

УДК 620.130

**КОМПЬЮТЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИСТЕРЕЗИСНЫХ СВОЙСТВ  
МАГНИТНОГО НОСИТЕЛЯ**

***В. В. ПАВЛЮЧЕНКО, Е. С. ДОРОШЕВИЧ***

Белорусский национальный технический университет

UDC 620.130

**COMPUTER CALCULATIONS OF MAGNETIC FIELDS USING  
HYSTERESIS PROPERTIES OF A MAGNETIC CARRIER**

***V. V. PAVLYUCHENKO, E. S. DOROSHEVICH***

**Аннотация.** На основании результатов экспериментальных исследований предложен алгоритм построения изображений магнитных полей глубинных дефектов. Представлены изображения магнитных полей внутри объекта в виде пластины совместно с изображением объекта в сечении. Полученные результаты позволяют повысить точность контроля глубины залегания дефектов в металлах.

**Ключевые слова:** импульсное магнитное поле, дефекты сплошности в металлах, изображения полей дефектов.

**Abstract.** Based on the obtained experimental studies, a theoretical model for obtaining images of magnetic fields of deep-seated defects has been created. The images of magnetic fields inside the object in the form of a plate are presented together with the image of the object in section. The results obtained make it possible to increase the accuracy of monitoring the parameters of defects in ferromagnetic, paramagnetic, diamagnetic metals due to the developed scheme for constructing optical images and extracting information about the magnetic fields of defects.

**Key words:** pulsed magnetic field, continuity defects in metals, images of defect fields.

Дефекты сплошности в металлических объектах, а также электрические и магнитные свойства материалов объектов можно контролировать разными магнитными и электромагнитными методами. Наибольшее количество экспериментальных и теоретических работ выполнено с использованием вихретокового метода. В одной из этих работ [1] исследованы поля поверхностных дефектов конечной и бесконечной глубины, в других [2, 3] изложен метод магнитоиндукционной томографии, а поле электропроводящего объекта представлено в виде суперпозиции полей элементарных вихревых токов. Большое внимание выявлению дефектов сплошности уделено при разработке методов магнитографической дефектоскопии. Так, в [4, 5] исследована запись полей дефектов при тангенциальном намагничивании объекта и осуществлено экспериментальное определение глубины залегания дефектов. Метод контроля толщины покрытий с неоднородными свойствами [6, 7] может быть применен как для определения толщины слоев, так и для контроля дефектов

в объектах. При проведении расчетов намагничивания объектов из ферромагнитных металлов в ряде случаев учитывается аналитическая модель точечного намагничивания, описанная в [8]. Вопросам магнитной и электромагнитной дефектоскопии посвящен ряд работ [9–16], где развит предложенный авторами метод гистерезисной интерференции, позволяющий в 5 и более раз повысить точность определения параметров дефектов и толщины металлических объектов, и представлены впервые полученные квазилинейные зависимости величины максимальной тангенциальной составляющей вторичного поля вблизи поверхности металлов от толщины объектов. Эти зависимости используются в экспериментальных измерениях и при проведении теоретических расчетов для определения удельной электропроводности, магнитной проницаемости, толщины объектов, параметров дефектов сплошности в них, их геометрических размеров и так далее.

Устройства и способы контроля металлических объектов подробно изложены в [9, 10, 14], где развиты магнитографический и магнитооптический способы контроля, а также описаны разработанные способы определения толщины металлических объектов и дефектов в них с помощью преобразователей Холла. При этом на магнитный носитель или другие преобразователи, приложенные к контролируемому объекту, воздействовали серией одиночных импульсов в количестве 1, 2, 3, 5 и более импульсов. На объект с преобразователем воздействовали также импульсами сложной формы для определения дефектности объектов с выводом преобразователя на участки с максимальной чувствительностью. Экспериментальные работы проведены с преобразователями Холла, магнитооптической пленкой с гигантским фарадеевским вращением и магнитными носителями (МН) с разными калибровочными характеристиками. Диапазон измеряемых полей составлял 1...5000 А/см. Толщина контролируемых ферромагнитных объектов (например, Ст 3) достигала 2 см. Контроль диа- и парамагнитных объектов осуществляли в диапазоне толщин от 0,01 мм до 1 см. Измерения напряженности магнитных полей проводили с помощью цифровых осциллографов с выводом информации на монитор. При этом основное внимание уделено экспериментальным измерениям. Поэтому для повышения точности измерения требуются теоретические расчеты распространения импульсных магнитных полей в указанных объектах, в частности, расчеты полей дефектов на поверхности контролируемых изделий.

Целью работы является повышение точности определения параметров дефектов сплошности в металлических объектах путем проведения расчетов полей локальных источников магнитного поля, расчетов магнитных полей дефектов на поверхности объектов и визуализации магнитных полей этих дефектов внутри объекта совместно с изображением объекта в сечении.

