

ГИСТЕРЕЗИСНАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПРОШЕДШЕЙ ЧЕРЕЗ МЕТАЛЛ ВОЛНЕ

© 2022 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 09.11.2021; после доработки 28.01.2022

Принята к публикации 04.02.2022

Представлены экспериментальные зависимости $U(t)$ электрического напряжения, снимаемого с преобразователя магнитного поля, от времени t . Преобразователем сканировали дискретный датчик магнитного поля (ДДМП) с записями импульсных магнитных полей, прошедших через пластины из алюминия толщиной 0,015, 0,05, 0,055, 0,07, 0,09, 0,12, 0,165, 0,225 и 0,26 мм. На ДДМП с пластинами воздействовали импульсами магнитного поля линейного индуктора сложной формы, сформированными путем изменения параметров элементов электрической цепи источника и с помощью линий задержки. Получена гистерезисная интерференция импульсного магнитного поля в прошедшей волне для одиночных пластин и для пластин в составе массивного объекта, позволяющая повысить в несколько раз чувствительность контроля толщины объекта по сравнению с бесгистерезисными методами и осуществлять контроль объектов в узких зазорах между ними.

Ключевые слова: гистерезисная интерференция, импульсное магнитное поле, прошедшая волна, алюминиевая пластина, магнитный носитель.

DOI: 10.31857/S0130308222020063

ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрим применение магнитного носителя (МН) для контроля свойств объектов. Дефектоскопия сварных свойств изделий из ферромагнитных материалов изложена еще в [1]. Следует отметить, что использование считывающего устройства с вращающейся магнитной головкой (МГ) позволило существенно увеличить чувствительность и точность контроля сварных соединений. Дальнейшее фундаментальное развитие магнитографического контроля осуществлено в [2], где среди многочисленных решений задач дефектоскопии получены оптимальные режимы намагничивания изделий с магнитным носителем, а также описаны способы и устройства, позволяющие повысить точность измерений с использованием импульсной и телевизионной (растровой) индикации. Большое внимание развитию магнитографической дефектоскопии уделено в [3]. В настоящее время также проводятся исследования по магнитографической дефектоскопии, среди которых отметим работы [4, 5].

Использование МН с получением найденной авторами гистерезисной интерференции (HI) магнитного поля осуществлено в [6]. Там показана схема экспериментальной установки для исследования распространения импульсных магнитных полей и изложены результаты контроля толщины пластин из алюминия (порядка 0,085 мм) при воздействии на них с МН сериями разнополярных импульсов линейного индуктора в количестве 1, 2, 3, 4 импульсов.

Гистерезисная интерференция осуществляется методом последовательного воздействия полями разного происхождения на объект с регистрирующим устройством, обладающим гистерезисными свойствами, на котором получают записи пространственных распределений указанных полей в виде их интерференционной картины, содержащей максимумы и минимумы, по которым определяют параметры полей и свойства объектов. При осуществлении HI на магнитном носителе воздействуют на МН с объектом импульсами магнитного поля локального источника с разными амплитудами, направлениями и временами нарастания, считывают информацию с МН магнитной головкой и получают HI электрического напряжения. При этом используют сплошные или дискретные МН и создают оптические изображения магнитных полей.

Последовательность операций программных расчетов при осуществлении метода HI , выделение электрических сигналов, снимаемых с преобразователя магнитного поля и обусловленных дефектами и неоднородностями в металлическом объекте, алгебраические действия с записями оптических изображений магнитных полей, выделение поля дефекта с аппроксимацией ветвей гистерезиса линейными участками функций намагничивания МН описаны в [7].

В отличие от вихретокового метода, рассмотренного, например, в [8], где изложены теоретические и экспериментальные основы выявления поверхностных дефектов разной глубины, разрабо-

тываемый метод позволяет записать мгновенные распределения магнитных полей на значительной площади объекта (квадратные дециметры и более).

Оптические изображения импульсных магнитных полей, мгновенные распределения магнитных полей на поверхностях разной формы, контроль толщины и других геометрических размеров, определение удельной электропроводности и магнитной проницаемости, однородности их распределения, параметров дефектов сплошности в них изложены в [9]. Там также получены изображения пластины из алюминия толщиной порядка 0,1 мм и полосок из алюминия толщиной 0,8 мм за алюминиевой пластиной толщиной 0,14 мм.

Расчеты HI импульсного магнитного поля на МН для двух перекрывающихся с разными временными задержками импульсов магнитного поля разной полярности с получением трех импульсов с временами нарастания $t_{\max 1} = 5 \cdot 10^{-5}$ с, $t_{\max 2} = 4,3 \cdot 10^{-6}$ с и $t_{\max 3} = 2,1 \cdot 10^{-6}$ с рассмотрены в [10]. Восходящие и нисходящие ветви гистерезисных зависимостей используемого МН $U(H)$, где H — напряженность магнитного поля, здесь представлены функциями арктангенса. Получены распределения $U(x)$ электрического напряжения, снимаемого с преобразователя магнитного поля, сканирующего МН, от координаты x для алюминиевой фольги толщиной порядка 0,01 мм, сформированы их оптические изображения. Использование HI позволяет повысить чувствительность измерений и точность контроля толщины в несколько раз по сравнению с безгистерезисными методами.

В [11] представлены результаты измерения толщины образцов из алюминиевой фольги порядка 0,05 мм гистерезисными и безгистерезисными методами в импульсном магнитном поле линейного индуктора, перемещаемого дискретно с заданным шагом над фольгой с МН, гистерезисные ветви которого представлены в виде функции арктангенса. Показано, что применение гистерезисной интерференции позволяет повысить чувствительность средств измерения в несколько раз.

