

## МЕТОД МАГНИТОИМПУЛЬСНОГО КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ СПЛОШНОСТИ В ОБЪЕКТАХ ИЗ ДИА- И ПАРАМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛОВ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТНОГО НОСИТЕЛЯ

© 2018 г. В.В. Павлюченко<sup>1,\*</sup>, Е.С. Дорошевич<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет,  
Беларусь 220013 Минск, пр-т Независимости, 65  
\*E-mail: vv.pavlyuchenko@gmail.com

Поступила в редакцию 11.04.2018

Представлены экспериментальные зависимости величины электрического напряжения  $U(t)$ , снимаемого с индукционной магнитной головки при сканировании ею магнитного носителя с записями магнитных полей искусственных дефектов сплошности в пластинах из алюминия толщиной от  $1,5 \cdot 10^{-5}$  до  $3,0 \cdot 10^{-3}$  м. Напряженность импульсов первичного магнитного поля, создаваемого плоским индуктором, изменялась в диапазоне  $(2-50) \cdot 10^3$  А/м. Время нарастания импульсов с выбросами поля было в интервале  $(1,5-100) \cdot 10^{-6}$  с. Разработан метод контроля объектов из электропроводящих материалов, обеспечивающий оптимальные геометрические размеры индуктора, амплитуду, направления, время нарастания, форму переднего и заднего фронта основного импульса поля, а также амплитуду, время нарастания, число и полярности выбросов поля с осуществлением операций сглаживания, вычисления, выделения полезного сигнала с исключением сигнала фона и распознавания записанной на магнитном носителе информации путем сравнения полученных распределений сигналов с эталонными или расчетными при установлении сигналов минимальных дефектов. Метод позволяет повысить в несколько раз точность и скорость контроля.

*Ключевые слова:* дефекты, магнитоимпульсный метод контроля, магнитный носитель, диа- и парамагнитные металлы.

**DOI:**

### ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы является разработка метода магнитоимпульсного контроля параметров дефектов сплошности цилиндрической и другой формы в объектах из диа- и парамагнитных металлов с помощью магнитного носителя, повышающего точность определения параметров дефектов сплошности в них.

Для контроля дефектов сплошности таких как поры, инородные включения и других в изделиях из ферромагнитных материалов применяются магнитные и электромагнитные методы. Контроль качества сварных швов может быть успешно осуществлен магнитографическим методом. Разработка конструкций магнитографических дефектоскопов с импульсной и растровой телевизионной индикацией с получением изображений полей дефектов, исследование намагничивания изделий и магнитных носителей и результаты других исследований изложены в [1]. Основополагающими работами по магнитографии являются также [2] и более поздняя [3].

Возможности обнаружения микродефектов сварных соединений прямошовных электросварных труб магнитным методом контроля рассмотрены в [4].

Применение и экспериментальное исследование магнитографического контроля осуществлено в [5, 6], где представлены комплекс для магнитографического контроля ферромагнитных объектов и результаты контроля объектов при их намагничивании перемещаемым постоянным магнитом.

Идентификация кольцевых сварных швов на магнитограммах дефектоскопов поперечного намагничивания рассмотрена в [7].

Примером применения в дефектоскопии матричных преобразователей является конструкция магнитоиндукционного интроскопа для дефектоскопии металлических объектов [8].

Среди работ с использованием токовых вихревого метода контроля дефектов отметим [9], в которой исследованы вихревые токи и поля проводящих и намагничивающихся шаровых включений в немагнитную среду.

Все перечисленные методы позволяют достаточно точно контролировать параметры дефектов в изделиях, но имеют ряд существенных недостатков: они не обладают высоким разрешением в плоскости измерения, не позволяют анализировать мгновенные распределения магнитных полей, не обеспечивают оперативный контроль на значительной поверхности изделия и требуют повышения производительности контроля.

Таким образом, возникает необходимость разработки методов контроля объектов, позволяющих определять свойства объекта на большой площади поверхности за короткий промежуток

времени с высоким разрешением свойств в плоскости измерения и по глубине объекта, а также записывать и анализировать мгновенные распределения магнитных полей в заданные моменты времени воздействия на объект с приложенным к нему преобразователем магнитного поля.

Новые методы контроля должны быть созданы на базе пленочных преобразователей магнитного поля с оптимизацией параметров первичных магнитных полей, измерительных систем и методов обработки полученной информации. Такие работы ведутся авторами в настоящее время [10—14] с использованием полученных закономерностей распространения импульсных магнитных полей вблизи электропроводящих объектов. Так, в [10] представлена впервые полученная зависимость величины максимальной тангенциальной составляющей напряженности вторичного магнитного поля, созданного электропроводящим объектом, от его толщины, а в [11] описана полученная нами гистерезисная интерференция магнитного поля.

