

А. П. ГУСЕВ, д-р техн. наук

И. Е. ЗАГОРСКИЙ

А. А. ПОЛОНЕВИЧ

Институт прикладной физики НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

ЗАВИСИМОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ОТ РАЗМАГНИЧИВАЮЩЕГО ФАКТОРА ФОРМЫ ТЕЛА

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований магнитного поля рассеяния подповерхностных дефектов сплошности материала образцов магнитомягкой стали в форме призмы, намагничиваемых постоянным полем, в зависимости от размагничивающего фактора формы тела.

Ключевые слова: магнитное поле, намагниченность материала, дефект, магнитное поле дефекта, размагничивающий фактор

Одним из основных условий эффективности магнитного неразрушающего контроля стальных изделий машиностроения, металлургии, транспорта, строительной отрасли является создание в объеме контролируемого изделия необходимой намагниченности материала для наилучшей регистрации интересующего параметра. В частности, эффективность интерпретации и достоверности результатов контроля таких изделий методом магнитной дефектоскопии определяется использованием зависимостей формирования магнитных полей рассеяния дефектов сплошности под действием магнитных потоков намагниченности материала [1-5]. В связи с этим для создания необходимой намагниченности материала в объеме тела актуальной задачей является разработка соответствующих намагничивающих систем применительно к конкретным типам стальных изделий, то есть – с учетом их формы, размеров и магнитных свойств материала.

При описании намагниченности $\mathbf{J}$ материала ферромагнитных тел разомкнутой формы широко применяется модель магнитной поляризации тела во внешнем намагничивающем поле $\mathbf{H}_0$ [6-8]: магнитные моменты диполей в объеме тела ориентируются (с поправкой на магнитное взаимодействие диполей) в направлении $\mathbf{H}_0$, в результате чего на краях тела образуются магнитные полюсы, магнитное поле $\mathbf{H}_p$ которых внутри тела направлено навстречу $\mathbf{H}_0$, а его интенсивность пропорциональна намагниченности $\mathbf{J}$ материала тела $\mathbf{H}_p = \mathbf{N} \cdot \mathbf{J}$, где величина $\mathbf{N}$ называется размагничивающим фактором.

При однородном намагничивании (тела правильной сферической формы) размагничивающий фактор $\mathbf{N}$ является коэффициентом, зависящим от формы тела и от соотношения его размеров в разных направлениях, в частности - от отношения поперечного размера $\mathbf{d}$ тела к его длине $\mathbf{L}$:

$$N = d/L \quad (1)$$

Намагниченность J материала тела при этом формируется под действием внутреннего результирующего поля

$$H_i = H_0 - N \cdot J \quad (2)$$

В общем случае (при неоднородном намагничивании) использование размагничивающего фактора N возможно, как коэффициента, если J определяется в виде усредненной по объему тела величины, либо - как координатного тензора. В этих случаях значения всех величин, входящих в (2), зависят от расположения точки внутри намагничиваемого тела, а расчетное определение намагниченности J - достаточно сложная задача из-за взаимозависимости величин H_i , J и N в связи с нелинейностью магнитной проницаемости материала.

В связи с изложенным, для выявления зависимости формирования магнитных полей рассеяния поверхностных дефектов стальных прутков от намагниченности материала проведен ряд экспериментальных исследований [9–12] при расположении дефектов в различных местах по длине прутка и в зависимости от длины L прутков [12] в диапазоне 200–950 мм. Полученные результаты авторы объясняют на основе зависимости поля дефекта от намагниченности материала в зоне дефекта, от влияния торцов прутка на намагниченность материала и от образования под дефектом магнитного диполя.

В данной работе представлены результаты исследования индукции магнитных полей рассеяния дефектов сплошности материала образцов магнитомягкой стали в зависимости от размагничивающего фактора N формы тела, определяемого по (1). Целью эксперимента является определение степени изменений намагниченности материала тела по магнитному полю рассеяния подповерхностных дефектов при изменении размеров исследуемых образцов.

Образцы и метод исследования

Исследования выполнены на образцах конструкционной стали 3, так как взаимосвязь формирования намагниченности материала ферромагнитных тел с их формой сильнее проявляется в магнитомягких ферромагнетиках. Образцы в начале эксперимента – прямоугольные призмы сечением 12 x 6 мм и длиной $L = 200$ мм. Данные размеры образцов выбраны для возможности изменения размагничивающего фактора уменьшением их длины. Форма дефектов – поперечные сквозные цилиндрические отверстия диаметром 1,6 мм на одинаковом от концов образца расстоянии. В каждом образце выполнено по одному дефекту на различной глубине h (расстояние от поверхности образца до центра отверстия): 1,6; 2,6; 3,6; 3,9; 4,2; 5,0 мм.

В процессе исследований образцы намагничивались вдоль их длины однородным магнитным полем от источника соленоидального типа с индукцией $B_0 = 20$ мТл. Степень неоднородности индукции намагничивающего поля на длине 200 мм не превышала 1,5 %, на длине 190 мм – не более 1%. Образцы при измерениях располагались вдоль продольной оси катушек таким

образом, что положение центра дефектов на оси ОХ соответствовало координате $x_d = 0$ (центр намагничивающей системы).