Для получения информации в реальном масштабе времени путем визуализации магнитных полей МН могут быть использованы магнитооптические пленки, в частности, пленки с гигантским фарадеевским вращением. Так, разработка способов визуализации и измерения напряженности магнитного поля и полей дефектов сплошности, осуществляемая в настоящее время, начата еще в [12—14].

Разрабатываемый метод может быть использован для определения удельной электропроводности и ее распределения в плоскости и объеме объектов из неферромагнитных материалов как, например, в [15] при использовании вихревого метода. Однако в нашем случае одновременно осуществляется определение толщины слоя не в одиночной локальной точке или в макроскопической области с усреднением измеряемой величины, а одновременно на значительной части объекта площадью в несколько квадратных сантиметров с высоким разрешением по точкам поверхности.

Таким образом, с помощью HI могут быть значительно повышены чувствительность, точность, разрешающая способность и объем одновременно записываемой информации по точкам поверхности контролируемого объекта с возможностью получения мгновенных кадровых изображений распределения магнитных полей на этой поверхности при разных условиях воздействия на объект. Как показали наши исследования, использование гистерезисной интерференции при контроле свойств объектов из электропроводящих материалов в отраженном от поверхности металла импульсном магнитном поле повышает точность определения свойств объектов в 2, 3 и более раз.

В ряде случаев необходимо использовать преимущества контроля с применением HI в прошедшей электромагнитной волне. Это позволит производить одновременно оптический контроль объекта, получать более полную информацию об объекте с разных его сторон, а также определять свойства металлических объектов в узких зазорах внутри них, где контроль другими методами невозможен.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для формирования импульсов магнитного поля заданной формы на тиристорной установке проведены исследования цепи индуктора путем изменения величины емкости, индуктивности и активного сопротивления цепи разряда. Определены также параметры линий задержки импульсов и введены дополнительные цепи разряда емкостей на индуктор и на параллельно включенные линии с дополнительными тиристорами. При этом были учтены результаты, полученные в [6, 7, 11].

Для осуществления гистерезисной интерференции импульсного магнитного поля в прошедшей через металл волне применяли одиночные импульсы сложной формы, показанные на рис. 1 и рис. 2.

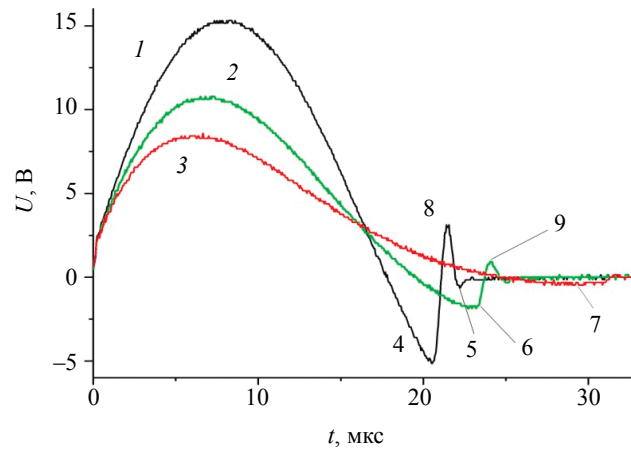


Рис. 1. Зависимости $U(t)$, снимаемые с измерительного сопротивления при разных параметрах элементов цепи индуктора.

Импульсы магнитного поля, сформированные путем изменения параметров элементов электрической цепи источника поля, представлены на рис. 1, где изображены зависимости 1, 2, 3 $U(t)$, снимаемые с измерительного сопротивления цепи индуктора в порядке увеличения активного сопротивления цепи индуктора, при неизменной величине индуктивности этой цепи. Здесь же показаны пики выбросов 4, 5, 6, 7 в обратном направлении поля и пики выбросов 8, 9 в прямом направлении.

Картина HI с нулевым максимумом четвертого порядка может быть получена путем применения импульса 1 при соответствующих максимумах основного сигнала и выбросов 4, 8 и 5 или использованием четырех импульсов 1 с убывающей амплитудой и чередующейся полярностью и с такими выбросами поля, которые не проходят через всю толщину металла. Для получения HI с нулевым максимумом третьего порядка может быть использован импульс 2 с двумя выбросами 5 и 9 и экспоненциально (или обратно пропорционально убывающим) задним фронтом. Импульс 3 позволяет получить нулевой максимум только первого порядка ввиду малой амплитуды единственного выброса 7. При этом величина прошедшего поля зависит также от времени нарастания основного импульса и выбросов.

Результаты формирования импульсов поля с помощью линий задержки, включенных в электрическую цепь источника поля, представлены на рис. 2, где изображены зависимости 1—6 $U(t)$, снимаемые с измерительного сопротивления цепи индуктора в порядке увеличения времени

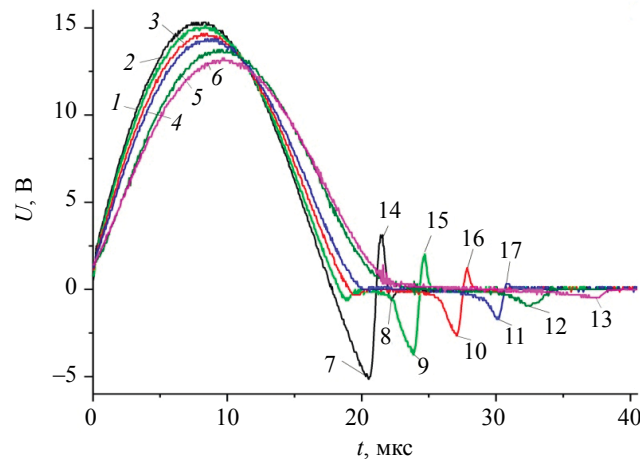


Рис. 2. Зависимости $U(t)$, снимаемые с измерительного сопротивления цепи индуктора с разными параметрами линий задержки.