С помощью компьютерных методов нахождения распределений импульсных магнитных полей и обработки полученной информации применение каждой из этих закономерностей позволяет повысить на порядок точность измерения толщины и удельной электропроводности электропроводящих объектов.

### ОПИСАНИЕ МАГНИТОИМПУЛЬСНОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАГНИТНОГО НОСИТЕЛЯ

Разработанный метод контроля дефектов заключается в следующем. На объект с приложенным к нему магнитным носителем воздействуют импульсом магнитного поля, после чего считывают информацию с магнитного носителя и путем анализа полученных распределений магнитных полей определяют параметры дефектов и структурных неоднородностей в объекте.

Новым в методе является то, что определяют оптимальные геометрические параметры индуктора, оптимальную амплитуду основного импульса поля, время его нарастания, формы переднего и заднего фронта, а также амплитуду, время нарастания, число и полярности выбросов магнитного поля. Задают минимальные размеры дефектов, которые следует обнаружить, и параметры соответствующих им сигналов.

При этом выбирают одно или несколько направлений приложенного поля, а при обработке полученной информации применяют операции сглаживания, вычисления, выделения полезного сигнала и операции распознавания записанной на магнитном носителе информации о дефектах путем сравнения полученных распределений сигналов с распределениями для эталонных объектов.

Разработанный метод контроля объектов из электропроводящих материалов позволяет повысить в несколько раз точность и скорость контроля дефектов сплошности в объектах из диа- и парамагнитных металлов.

Для достижения поставленной цели проведены исследования распределения магнитных полей, созданных индукционными токами вблизи искусственных дефектов сплошности и структурных неоднородностей в электропроводящих материалах.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследованы магнитные поля искусственных дефектов сплошности в пластинах из алюминия толщиной от  $1,5 \cdot 10^{-5}$  до  $3,0 \cdot 10^{-3}$  м при воздействии на них импульсами магнитного поля со временем нарастания в интервале  $(1,5—100) \cdot 10^{-6}$  с с использованием магнитного носителя. Экспериментальная установка описана в [10].

Зависимости тока индуктора от времени определяли путем измерения электрического напряжения, снимаемого с измерительного сопротивления источника магнитного поля. Напряженность первичного магнитного поля, создаваемого плоским индуктором, изменялась в диапазоне  $(2—50) \cdot 10^3$  А/м. Выход магнитной головки (МГ) был подключен к входу цифрового осциллографа, соединенного с монитором.

Применяли как сплошные образцы, так и образцы, полученные путем послойного моделирования и состоящие из наборов пластин. Диаметры неоднородностей составляли 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. Получены зависимости величины электрического напряжения от времени  $U(t)$ , снятые с индукционной магнитной головки, считывающей информацию с магнитного носителя с записями магнитных полей искусственных дефектов сплошности на поверхности пластин из алюминия.

Измерения проведены в отраженном импульсном магнитном поле с использованием сплошного магнитного носителя. Предложенный метод позволяет осуществлять запись полей дефектов на

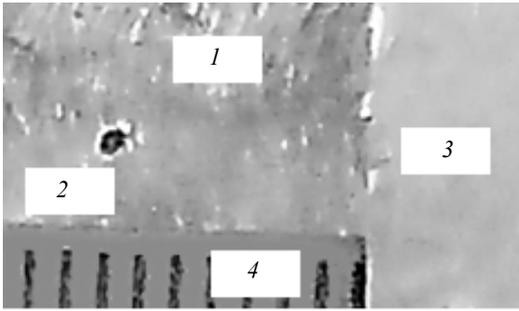


Рис. 1. Фотография алюминиевой фольги 1 с дефектом 2, фольгой 3 и миллиметровой линейкой 4.

площади поверхности  $1,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$  и более за время порядка  $1,0 \cdot 10^{-4} \text{ с}$  и осуществлять контроль объектов с разрешением в плоскости измерения  $1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ . На рис. 1 показана фотография алюминиевой фольги 1 толщиной  $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$  со сквозным искусственным дефектом 2 диаметром порядка  $1,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Во время измерения снизу и сверху фольги вплотную к ней были прижаты два слоя фольги из алюминия такой же толщины без дефектов таким образом, что дефект был

закрыт фольгой с обеих сторон. Верхняя фольга 3 сдвинута по отношению к фольге 1 с дефектом для определения размеров дефекта путем сравнения с приложенной миллиметровой линейкой 4.