Измерение распределения индукции магнитного поля рассеяния дефектов производилось сканированием поверхности образцов датчиком Холла с зазором 0,2 мм в направлении их намагничивания (по оси ОХ). Датчик Холла подключен на вход прецизионного измерительного канала автоматизированной установки и для сканирования установлен на координатном устройстве с разрешающей способностью 2,5 мкм.

Значение нормальной составляющей магнитной индукции B_1 поля рассеяния дефекта в каждой точке x_i определялось по разности двух измерений $B_{1i} = B_{\Sigma i} - B_{01i}$, где: B_{01} - значение индукции магнитного поля бездефектных образцов, B_{Σ} - значение индукции магнитного поля образцов с дефектами.

Для получения зависимости распределения $B_1(x)$ от размагничивающего фактора N процесс измерения магнитной индукции имел циклический характер: сначала измерения проводились на образцах длиной 200 мм, на следующих циклах измерений образцы (бездефектные и с дефектами) укорачивались с обоих концов по 20 мм. На последнем цикле длина образцов была равна 80 мм.

Результаты измерений и их обсуждение

Экспериментально получено распределение нормальной составляющей B_1 индукции магнитного поля рассеяния подповерхностных дефектов образцов из стали 3 в зависимости от глубины h залегания дефектов при различных значениях размагничивающего фактора N , определяемого по (1), в диапазоне $0,06 \div 0,15$. В качестве примера распределение нормальной составляющей B_1 индукции магнитного поля дефектов образцов длиной 160 мм, иллюстрируется графиками на рис. 1.

Распределение составляющей B_1 индукции магнитного поля дефектов, как видно на рис.1, характеризуется следующими параметрами: нормальная составляющая индукции над центром дефекта имеет нулевое значение; с двух сторон от дефекта – экстремальные различного знака значения B_1 ; при дальнейшем удалении от экстремумов по оси абсцисс значения B_1 уменьшаются по экспоненте. С увеличением глубины h залегания дефектов величина экстремумов B_1 уменьшается, а расстояния Δx , по оси абсцисс между экстремальными точками увеличиваются.

Зависимость амплитуды экстремальных значений индукции B_1 поля рассеяния дефектов, находящихся на различной глубине h , от размагничивающего фактора N представлена на рис. 2. Экстремальные значения индукции магнитных полей подповерхностных дефектов, как видно из графиков B_1 , на рис. 2, тем больше, чем меньше глубина h залегания и чем больше длина образцов L . Данные зависимости с учетом уменьшения расстояния между экстремальными точками Δx , распределения B_1 вдоль оси

абсцисс (рис. 1) характеризуют степень пространственной локализации магнитных полей рассеяния подповерхностных дефектов в зоне их расположения с различной глубиной залегания.

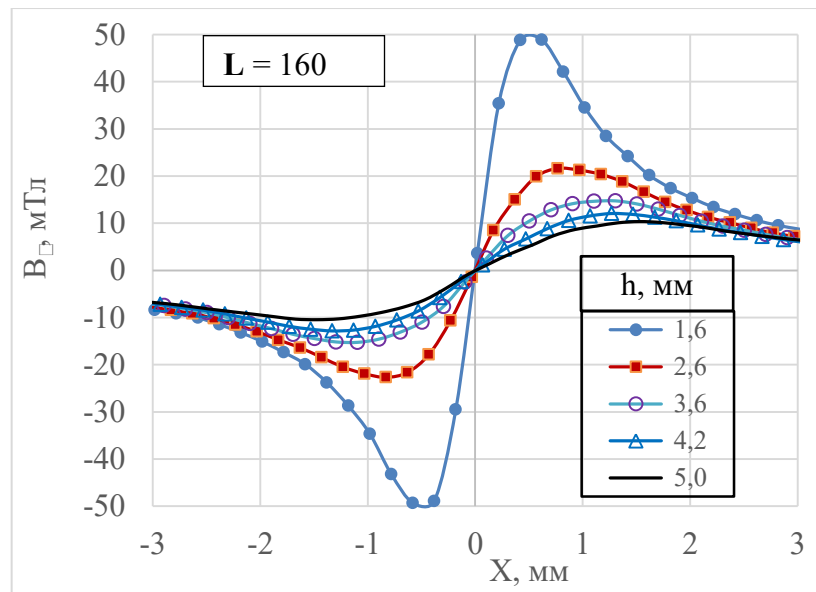


Рис. 1. Распределение нормальной составляющей B_z индукции магнитного поля дефектов, расположенных на различной глубине h