задержки. Здесь же показаны пики выбросов 7—13 в обратном направлении поля и пики выбросов 14—7 в прямом направлении. Импульс 1 с выбросами 7, 14 и 8 соответствует импульсу 1 с выбросами 4, 8 и 5 на рис. 1.

Для осуществления HI с нулевым максимумом четвертого порядка может быть использован импульс 1 с выбросами 7, 14 и 8, третьего порядка — импульс 2 с выбросами 9 и 15 и импульс 3 с выбросами 10 и 16, второго порядка — импульс 4 с выбросом 11 (выброс 17 мал) и импульс 5 с выбросом 12, первого порядка — импульс 6 (выброс 13 мал).

Формирование импульсов поля с помощью линий задержки в отличие от формирования путем изменения параметров элементов электрической цепи источника позволяет получать импульсы поля не только с синусоидальным передним фронтом, но и с синусоидальным задним фронтом импульса. Более того, обратные выбросы следуют не в момент окончания основного импульса, а с временной задержкой до четверти его периода и больше (пики выбросов 7—13 и 14—17). При этом амплитуда основного импульса уменьшается на величину до 15% (зависимости 1 — 6 на рис. 2) с увеличением времени задержки, а его период увеличивается (ориентировочно также до 15%, зависимости 1 — 6 на рис. 2).

Все найденные особенности импульсов поля при их формировании путем изменения параметров элементов электрической цепи источника или с помощью линий задержки могут быть использованы при определении свойств объектов. Величина напряженности прошедшего через металлический объект магнитного поля уменьшается с увеличением толщины объекта. При этом с увеличением времени нарастания импульса и его длительности величина этой напряженности растет. Таким образом, параметры HI в прошедшем поле зависят еще и от параметров заднего фронта импульса поля даже при его плавном убывании до нуля без обратных выбросов.

Для получения HI воздействовали на пластины из алюминия с приложенным дискретным датчиком магнитного поля (ДДМП) импульсом магнитного поля сложной формы, после чего получали зависимости величины электрического напряжения $U(t)$ от времени развертки t цифрового осциллографа, снимаемого с индукционной МГ, при сканировании ею ДДМП. Дискретный датчик магнитного поля располагали на противоположной от источника поля стороне пластины. Графики полученных зависимостей для образцов разной толщины при воздействии на них с ДДМП двумя разнополярными импульсами вида I (см. рис. 1) изображены на рис. 3. Здесь и на последующих рисунках одной миллисекунде развертки осциллографа соответствует отрезок расстояния 1,1 см. На рис. 3 установлены следующие обозначения: 1, 4 и 7 — зависимости $U(t)$ для одиночных пластин из алюминия толщиной соответственно 0,225, 0,26 и 0,165 мм. Через 2 и 3, 5 и 6, 8 и 9 обозначены пары отрицательных и положительных пиков сигнала, соответствующих проекции оси линейного индуктора на ДДМП (нулевой максимум). Здесь также обозначены пики сигнала 10 и 11, по которым определяли порядок нулевого максимума. При построении зависимостей $U(t)$

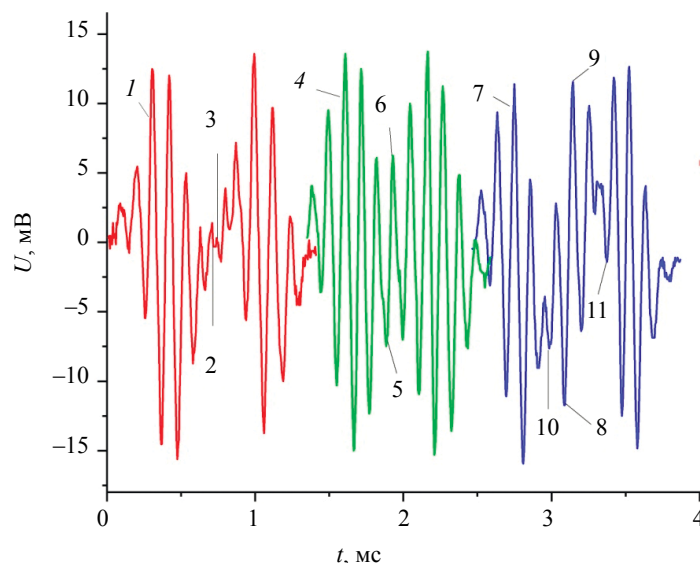


Рис. 3. Зависимости $U(t)$ в прошедшем поле для одиночных пластин из алюминия толщиной 0,225, 0,26 и 0,165 мм; два импульса магнитного поля вида I (см. рис.1).

на рис. 3 авторы использовали разработанный ими метод, при котором величину центрального максимума (или минимума) HI устанавливают равной нулю для объекта заданной толщины. За основу принята пластина толщиной 0,225 мм. В результате воздействия на нее двумя импульсами вида I (см. рис. 1) получена величина центрального минимума равная 0,63 мВ (пики 2 и 3 на рис.3 с напряжением $-0,313$ мВ и $0,313$ мВ), рядом с которым нет локальных максимумов. Значит, перемагничивания ДДМП на проекции оси индуктора не произошло, и нулевой минимум является минимумом первого порядка. Порядок нулевого и последующих максимумов (минимумов) интерференции находили в соответствии с исследованиями авторов, изложенными в [6, 7]. Размах сигнала между пиками 5 ($-7,5$ мВ) и 6 (6,25 мВ) составляет 13,8 мВ. Этот минимум также является нулевым минимумом первого порядка. Размах нулевого максимума, определяемый по величине пиков 8 ($-11,8$ мВ) и 9 (11,6 мВ) и равный 23,3 мВ, значительно превосходит размах между пиком 10 и соседним с ним, необозначенным пиком. То же самое относится к пику 11 и соседнему с ним, необозначенному пику. Это означает, что участок ДДМП под осью индуктора подвергся перемагничиванию в направлении, противоположном первоначальному. Таким образом, согласно принятым обозначениям максимум 8—9 для пластины толщиной 0,165 мм является нулевым максимумом второго порядка.