На рис. 2 показана зависимость величины электрического напряжения от времени  $U(t)$ , снятая с индукционной магнитной головки и соответствующая магнитному полю дефекта (двухполярный сигнал при  $t = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ ) и распределению магнитного поля фона на поверхности фольги, накрывающей фольгу с дефектом, в отраженном поле.

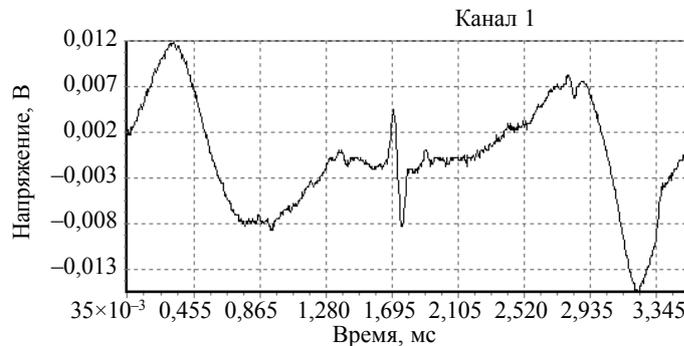


Рис. 2. Зависимость величины электрического напряжения от времени  $U(t)$ , снятая с МГ, с сигналом поля дефекта диаметром порядка  $1,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  в слое алюминиевой фольги толщиной  $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ , помещенной между двумя такими же слоями без дефектов, и с сигналом поля фона.

Распределение электрического напряжения  $U(t)$  фона обусловлено намагничиванием магнитного носителя первичным и вторичным источниками магнитного поля, влияниями краев магнитного носителя, неоднородностями магнитного поля первичного источника и другими факторами.

На рис. 3 показана зависимость  $U(t)$ , соответствующая магнитному полю фона, полученному для трех слоев фольги толщиной  $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$  без дефектов.

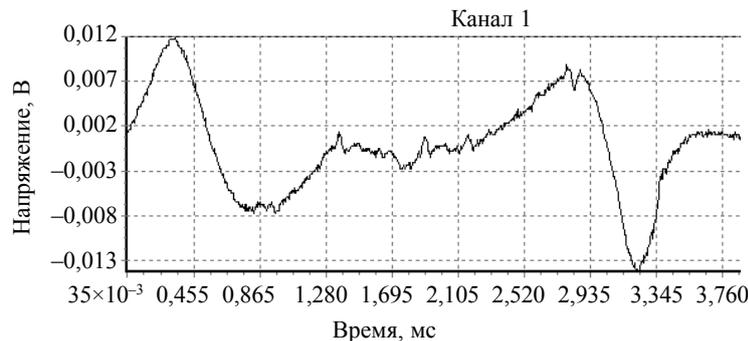


Рис. 3. Зависимость величины электрического напряжения от времени  $U(t)$ , снятая с МГ и соответствующая магнитному полю фона.

Для выделения поля дефекта следует из полного сигнала (см. рис. 2) вычесть сигнал фона (см. рис. 3). Распределение сигнала фона или тестового сигнала можно найти для эталонного объекта, не имеющего дефект, или для распределения  $U(t)$  над ближайшим заведомо бездефектным участком контролируемого объекта. Выделить поле дефекта можно и другими способами.

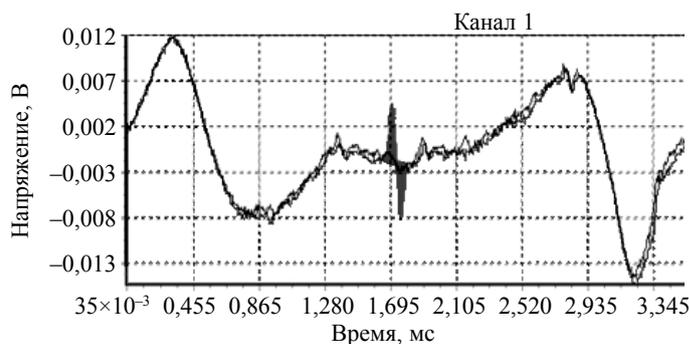


Рис. 4. Зависимость величины электрического напряжения от времени  $U(t)$ , снятая с МГ и соответствующая магнитному полю дефекта (см. рис. 1), с полем фона и локальными сигналами поля фона.

Так, на рис. 4 показана зависимость  $U(t)$ , соответствующая магнитному полю дефекта (см. рис. 1) с локальными сигналами поля фона. Здесь осуществлено попиксельное вычитание сигнала фона (см. рис. 3) из полного (см. рис. 2) по частям распределений.