Будем использовать следующую модель теоретических расчетов. Сначала определим источник магнитного поля, эквивалентный глубинному дефекту и, исходя из [9], определим параметры воздействующих на объект с магнитным носителем импульсных магнитных полей. Распределение магнитного поля дефекта внутри объекта рассматривать пока не будем. Пусть на поверхности объекта пространственное распределение поля глубинного дефекта (например, поперечной полости) соответствует распределению поля линейного индуктора, расположенного на глубине  $d_0$  от поверхности, ось которого параллельна поверхности объекта. Тогда зависимость тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля вблизи поверхности объекта следует определять по формуле [9]

$$H = A / (x^2 + b^2), \quad (1)$$

где  $A$  – постоянная;  $x$  – расстояние в сантиметрах до проекции оси индуктора в плоскости измерения;  $b$  – расстояние от оси индуктора до магнитного носителя, см.

Параметры импульсов магнитного поля (амплитуды и время нарастания) находим из данных измерений [10] и свойств магнитного носителя [15].

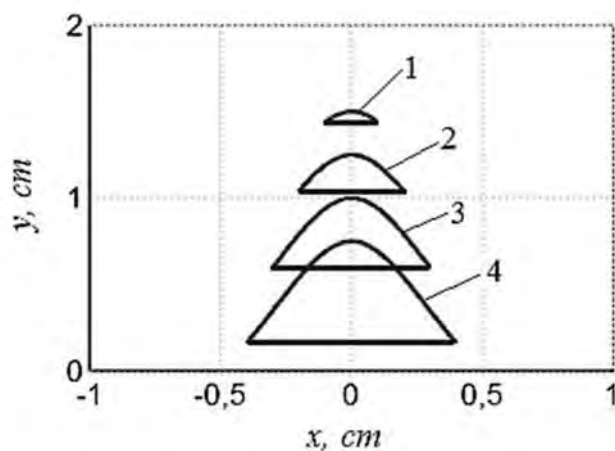


Рис. 1. Изображение распределений 1–4 напряженности магнитного поля глубинного дефекта на поверхности объекта, которое перенесено вглубь объекта

При моделировании использована пластина толщиной 2 см ( $y_1 = 0$ ,  $y_2 = 2$  см) в сечении (рис. 1–3). Пластина содержит дефект в виде поперечной протяженной (более 1 см) полости диаметром около 0,4 см, ось которой расположена на глубине 0,5 см от верхней поверхности металлической пластины. Воздействие на пластину импульсом магнитного поля осуществляется с верхней стороны пластины  $y_2 = 2$  см. Воздействуем на пластину импульсами магнитного поля с увеличивающимся временем нарастания и получим распределения  $H(x)$  напряженности магнитного поля на поверхности пластины. Эти распределения включают в себя распределения напряженности воздействующего магнитного поля, поля глубинного дефекта и поля индукционных токов. В случае пара- и диамагнитных металлов величина максимальной тангенциальной составляющей магнитного поля растет с уменьшением времени нарастания импульса [10] в определенных

При моделировании использована пластина толщиной 2 см ( $y_1 = 0$ ,  $y_2 = 2$  см) в сечении (рис. 1–3). Пластина содержит дефект в виде поперечной протяженной (более 1 см) полости диаметром около 0,4 см, ось которой расположена на глубине 0,5 см от верхней поверхности металлической пластины. Воздействие на пластину импульсом магнитного поля осуществляется с верхней стороны пластины  $y_2 = 2$  см. Воздействуем на пластину импульсами

диапазонах толщины объекта. Если объект изготовлен из ферромагнитного материала, то с уменьшением времени нарастания импульса динамическая магнитная проницаемость материала уменьшается и величина суммарной тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности объекта увеличивается.

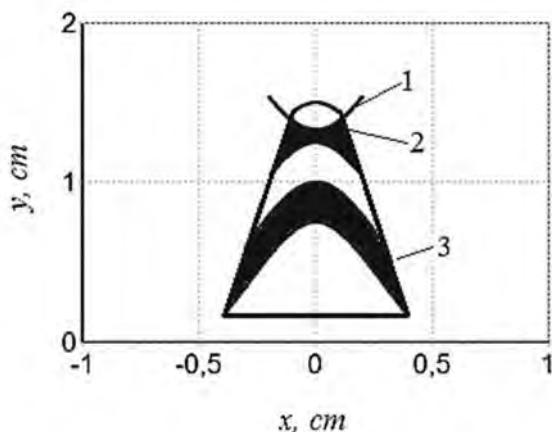


Рис. 2. Оптические изображения 2 и 3 магнитных полей глубинного дефекта в сечении объекта с графиком зеркальной функции 1