Придав положительный знак первоначальному направлению намагничивания ДДМП, находим величины нулевого максимума для пластин разной толщины: $-23,3$ мВ (0,165 мм), 0,63 мВ (0,225 мм), 13,8 мВ (0,26 мм). Разности толщин $0,26 - 0,165 = 0,095$ (мм) соответствует диапазон напряжений $23,3 + 13,8 = 37,1$ мВ, откуда получаем чувствительность 390 мВ/мм в диапазоне толщин от 0,165 до 0,26 мм. Чувствительность без использования HI равна примерно 130 мВ/мм (изменению толщины пластины на 0,1мм соответствует изменение напряжения на 13 мВ). Еще больше возрастает точность определения толщины пластины.

В случае определения толщины металлических объектов и их других свойств в отраженной волне основными параметрами импульсов магнитного поля являются их амплитуда, время нарастания и форма переднего фронта волны.

При измерениях в прошедшей через металл волне может быть использован синусоидальный импульс. Однако идеальный синусоидальный импульс является атрибутом колебательного контура. Это означает, что система, производящая синусоидальный импульс сама не в состоянии прекратить колебания в момент времени, равный половине периода и при обрыве электрической цепи в этот момент возникают выбросы магнитного поля обратной полярности, продолжающие воздействие поля на металлический объект с приложенным к нему магнитным носителем. В отраженной волне мы используем этот факт для проведения точных измерений, рассчитывая оптимальные величины амплитуды и времени нарастания выброса, а также форму его переднего фронта.

При измерении в прошедшей волне следует либо использовать обратные выбросы, либо исключить их влияние на результаты измерений. Во втором случае никаких изменений параметров основного импульса не должно быть. Значит время нарастания, длительность и амплитуда обратных импульсов должны быть такими, чтобы они не достигали участков гистерезисной интерференции. Для повышения чувствительности и точности контроля, а также для его осуществления в узких зазорах были проведены измерения с установкой контролируемой пластины на алюминиевую станину. Толщина этой станины была больше длины волны импульсного магнитного поля, распространяющегося в алюминиевой пластине. Гистерезисная интерференция в прошедшем поле получена как для пластин в составе массивного объекта (со станиной), так и для одиночных пластин.

Картины HI для алюминиевой пластины толщиной 0,05 мм при воздействии на нее с ДДМП импульсами магнитного поля вида 3 (см. рис. 1), то есть без обратных выбросов, показаны на рис. 4а и 4б. На рис. 4а установлены следующие обозначения: 1, 2 и 3 — зависимости $U(t)$, снимаемого с МГ, и соответствующие им максимумы и минимумы сигналов 4 и 5, 6 и 7, 8 и 9. Зависимость 1 получена для одиночной пластины толщиной 0,05мм в отраженном поле, а зависимости 2 и 3 — в прошедшем сквозь эту пластину поле соответственно для массивного объекта и для одиночной пластины из алюминия толщиной 0,05 мм. Величина электрического напряжения, снимаемого с МГ, соответствующая величине напряженности магнитного поля в указанных точках имеет следующие значения: точка 4 (49,4 мВ), 5 ($-45,0$ мВ), 6 (58,2 мВ), 7 ($-50,6$ мВ), 8 (35,0 мВ), 9 ($-33,1$ мВ).

Таким образом, размах сигнала для прошедшего импульса в массивном объекте равен 108,8 мВ, а для прошедшего поля через одиночную пластину толщиной 0,05 мм он составляет 68,1 мВ. Размах отраженного от пластины толщиной 0,05 мм поля равен 94,4 мВ.

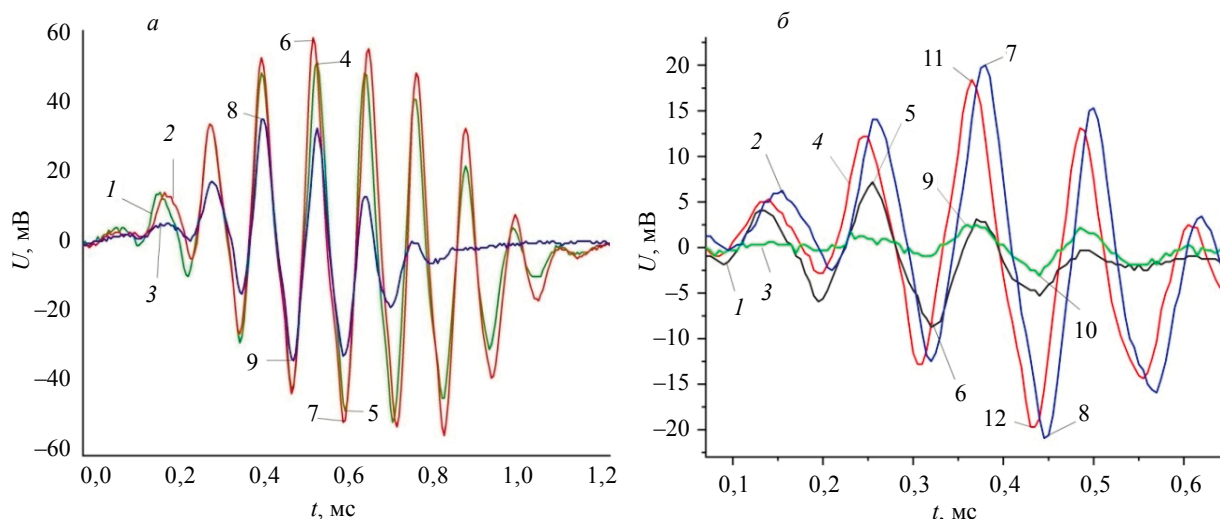


Рис. 4. Зависимости $U(t)$ в прошедшем и отраженном поле для пластины из алюминия толщиной 0,05 мм (одиночной и в составе массивного объекта):

a — два разнополярных импульса магнитного поля вида 3 (см. рис.1); b — один импульс магнитного поля вида 3 (см. рис.1).