Зависимость  $U(t)$ , соответствующая магнитному полю дефекта (см. рис. 1) с удаленным сигналом фона, обусловленным намагничиванием магнитного носителя, и оставшимися локальными сигналами, не имеющими отношения к сигналу дефекта, представлена на рис. 5.

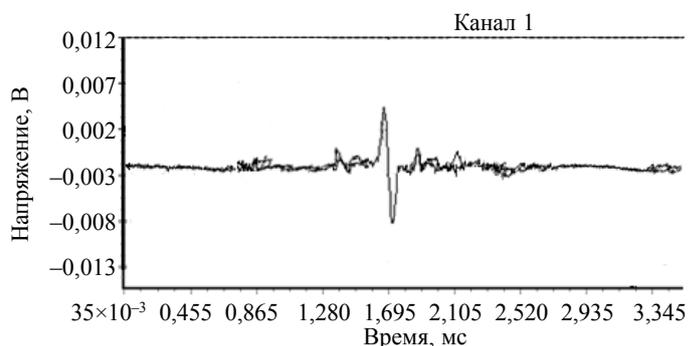


Рис. 5. Зависимость величины электрического напряжения от времени  $U(t)$ , снятая с МГ, соответствующая магнитному полю дефекта (см. рис. 1), с локальными сигналами поля фона.

Здесь сохранены локальные отклонения напряжения, вызванные различными помехами и другими факторами таким образом, что совместно с изображением поля полезного сигнала видны параметры обусловленных ими погрешностей измерения.

Распределения  $U(t)$ , снятые с индукционной магнитной головки в зависимости от глубины залегания дефекта в образце, собранном из нескольких слоев алюминиевой фольги, показаны на рис. 6.

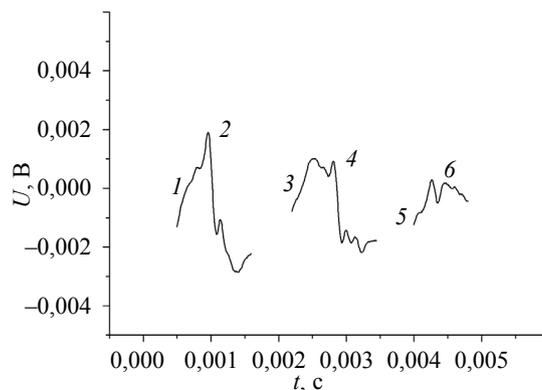


Рис. 6. Зависимости 1, 3, 5  $U(t)$ , снятые с МГ, с сигналами 2, 4, 6 полей дефекта диаметром  $1,0 \cdot 10^{-3}$  м и высотой  $1,5 \cdot 10^{-5}$  м в алюминиевой фольге толщиной  $1,7 \cdot 10^{-4}$  м (см. рис. 1) в зависимости от глубины залегания дефекта:

1 —  $2,25 \cdot 10^{-5}$ ; 3 —  $7,75 \cdot 10^{-5}$ ; 5 —  $1,475 \cdot 10^{-4}$  м.

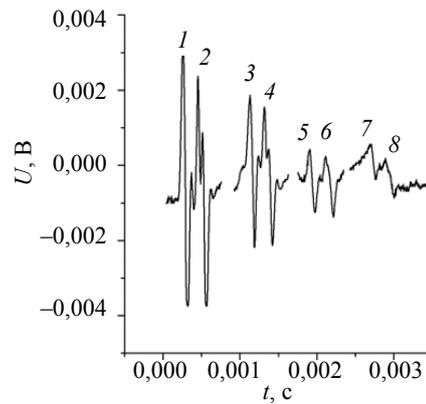


Рис. 7. Зависимость  $U(t)$ , снятая с МГ, с сигналами 1—8 магнитных полей дефектов в алюминиевой фольге толщиной  $7 \cdot 10^{-5}$  м с подложенной снизу такой же фольгой и наложенными на нее сверху слоями фольги толщиной: 1, 2 —  $1,5 \cdot 10^{-5}$ ; 3, 4 —  $7 \cdot 10^{-5}$ ; 5, 6 —  $1,4 \cdot 10^{-4}$ ; 7, 8 —  $2,1 \cdot 10^{-4}$  м.