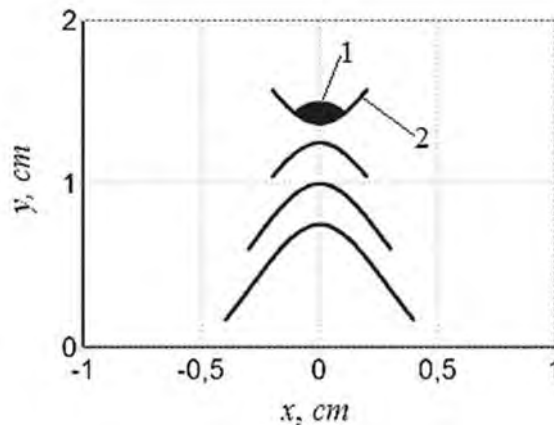


Рис. 3. Локальное оптическое изображение 1 магнитного поля глубинного дефекта в сечении объекта с графиком зеркальной функции 2 и распределениями магнитного поля

Преобразуем зависимости  $H(x)$  в распределения  $y(x)$ , представляющие собой изображения магнитных полей, выраженные в координатах  $x$  и  $y$  в сантиметрах внутри изображенной на рис. 1 пластины и соответствующие распределениям напряженности магнитного поля на поверхности объекта. Преобразование зависимостей  $H(x)$  в распределения  $y(x)$  осуществляем следующим образом. Устанавливаем уровень  $H_0$ , начиная с которого на используемый МН можно производить запись магнитных полей (порог чувствительности МН). Например, у одного из таких МН величина  $H_0 = 30$  А/см. Проводим горизонтальную линию  $H_0 = 30$  А/см, находим координаты  $x$  пересечения этой линии с зависимостями  $H(x)$  и определяем длину отрезков линий, соединяющих найденные точки каждой зависимости. На основании найденных предварительно зависимостей  $H(x)$ , соответствующих глубине залегания определенного внутреннего дефекта в объекте из металла (например, алюминия), определяем положение каждой горизонтальной линии на изображении объекта в сечении. Так, на рис. 1 показано расположение отрезков линий, ограничивающих дуги 1–4. После этого соединяем между собой концы разных отрезков, вследствие чего образуются замкнутые геометрические фигуры. В результате получаем изображения магнитных полей дефекта на разной глубине (см. рис. 1), т. е. строчные изображения поля на поверхности переведены в растровые по толщине пластины с формированием оптических изображений магнитных

полей. При этом проведены алгебраические преобразования с полученными распределениями таким образом, что полю импульса с наименьшим временем возрастания введена соответствующая глубина залегания дефекта. Эти соответствия положения зависимостей 1–4 были определены с помощью подхода, предложенного в [9].

Регулировать пороговые уровни записи  $H_0$  магнитных полей дефектов на магнитный носитель можно путем использования его гистерезисных свойств. Для этого, анализируя гистерезисные ветви магнитного носителя, предварительно намагничиваем его в обратном направлении, после чего воздействуем на МН с объектом импульсом магнитного поля в прямом направлении.

Начиная с некоторого импульса поле дефекта, расположенного на глубине 0,5 см ( $y_3 = 1,5$  см (см. рис. 2)), начнет достигать поверхности объекта. На рис. 2 показана зеркальная (по отношению к функции 1 (см. рис. 1)) функция 1, а также полученные оптические изображения магнитных полей 2 и 3.

Дефект является локальным нарушением, а изображение его поля (фигура, образованная огибающей на рис. 2) простирается к нижней поверхности пластины. Значит, изображение поля дефекта следует локализовать, что и сделано на рис. 2 путем построения зеркальной функции 1 и выделения поля дефекта. Локальное оптическое изображение поля дефекта 1, соответствующее его глубине залегания, показано на рис. 3. Оно получено путем отсечения части изображения линией 2 из полного изображения замкнутой фигуры, показанного на рис. 2. Выделение оптического изображения поля дефекта и его локализация на изображении объекта в сечении осуществляются сравнением с предварительно полученными изображениями магнитных полей разных дефектов. Следующим этапом является построение изображения самого дефекта, например, полости в сечении. Отметим, что толщине пластины около 2 см из ферромагнитного материала соответствует время нарастания импульсов в интервале 0,01...0,5 с и более, а для пара- и диамагнитных металлов толщиной до 4 мм –  $(1...200) \cdot 10^{-6}$  с.

Полученные результаты позволяют повысить точность контроля глубины залегания дефекта за счет точного размещения оптического изображения магнитного поля дефекта на локальном участке изображения пластины в плоскости ее поперечного сечения, где расположен реальный дефект.