Максимальная напряженность прошедшего через пластину поля в массивном объекте (точки 6 и 7) больше напряженности отраженного от этой пластины поля (точки 4 и 5). Однако эта разница не является максимальной, так как воздействие на ДДМП с объектом двумя указанными импульсами поля не выводит ДДМП на рабочий участок с максимальной чувствительностью.

Для получения максимальной чувствительности измерений определим оптимальные параметры воздействующих импульсов, используя их по отдельности. Как показали измерения, первый примененный импульс поля для получения зависимостей 1, 2 и 3 на рис. 4а с максимальной напряженностью поля 240 А/м выводил ДДМП в состояние, близкое к насыщению, что снижало чувствительность контроля.

Результаты воздействия вторым импульсом поля на объект с ДДМП без применения первого импульса показаны на рис. 4б, где установлены следующие обозначения: 1, 2, 3 и 4 — зависимости $U(t)$ и соответствующие им максимумы и минимумы сигналов 5 и 6, 7 и 8, 9 и 10, 11 и 12. Максимумы сигналов зависимостей смещены относительно друг друга по оси абсцисс. Зависимость 1 получена в отсутствие объекта, зависимость 2 — в прошедшем сквозь пластину поле, когда она является частью массивного объекта, зависимость 3 — для одиночной пластины из алюминия толщиной 0,05 мм в прошедшем поле, зависимость 4 — для одиночной пластины толщиной 0,05 мм в отраженном поле. Величина электрического напряжения, снимаемого с МГ, и соответствующая величине напряженности магнитного поля, в указанных точках имеет следующие значения: точка 5 (7,19 мВ), 6 (–8,75 мВ), 7 (20,0 мВ), 8 (–20,9 мВ), 9 (2,50 мВ), 10 (–3,13 мВ), 11 (18,4 мВ), 12 (–19,7 мВ). Размах сигнала в отсутствие объекта равен 15,9 мВ (111 А/м). Для прошедшего через пластину импульса в случае массивного объекта он равен 40,9 мВ (148 А/м), а для прошедшего поля через одиночную пластину толщиной 0,05 мм он составляет 5,63 мВ (80 А/м). Размах сигнала отраженного от одиночной пластины толщиной 0,05 мм поля равен 38,1 мВ (144 А/м). Максимальная напряженность прошедшего сквозь пластину поля в случае массивного объекта (точки 7 и 8) больше максимальной напряженности поля, отраженного от этой одиночной пластины (точки 11 и 12).

Таким образом, воздействие только вторым импульсом не выводит МН в состояние, близкое к насыщению. В результате размах сигнала для прошедшего через пластину импульса в случае массивного объекта составляет 40,9 мВ, а для прошедшего поля через одиночную пластину он равен 5,63 мВ вместо значений 108,8 и 68,1 мВ при воздействии двумя импульсами.

Произведем оценочные расчеты полей в прошедшей через объект волне при воздействии на него двумя отдельными импульсами магнитного поля разной напряженности. Распространение синусоидально изменяющегося магнитного поля в глубь электропроводящего материала рассмотрено в [16—18] на основании решения уравнений Максвелла и для переходного процесса может быть представлено следующим соотношением [18, с. 67]:

$$H_z(x, t) = H_m \cdot e^{-\frac{x}{\delta}} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{x}{\delta}\right) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} H_m \int_0^{\lambda_0} \sin\left(2\pi \frac{t}{T} - \frac{1}{2} \frac{x^2}{\delta^2} \frac{1}{\lambda^2}\right) e^{-\lambda^2} \cdot d\lambda, \quad (1)$$

где H_m — амплитуда напряженности магнитного поля; x — координата в глубину материала; $\omega = 2\pi/T$ — циклическая частота; T — период колебаний; λ — переменная интегрирования; δ — условная глубина проникновения магнитного поля, равная:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \sigma \omega}}, \quad (2)$$

где μ_0 — магнитная постоянная, σ — удельная электропроводность материала.

Первый член (1) является решением для установившихся колебаний, а второй дает поправку для переходного процесса.

Пусть первая и третья среды являются вакуумом (воздухом), а вторая — пластиной из алюминия толщиной d . Источник импульсного магнитного поля находится в первой среде. Установим алюминиевую пластину на массивный объект из алюминия, толщина которого во много раз превосходит δ для всех используемых импульсов. Между пластиной и массивным объектом оставим воздушный зазор порядка 0,15 мм, в который поместим ДДМП, воздействуем на них импульсом магнитного поля и определим величину максимальной тангенциальной составляющей напряженности импульсного магнитного поля в воздушном зазоре. Проведем указанные действия для пластин разной толщины, установленных на массивном объекте, и получим распределение максимальной напряженности магнитного поля в зазоре по координате x в глубину объекта.

Введем следующие обозначения: H_{m11} и H_{m12} — максимальные напряженности магнитного поля первого и второго импульсов источника в первой среде вблизи границы сред; H_{m1} и H_{m2} — максимальные напряженности суммарного магнитного поля первого и второго импульсов в первой среде вблизи границы раздела сред; H_{m31} — максимальная напряженность магнитного поля первого импульса в зазоре массивного объекта.

При толщине объекта во много раз большей, чем δ , напряженность суммарного магнитного поля вблизи поверхности объекта равна удвоенной напряженности воздействующего поля [19, с. 150].

Как показали проведенные нами исследования, изменение максимальной напряженности магнитного поля в воздушном зазоре с глубиной в массивном объекте происходит по тому же закону, что и изменение напряженности внутри цельного металлического объекта, полученное теоретическими расчетами.