Определена зависимость амплитуды сигнала от толщины  $d$  материала над дефектом. Образец представлял собой алюминиевую фольгу толщиной  $7 \cdot 10^{-5}$  м с двумя сквозными искусственными дефектами диаметром порядка  $1,0 \cdot 10^{-3}$  м с прижатой снизу такой же фольгой без дефекта. Расстояние между центрами дефектов  $2,5 \cdot 10^{-3}$  м. При измерениях на фольгу с дефектами сверху последовательно накладывали слои алюминиевой фольги разной толщины и получали зависимости  $U(t)$ , изображенные на рис. 7. Из него можно найти закономерности изменения амплитуды сигнала с увеличением толщины материала над дефектом.

При разработке указанного метода контроля проведены исследования разных способов выделения полезного сигнала (сигнала дефекта) из полного. Выше было показано вычитание сигнала фона по частям из полного, при котором были сохранены все сигналы локальных неоднородностей. Выделение сигнала дефекта может быть осуществлено также путем дополнительных воздействий на объект с магнитным носителем.

Ниже показан пример вычитания всего сигнала фона из полного для выделения сигналов двух близко расположенных дефектов.

На рис. 8 изображены зависимость  $U(t)$ , соответствующая распределениям магнитных полей 1 с сигналами полей дефектов 2 и 3, и аналогичная зависимость 4, соответствующая магнитному полю фона или, иначе говоря, тестовому распределению, полученному для слоя фольги без дефектов. Толщина образца  $1,55 \cdot 10^{-4}$  м. Он состоит из фольги толщиной  $7 \cdot 10^{-5}$  м с двумя дефектами диаметром порядка  $1,0 \cdot 10^{-3}$  м и наложенной на нее сверху фольгой такой же толщины. Под фольгой с дефектами находится слой фольги толщиной  $1,5 \cdot 10^{-5}$  м без дефектов. Все слои образца изготовлены из алюминия.

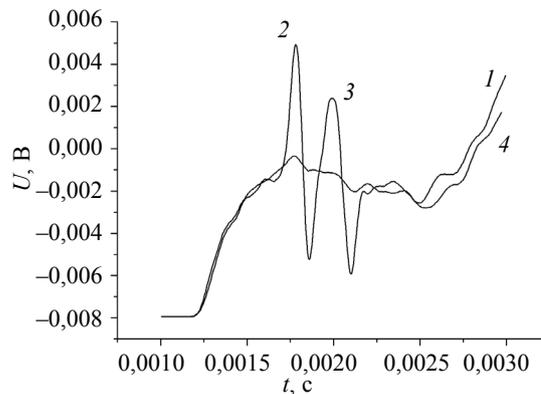


Рис. 8. Зависимость  $U(t)$ , снятая с МГ, с сигналами 2 и 3 полей внутренних дефектов диаметром  $1,0 \cdot 10^{-3}$  м в образце из алюминиевой фольги толщиной  $1,55 \cdot 10^{-4}$  м и аналогичная зависимость 4, соответствующая полю фона.

При вычитании распределения 4 из распределения 1 (см. рис. 8) получаем зависимость  $U(t)$  (рис. 9), которая позволяет определять дефектность объекта по амплитуде сигнала при визуальном и

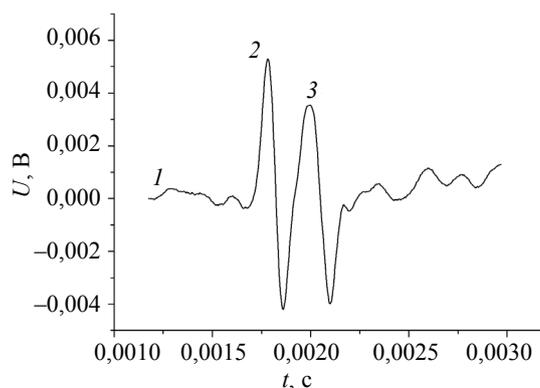


Рис. 9. Зависимость  $U(t)$ , снятая с МГ и соответствующая разностному сигналу распределения магнитных полей с сигналами полей дефектов 2 и 3 и сигналу распределения магнитного поля фона.

автоматическом контроле. Для этого достаточно задать минимально контролируруемую амплитуду двухполярного сигнала дефекта, равную  $2,0 \cdot 10^{-3}$  В. Тогда останутся только сигналы дефектов 2 и 3 на фоне нулевого уровня сигнала, так как сигналы с меньшей амплитудой выделению не подлежат.

Результаты исследований сигналов полей дефектов в массивном образце из алюминия толщиной  $3,0 \cdot 10^{-3}$  м представлены на рис. 10—13.

