяния в ферромагнитных изделиях // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87. № 2. С. 33—37.
16. *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.