Тогда с учетом толщины объекта, стремящейся к бесконечности, в случае стационарного процесса величина максимальной напряженности магнитного поля в воздушном зазоре для первого импульса в заданный момент времени может быть представлена следующей формулой:

$$H_{m31d} = 2H_{m11} \cdot e^{-\frac{d}{\delta}} \sin\left(\omega t - \frac{d}{\delta}\right). \quad (3)$$

В результате получаем максимальную величину напряженности магнитного поля в зазоре на глубине d :

$$H_{m31d} = 2H_{m11} \cdot e^{-\frac{d}{\delta}}. \quad (4)$$

Воспользуемся найденной нами линейной (квазилинейной) зависимостью величины максимальной тангенциальной составляющей напряженности импульсного магнитного поля вторичного источника от толщины материала, как это сделано, например, в [20]. Тогда максимальная суммарная напряженность магнитного поля H_{m2} в отраженной волне вблизи поверхности отдельной алюминиевой пластины в результате второго импульса будет равна:

$$H_{m2} = H_{m12} \left(1 + \frac{d}{d_0}\right). \quad (5)$$

Здесь d_0 — приведенная толщина материала. Приведенная к максимальной величине напряженности магнитного поля толщина d_0 характеризует электрические свойства материала. Это толщина материала, при которой величина максимальной напряженности магнитного поля на его поверхности удваивается при условии выполнения линейной зависимости максимальной напря-

женности магнитного поля от толщины материала. Иными словами, величину d_0 находят путем экстраполяции указанной линейной зависимости до удвоенной величины максимальной напряженности магнитного поля.

Пользуясь формулами (4) и (5), можно находить соответствие между напряженностями поля над поверхностью отдельной пластины и напряженностью в зазоре в различных пропорциях.

Найдем H_{m12} поля второго импульса источника, при которой H_{m2} суммарного поля на поверхности отдельной алюминиевой пластины равна H_{m31} поля в зазоре в результате первого импульса с H_{m11} . Приравнявая (4) и (5), получаем:

$$2H_{m11} \cdot e^{-\frac{d}{\delta}} = H_{m12} \left(1 + \frac{d}{d_0} \right). \quad (6)$$

Для $t_{\max} = 8$ мкс имеем: $\delta = 0,45$ мм, $d_0 = 0,098$ мм. Тогда для $d = 0,05$ мм из (5) получаем окончательно:

$$H_{m12} = 1,185 H_{m11}. \quad (7)$$

Представляет научный интерес случай, когда максимальные напряженности поля над одиночной пластиной и в зазоре массивного объекта между ним и этой пластиной равны при воздействии одним и тем импульсом поля источника, то есть при $H_{m11} = H_{m12}$. Из (6) определим толщину пластины d_1 , при которой выполняется данное условие:

$$2e^{-\frac{d_1}{\delta}} = 1 + \frac{d_1}{d_0}, \quad (8)$$

откуда находим величину $d_1 = 0,069$ мм.

Найденная величина d_1 выходит за пределы полученной ранее авторами линейной зависимости (7), которая выполняется в интервале полей от 0 до $0,3 H_{m11}$ (в диапазоне толщин от 0 до $0,3d_0$). Учет нелинейности дальнейших участков указанной зависимости (переход линейной зависимости в зависимость вида единица минус экспонента) позволил оценить величину d_1 . Она оказалась равной $0,105$ мм, то есть порядка d_0 .

Вернемся к переходному процессу. Решение (1) не может быть представлено в виде элементарных функций и получается путем введения функции ошибок. Однако в разные моменты времени зависимости напряженности магнитного поля от координаты x в глубину объекта можно описать с использованием функций синуса и экспоненты. Как показали наши расчеты, огибающая линия этих зависимостей может быть представлена экспонентой с показателем $0,91$ вместо единицы, как это было в случае стационарного процесса. Таким образом, для определения величины d_1 вместо (8) используем следующее выражение:

$$2e^{-0,91\frac{d_1}{\delta}} = 1 + \frac{d_1}{d_0}. \quad (9)$$

В общем случае, когда зависимость напряженности магнитного поля от толщины объекта в отраженной волне может быть описана функциями $y_i(d)$, выраженными в относительных единицах и включающими все указанные участки этой зависимости, вместо (9) получаем:

$$2e^{-0,91\frac{d_1}{\delta}} = 1 + y_i(d), \quad (10)$$

а при воздействии двумя разными импульсами соотношение (6) переходит в:

$$2H_{m11} \cdot e^{-0,91\frac{d}{\delta}} = H_{m12}(1 + y_i(d)). \quad (11)$$

Возможности контроля свойств объектов в узких зазорах дополнены графиками на рис. 5, 6. На рис. 5 показаны зависимости $U(t)$ 1, 2, 3, полученные соответственно в отсутствие образца и для одиночной пластины из алюминия толщиной $0,015$ мм в прошедшем и отраженном поле. Воздействие на ДДМП и пластины осуществляли импульсом вида I (см. рис. 1) с 3 выбросами. Здесь также обозначены максимумы и минимумы сигналов 4 и 5, 6 и 7, 8 и 9. Величина электрического напряжения, снимаемого с МГ, имеет следующие значения: точка 4 ($-1,88$ мВ), 5 ($6,25$ мВ), 6 ($-20,9$ мВ), 7 ($26,6$ мВ), 8 ($-15,3$ мВ), 9 ($19,4$ мВ). Отсюда по точкам 4 и 5 находим величину нулевого максимума второго порядка в отсутствие образца: $8,13$ мВ. Для одиночной пластины из