На рис. 10 показана зависимость  $U(t)$ , снятая с индукционной магнитной головки, соответствующая магнитному полю дефекта диаметром  $2,0 \cdot 10^{-3}$  м и высотой  $1,0 \cdot 10^{-3}$  м, залегающего на глубине  $1,5 \cdot 10^{-3}$  м в пластине из алюминия толщиной  $3,0 \cdot 10^{-3}$  м. Зависимость  $I$  содержит двухполярный сигнал поля дефекта 2 и сигнал фона.

Зависимость  $U(t)$ , снятая с индукционной магнитной головки, совместно с сигналом поля дефекта диаметром  $3,2 \cdot 10^{-3}$  м в пластине из алюминия толщиной  $3,0 \cdot 10^{-3}$  м и сигналом поля фона изображена на рис. 11. Высота дефекта  $1,0 \cdot 10^{-3}$  м, глубина его залегания  $1,5 \cdot 10^{-3}$  м. Зависимость  $I$  разбита на участки 2—10 для применения методов распознавания изображений магнитных полей, представленных в графическом виде, по отдельным частям.

В результате вычитания зависимости  $II$  (рис. 11) сигнала фона из зависимости  $I$ , содержащей суммарный сигнал фона и сигнал дефекта, получаем разностную зависимость  $U(t)$ , изображенную на рис. 12 с сигналом поля дефекта  $I$ .

Как видно из рис. 12, удалось достаточно точно выделить сигнал поля дефекта из суммарного сигнала.

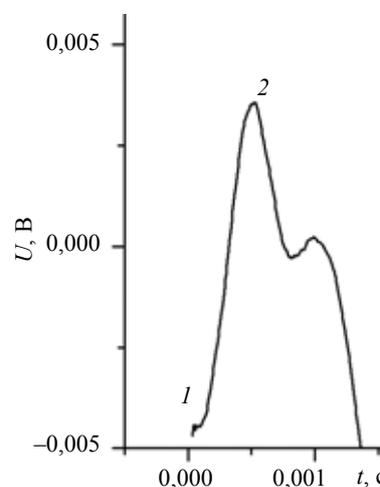


Рис. 10. Зависимость  $U(t)$ , снятая с МГ, с сигналом 2 поля дефекта диаметром  $2,0 \cdot 10^{-3}$  м и высотой  $1,0 \cdot 10^{-3}$  м, залегающего на глубине  $1,5 \cdot 10^{-3}$  м в пластине из алюминия толщиной  $3,0 \cdot 10^{-3}$  м.

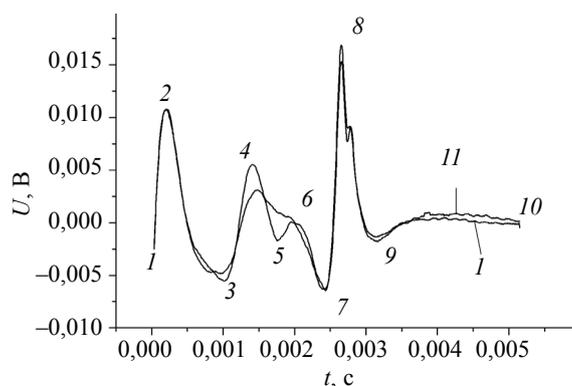


Рис. 11. Зависимость  $U(t)$ , снятая с МГ, с сигналом 4—5 поля дефекта диаметром  $3,2 \cdot 10^{-3}$  м и высотой  $1,0 \cdot 10^{-3}$  м, залегающего на глубине  $1,5 \cdot 10^{-3}$  м в пластине из алюминия толщиной  $3,0 \cdot 10^{-3}$  м, разбитая на участки 2—10, а также сигнал поля фона  $II$ .

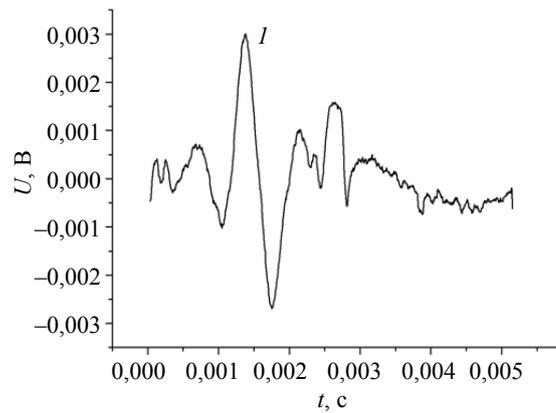


Рис. 12. Зависимость  $U(t)$  с сигналом поля дефекта  $I$ , снятая с МГ, соответствующая разностному сигналу зависимостей  $I$  и  $II$  на рис.11.