### **Выводы**

На основании полученных экспериментальных исследований предложен алгоритм визуализации магнитных полей глубинных дефектов на поверхности объектов из электропроводящих материалов. Представлены

распределения напряженности магнитного поля глубинного дефекта на поверхности объекта, перенесенные вглубь изображения объекта в его сечении с учетом порогового уровня записи  $H_0$  магнитного носителя. Регулирование этого уровня при записи магнитных полей дефектов на магнитный носитель предложено осуществлять путем использования гистерезисных свойств магнитного носителя. Показано также «оптическое изображение» магнитного поля дефекта совместно с изображением объекта в сечении с графиком зеркальной функции, позволяющей локализовать это поле.

Полученные результаты позволяют повысить точность контроля глубины залегания дефекта за счет точного размещения оптического изображения магнитного поля дефекта на локальном участке изображения контролируемого объекта в плоскости его поперечного сечения, где расположен реальный дефект. При этом осуществлена локализация размеров изображения и его размеры приближены к размерам дефекта в сечении контролируемого объекта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ферстер, Ф.** Неразрушающий контроль методом магнитных полей рассеяния. Теоретические и экспериментальные основы выявления поверхностных дефектов конечной и бесконечной глубины / Ф. Ферстер. – Дефектоскопия. – 1984. – № 12. – С. 13–18.
2. **Суханов, Д. Я.** Магнитоиндукционная томография электрических схем и приборов / Д. Я. Суханов, Е. С. Совпель // Изв. высших учебных заведений. – 2015. – Т. 58, № 10/3. – С. 73–75.
3. **Суханов, Д. Я.** Представление поля электропроводящего объекта в виде суперпозиции полей элементарных вихревых токов и их томография / Д. Я. Суханов, К. В. Завьялова // Изв. высших учебных заведений. – 2017. – Т. 60, № 11. – С. 28–34.
4. **Новиков, В. А.** Запись поля дефекта на магнитную ленту при тангенциальном намагничивании полями последовательно противоположных направлений / В. А. Новиков, А. В. Кушнер, А. В. Шилов // Дефектоскопия. – 2010. – № 8. – С. 54–60.
5. **Новиков, В. А.** Экспериментальное определение глубины залегания и величины цилиндрического дефекта в ферромагнитной пластине с использованием визуализирующей магнитные поля пленки / В. А. Новиков, А. В. Шилов // Дефектоскопия. – 2014. – № 4. – С. 25–30.
6. **Лухвич, А. А.** Возможности магнитодинамического метода контроля толщины покрытий с неоднородными свойствами (эксперимент) / А. А. Лухвич, О. В. Булатов, А. Л. Лукьянов // Дефектоскопия. – 2009. – № 11. – С. 46–53.

7. Контроль магнитодинамическим методом толщины никелевых покрытий подхромовыми на двухслойных (неферромагнетик – ферромагнетик) основаниях / А. А. Лухвич [и др.] // Дефектоскопия. – 2015. – № 1. – С. 3–10.

8. **Печенков, А. Н.** Аналитическая модель точечного намагничивания тонкой ферромагнитной пластины / А. Н. Печенков, В. Е. Щербинин, Я. Г. Смородинский // Дефектоскопия. – 2011. – № 12. – С. 19–26.

9. **Павлюченко, В. В.** Одним импульсом / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // LAP LAMBERT AcademicPublishing: Saarbrucken, 2013. – 174 с.

10. **Павлюченко, В. В.** Неразрушающий контроль объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // Дефектоскопия. – 2010. – № 11. – С. 29–40.

11. **Павлюченко, В. В.** Расчет распределений остаточных магнитных полей при гистерезисной интерференции импульсного магнитного поля / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич, В. Л. Пивоваров // Дефектоскопия. – 2015. – № 1. – С. 11–20.

12. **Павлюченко, В. В.** Компьютерные методы нахождения распределений импульсных магнитных полей вблизи объектов из электропроводящих материалов / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич, В. Л. Пивоваров // Дефектоскопия. – 2016. – № 3. – С. 48–56.

13. **Pavlyuchenko, V. V.** Calculating Distributions of Pulsed Magnetic Fields under Hysteretic Interference / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich, V. L. Pivovarov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2018. – Vol. 54, № 2. – P. 121–127.

14. **Павлюченко, В. В.** Обнаружение протяженных дефектов сложной формы в токопроводящих пластинах с помощью магнитного носителя / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // Дефектоскопия. – 2019. – № 3. – С. 31–38.

15. **Павлюченко, В. В.** Гистерезисная интерференция перекрывающихся во времени импульсов магнитного поля / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // Дефектоскопия. – 2019. – № 12. – С. 56–63.

16. **Павлюченко, В. В.** Гистерезисная интерференция магнитного поля перемещаемого линейного индуктора / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // Дефектоскопия. – 2020. – № 1. – С. 51–60.