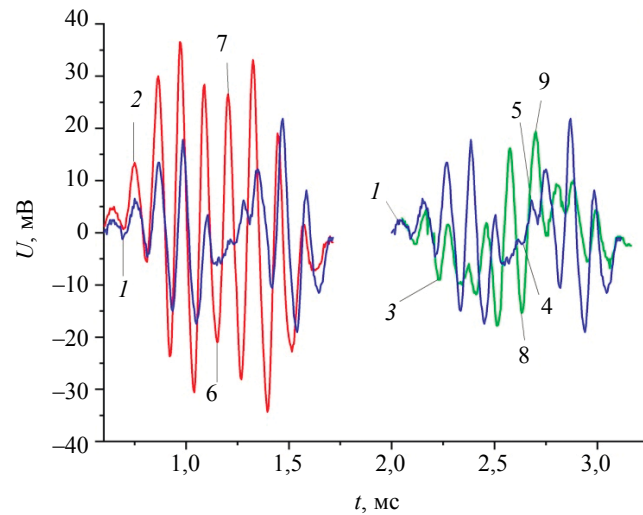


Рис. 5. Зависимости $U(t)$ без объекта и для одиночной пластины из алюминия толщиной 0,015 мм в прошедшем и отраженном поле; импульс вида 1 (см. рис.1).

алюминия толщиной 0,015 мм в прошедшем и отраженном поле по точкам 6 и 7 получаем соответственно нулевые максимумы первого порядка 47,5 мВ (нет перемагничивания в обратную сторону) и по точкам 8 и 9 — второго порядка 34,7 мВ (на перемагничивание указывают минимумы сигналов с внешних сторон пиков 8 и 9).

На рис. 6а показаны зависимости $U(t)$ 1, 2, 3, полученные для пластин из алюминия толщиной 0,015, 0,07 и 0,055 мм соответственно в составе массивного объекта в прошедшем поле. Воздействие на ДДМП и пластины осуществляли импульсом вида 1 (см. рис. 1) с 3 выбросами. Здесь также обозначены минимумы и максимумы сигналов 4 (–35,3 мВ), 5 (34,4 мВ), 6 (–3,44 мВ), 7 (10,9 мВ), 8 (–17,8 мВ), 9 (18,4 мВ). Размах сигнала составляет 69,7 мВ (точки 4 и 5), 14,3 мВ (точки 6 и 7), 36,2 мВ (точки 8 и 9).

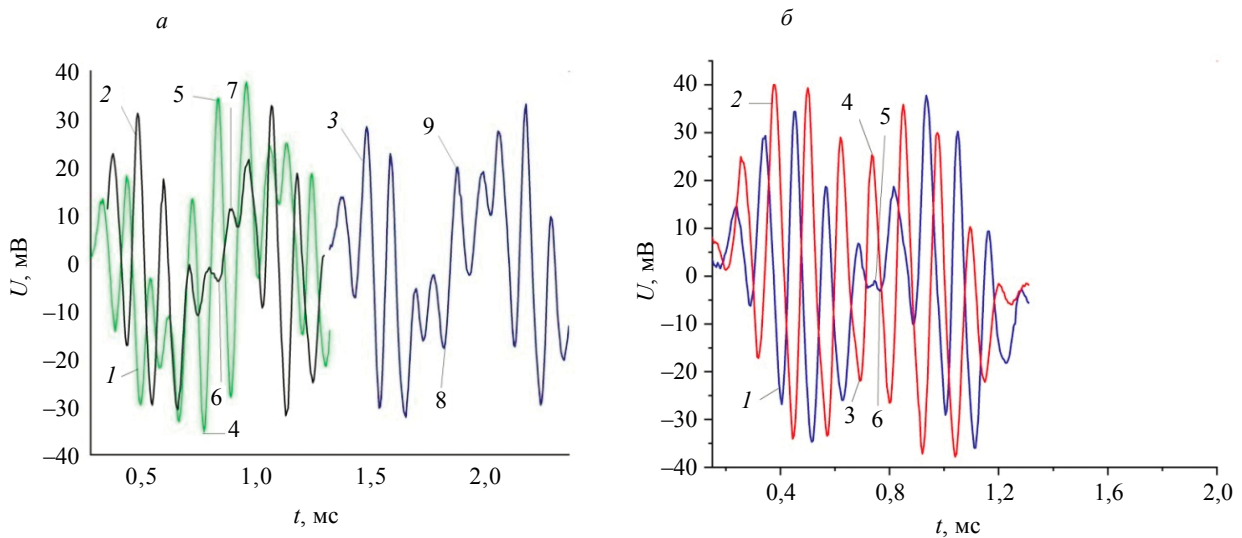


Рис. 6. Зависимости $U(t)$ в прошедшем поле для пластин из алюминия разной толщины в составе массивного объекта; импульс вида 1 (см. рис. 1):

а — толщина пластин 0,015, 0,07 и 0,055 мм; б — толщина пластин 0,09 и 0,12 мм.

Зависимости $U(t)$ 1 и 2, полученные соответственно для пластин из алюминия толщиной 0,09 и 0,12 мм в составе массивного объекта в прошедшем поле, показаны на рис. 6б. Воздействие на ДДМП и пластины осуществляли импульсом вида 1 (см. рис. 1) с 3 выбросами. Здесь также обозначены минимумы и максимумы сигналов 3 (–21,9 мВ), 4 (25,3 мВ), 5 (–0,94 мВ), 6 (–2,81 мВ). Размах сигнала составляет 47,2 мВ (точки 3 и 4) и 1,87 мВ (точки 5 и 6). Из рис. 6б следует, что разности толщин $0,12 - 0,09 = 0,03$ мм соответствует диапазон напряжений $47,2 - 1,87 = 45,3$ мВ. Таким образом, может быть достигнута чувствительность измерений порядка 1500 мВ/мм.