Еще большей точности выделения можно достигнуть путем использования методов распознавания графических изображений.

В результате применения таких методов осуществлено выделение сигнала поля дефекта, показанное на рис.13.

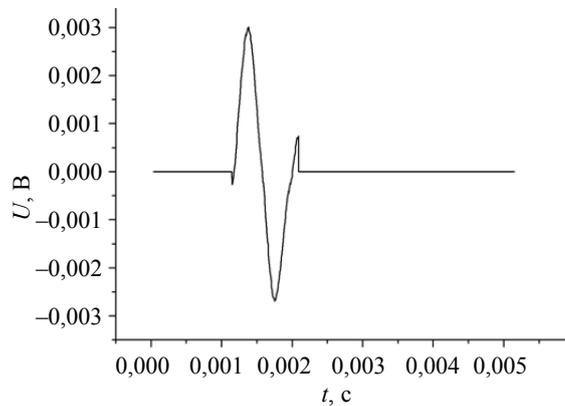


Рис. 13. Зависимость  $U(t)$ , снятая с МГ, соответствующая разностному сигналу, показанному на рис. 12, с сигналом поля дефекта  $I$  и с удалением поля фона и локальных отклонений сигнала.

Распознавание сигналов полей дефектов осуществлено следующим образом: задали минимальную амплитуду сигнала контролируемого дефекта, равную  $2,2 \cdot 10^{-3}$  В, тогда все сигналы с меньшей амплитудой не учитываются и соответствующий их положению уровень сигнала принимается равным нулю.

Следующий критерий распознавания — это форма сигнала. При считывании индукционной магнитной головкой сигнал от дефектов должен быть двухполярным. Поэтому однополярным локальным сигналам ставится в соответствие также нулевой уровень сигнала.

Критерием распознавания информации является также анализ сигнала фона, создаваемого индуктором. Эту часть сигнала фона следует сравнивать с фоном бездефектного объекта, но развертки сигналов могут быть смещены относительно друг друга. Тогда при высоком уровне сигнала фона и его даже плавных изменениях незначительное смещение зависимостей  $U(t)$  по оси времени приведет к возникновению локальных сигналов с большой амплитудой в разностных распределениях. Запуск разверток по уровню исследуемого сигнала не обеспечивает необходимой точности контроля. Поэтому требуется коррекция смещения разверток сигналов на основе логического анализа полного сигнала. Аналогичным образом следует поступать при анализе локальных искажений сигнала, обусловленных локальными неоднородностями свойств магнитного носителя и другими причинами.

Распознавание полезного сигнала можно осуществлять многими другими способами, в том числе путем изменения параметров воздействующих импульсных магнитных полей. Таким образом, абсолютная погрешность установки нуля разностной зависимости, изображенной на рис. 13

(два прямых отрезка, параллельных оси абсцисс), с применением первых двух указанных критериев распознавания составляет  $2,2 \cdot 10^{-3}$  В.

Указанный метод подобно рентгеновскому методу контроля позволяет производить запись полей дефектов и, кроме того, структурных неоднородностей одновременно с площади в единицы и десятки квадратных сантиметров. При этом время записи составляет всего десятки микросекунд.

Для осуществления контроля достаточно доступа к одной из сторон объекта.

По сравнению с токовихревым разрешение в плоскости измерения в сотни раз выше.

Метод является бесконтактным и может быть применен на удалении датчика от объекта на расстояние в доли и даже единицы миллиметра.

При совершенствовании способов считывания информации с магнитного носителя разработанный метод позволит вести контроль объектов в реальном масштабе времени на протяжении действия импульса поля, то есть в течение единиц и десятков микросекунд.

Разработанный метод позволяет вести оперативный контроль объектов из диа- и парамагнитных металлов с высокой точностью и использованием мгновенной записи полей дефектов на площади в несколько квадратных сантиметров и более. Он может быть использован для контроля дефектов сплошности в листовых конструкциях объектов и объектах другой формы, сварных и других стыковых соединениях из алюминия, сплавов титана и других диа- и парамагнитных металлов, используемых в различных отраслях промышленности, а также для определения толщины и качества покрытия металл-диэлектрик, металл-металл из указанных материалов.

## ВЫВОДЫ

1. На основании проведенных исследований магнитных полей искусственных дефектов сплошности в пластинах из алюминия толщиной от  $1,5 \cdot 10^{-5}$  до  $3,0 \cdot 10^{-3}$  м при воздействии на них импульсами магнитного поля напряженностью в диапазоне  $(2—50) \cdot 10^3$  А/м со временем нарастания  $(1,5—100) \cdot 10^{-6}$  с и записью на магнитный носитель получены зависимости величины электрического напряжения от времени  $U(t)$ , снятые с индукционной магнитной головки, сканирующей магнитный носитель с записями полей дефектов и поля фона, а также зависимости амплитуды напряжения датчика от глубины залегания дефектов и толщины слоя материала над ними.

2. На основании полученных результатов разработан новый метод контроля объектов из электропроводящих материалов, позволяющий осуществлять в отличие от известных методов одновременную запись мгновенных распределений магнитных полей на площади поверхности  $1,0 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup> и более за время порядка  $1,0 \cdot 10^{-4}$  с и производить контроль объектов с разрешением в плоскости измерения  $1,0 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>. Метод обеспечивает повышение точности контроля за счет оптимальных геометрических размеров индуктора, амплитуды напряженности поля первичного источника, направления, времени нарастания, формы переднего и заднего фронта основного импульса поля, а также амплитуды, времени нарастания, числа и полярности выбросов поля. При этом осуществляются операции сглаживания, вычисления, выделения полезного сигнала с исключением сигнала фона и распознавания записанной на магнитном носителе информации путем сравнения полученных распределений сигналов с эталонными или расчетными и установлении сигналов минимальных дефектов. Диаметры контролируемых неоднородностей от  $1 \cdot 10^{-4}$  до  $3,2 \cdot 10^{-3}$  м и выше при их высоте от  $1,5 \cdot 10^{-5}$  до  $1,0 \cdot 10^{-3}$  м и более.

3. Полученные результаты могут быть применены для определения параметров дефектов сплошности в конструкциях объектов из алюминия и других диа- и парамагнитных металлов, используемых в различных отраслях промышленности, а также при изучении магнитных и электромагнитных методов контроля.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов В.С. Техника магнитографической дефектоскопии. Минск: Вышэйшая школа, 1976. 256 с.
2. Фалькевич А.С., Хусанов М.Х. Магнитографический контроль сварных соединений. М.: Машиностроение, 1966. 176 с.
3. Михайлов С.П., Щербинин В.Е. Физические основы магнитографической дефектоскопии. М.: Наука, 1992. 238 с.
4. Шлеенков А.С., Бычков В.Г., Булычев О.А., Лядова Н.М., Щербинин В.Е. Оценка возможности обнаружения микродефектов сварных соединений прямошовных электросварных труб, изготовленных стыковой высокочастотной сваркой, магнитным методом контроля // Дефектоскопия. 2010. № 2. С. 23—29.
5. Кушнер А.В., Шилов А.В., Новиков В.А. Программно-аппаратный комплекс для магнитографического контроля ферромагнитных объектов // Дефектоскопия. 2010. № 6. С. 36—40.

6. Новиков В.А., Кушнер А.В., Шилов А.В. Экспериментальное исследование магнитографического контроля объектов при их намагничивании перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель. I // Дефектоскопия. 2010. № 7. С. 42—50.
7. Павагин В.А., Матвиенко А.Ф. Идентификация кольцевых сварных швов на магнитограммах дефектоскопов поперечного намагничивания // Дефектоскопия. 2009. № 8. С. 13—18.
8. Суханов Д.Я., Совпель Е.С. Магнитоиндукционный интроскоп для дефектоскопии металлических объектов // Дефектоскопия. 2015. № 5. С. 56—62.
9. Печенков А.Н., Щербинин В.Е. Вихревые токи и поля проводящих и намагничивающихся шаровых включений в немагнитную среду // Дефектоскопия. 2016. № 4. С. 48—55.
10. Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С. Неразрушающий контроль объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях // Дефектоскопия. 2010. № 11. С. 29—40.
11. Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С., Пивоваров В.Л. Расчеты распределений импульсных магнитных полей при гистерезисной интерференции // Дефектоскопия. 2018. № 2. С. 41—47.
12. Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С. Компьютерные методы нахождения распределений импульсных магнитных полей вблизи объектов из электропроводящих материалов // Дефектоскопия. 2016. № 3. С. 48—56.
13. Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С., Сычик В.А. Магнитоимпульсный способ контроля электрических и магнитных свойств и наличия дефектов сплошности изделия из электропроводящего магнитного материала, а также его толщины / Пат 12173 Респ. Беларусь, МПК С1 ВУ, G 01 N 27/72. Заявитель БНТУ; № а 20070990; заявл. 02.08.2007; опубл. 21.04.09 // Афіцыйны бюл. Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2009. № 4. С. 151.