Отметим, что авторами с помощью одной линии задержки впервые получено разделение импульса сложной формы, состоящего из основного импульса и выбросов, на две части с регулируемым временем задержки выбросов относительно основного импульса от нуля до четверти его периода (см. рис. 2). При этом форма основного импульса остается неизменной, а его амплитуда и длительность регулируются. Задержка выбросов позволяет определять свойства объекта при разных распределениях индукционных токов в нем.

При известной толщине металлической пластины методом гистерезисной интерференции можно определять и удельную электропроводность ее материала, как это показано в [6] и более ранних работах авторов. Полученные результаты позволяют осуществлять контроль в узких зазорах между металлическими объектами шириной от 10 микрон с определением толщины и удельной электропроводности материалов объекта с двух сторон зазора, чего в силу разных причин, в том числе из-за малой ширины зазоров нельзя осуществить другими методами. При этом определяют свойства пластин, как в составе массивного объекта, так и в зазоре между пластинами разной толщины. Эти толщины объекта с каждой из двух сторон зазора могут быть разными и изменяться в любой пропорции от единиц (долей) микрон до $2\lambda_d$, то есть до длины электромагнитной волны в металле.

ВЫВОДЫ

На основании проведенных экспериментальных исследований получены импульсы магнитного поля, состоящие из основного однополярного импульса с формой, близкой к синусоидальной, и выбросами разной полярности в количестве от одного до трех. Время нарастания основного импульса составляло от нескольких микросекунд до нескольких десятков микросекунд, а выбросов — от 0,3 до 3,0 мкс. Импульсы сформированы двумя способами: путем изменения параметров элементов электрической цепи источника и изменением параметров линий задержки, включенных в его электрическую цепь.

Представлены импульсы сложной формы, состоящие из основного импульса и выбросов, полученные разделением с помощью одной линии задержки на две части с регулируемым временем задержки выбросов относительно основного импульса. Использование этих импульсов может позволить определять свойства объекта при разных распределениях индукционных токов в нем. Полученные импульсы позволяют получать гистерезисную интерференцию с нулевым максимумом первого — четвертого и более высоких порядков.

Представлены экспериментальные зависимости $U(t)$ электрического напряжения, снимаемого с индукционной магнитной головки, сканирующей ДДМП с записями импульсных магнитных полей, прошедших через пластины из алюминия толщиной 0,015, 0,05, 0,055, 0,07, 0,09, 0,12, 0,165, 0,225 и 0,26 мм от времени t . Получена гистерезисная интерференция импульсного магнитного поля в прошедшей через одиночные пластины волне. Получена также HI в прошедшей через пластины в составе массивного объекта волне и интерференция в отраженном от одиночных пластин импульсном магнитном поле. Показано, что толщину объекта можно определять по величине нулевого максимума гистерезисной интерференции. При этом может быть достигнута чувствительность 1500 мВ/мм. Полученные результаты позволяют повысить в несколько раз чувствительность и точность контроля толщины объекта и удельной электропроводности его материала по сравнению с бесгистерезисными методами.

Проведенные исследования максимальной напряженности импульсного магнитного поля в зазорах внутри металлических объектов, а также использование полученной ранее авторами зависимости этой напряженности вблизи поверхности объекта от его толщины позволяют заключить следующее. Разработанный метод HI дает возможность определять толщину и удельную электропроводность металлических объектов путем проведения измерений в узких зазорах шириной от 10 микрон внутри объектов, где контроль другими методами невозможен.

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. *Грузинцев А.А., Михайлов С.П.* Самосогласованный расчет магнитного поля для задач магнитной дефектоскопии. I. Исходная модель для расчета поля магнитной ленты, намагниченной от проводника с током // Дефектоскопия. 2011. № 2. С. 22—30.
5. *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.
6. *Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S.* Using magnetic hysteresis for testing electroconductive objects in pulsed magnetic fields // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2013. V. 49. No. 6. P. 334—346.
7. *Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С., Пивоваров В.Л.* Расчет распределений остаточных магнитных полей при гистерезисной интерференции импульсного магнитного поля // Дефектоскопия. 2015. № 1. С. 11—20.
8. *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.
9. *Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С., Пивоваров В.Л.* Компьютерные методы нахождения распределений импульсных магнитных полей вблизи объектов из электропроводящих материалов // Дефектоскопия. 2016. № 3. С. 48—56.
10. *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.
11. *Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S.* Hysteretic Interference of Magnetic Field of a Moving Linear Inductor // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 1. P. 49—57. [*Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С.* Гистерезисная интерференция магнитного поля перемещаемого линейного индуктора // Дефектоскопия. 2020. № 1. С. 51—60.]
12. *Акулов Н.С., Телеснин Р.В.* Способ магнитного контроля / Авт. свид. СССР № 452786. Бюл. изобр. 1974. № 45.
13. *Афонин А.М., Киселев В.Н., Вахромеев Ю.И., Пухов И.К.* Магнитооптический преобразователь / Авт. свид. СССР № 832443. Бюл. изобр. 1981. № 19.
14. *Трунов Б.Н., Дремымбо Я.Г., Червоненкис А.Я., Балбашов А.М.* Магнитооптический способ воспроизведения сигналов с магнитного носителя / Авт. свид. СССР № 538392. Бюл. изобр. 1976. № 45.
15. *Терехин И.В., Славинская Е.А.* Контроль удельной электропроводности двухслойных немагнитных объектов импульсным вихретоковым методом // Дефектоскопия. 2019. № 4. С. 30—36.
16. *Тамм И.Е.* Основы теории электричества. М.: Наука, 1989. 504 с.
17. *Слухоцкий А.Е., Немков В.С., Павлов Н.А., Бамунэр А.В.* Установки индукционного нагрева. Л.: Энергоиздат, 1981. 325 с.
18. *Кнопфель Г.* Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972. 390 с.
19. *Поливанов К.М.* Ферромагнетики. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957. 256 с.
20. *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.