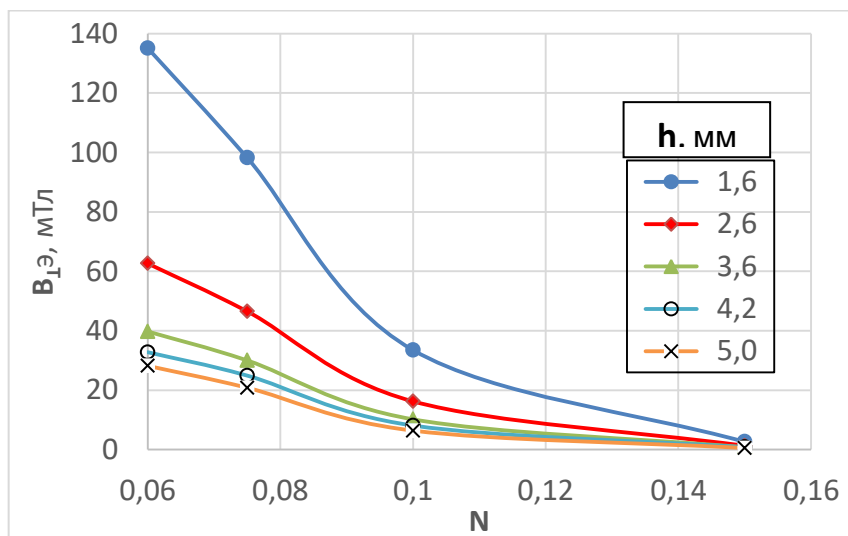


Рис. 2. Зависимость экстремальных значений B_z индукции магнитных полей дефектов от размагничивающего фактора N

Особенностью зависимостей на рис. 2 является то, что для образцов длиной 200 и 180 мм значения B_z индукции полей рассеяния всех дефектов до глубины $h = 5$ мм превышают значение 20 мТл – величину индукции намагничивающего поля. Данное явление объясняется тем, что поле рассеяния дефектов формируется намагненностью J материала внутри тела.

Уменьшение намагниченности материала с увеличением размагничивающего фактора видно на рис.2 по уменьшению значений B_L , с увеличением N . При этом степень уменьшения индукции полей дефектов, находящихся в центральном сечении образцов, не зависит (в диапазоне исследованных значений N) от глубины h их залегания. Данный вывод подтверждается отношением значений B_L индукции полей дефектов образцов длиной $L=200$ мм к значениям B_L индукции полей дефектов образцов длиной $L=80$ мм (таблица 1).

Таблица 1. Отношение значений индукции магнитного поля дефектов образцов длиной 200 мм к индукции поля дефектов образцов длиной 80 мм

h, мм	1,6	2,6	3,6	4,2	5
B_{L200} / B_{L80}	51,6	48,8	49,8	46,7	52,9

Учитывая известное положение, что интенсивность поля рассеяния дефекта пропорциональна намагниченности материала, представленное в таблице 1 уменьшение интенсивности магнитного поля рассеяния дефектов в 50 раз относится и к изменению намагниченности J материала. При этом, как следует из (2), с увеличением N в 2,5 раза и уменьшении намагниченности материала в 50 раз интенсивность результирующего поля внутри намагничиваемых образцов уменьшилась в 20 раз.

Заключение

Полученные в результате эксперимента соотношения величин, входящих в (2), являются конструкцией используемой модели магнитной поляризации тела во внешнем намагничивающем поле H_0 . Размагничивающий фактор N по данной модели, характеризующий влияние формы тела на намагниченность материала является лишь вспомогательной величиной для формального описания процесса намагничивания тел разомкнутой формы.

В реальности форма тела имеет значение для процесса намагничивания лишь как пространственное расположение его поляризованных частей относительно друг друга. Однако процесс намагничивания тела – не просто поляризация магнитных моментов, но и магнитное взаимодействие частей тела друг с другом, результат которого зависит от их взаимного расположения, что в модели поляризации тела частично учитывается представлением фактора N в виде координатного тензора. Например, при уменьшении длины намагничиваемых образцов в проведенном эксперименте происходит не только удаление концевых намагниченных частей вместе с их магнитным полем, но при этом исчезает и магнитное взаимодействие (в данном случае – подмагничивающее [13]) этих частей с оставшейся укороченной средней частью образца.

Кроме того, выражение – «поляризация тела разомкнутой формы» – по умолчанию рассматривает лишь проходящий через тело суммарный магнитный поток - намагничивающего поля и намагниченности материала. Поэтому данная модель не учитывает замкнутые внутри тела магнитные потоки [14], что для магнитной дефектоскопии имеет существенное значение.

Список литературы

- 1 Янус, Р. И. Приближенное решение задачи магнитной дефектоскопии. - НТО, 1935, т. 5, вып. 7, с. 1314-1315.
- 2 Аркадьев, В. К. О развитии теоретических основ дефектоскопии. - Известия АН СССР, ОТН, 1937, 2, с. 233-240.
- 3 Вонсовский, С. В. Простейшие расчеты для задач магнитной дефектоскопии. - ЖТФ, 1938, т. 8, вып. 16, с. 1453-1467.
- 4 Янус, Р. И. Магнитная дефектоскопия. - Гостехиздат, 1946, с. 32-48.
- 5 Сапожников А. Б. Об учете нелинейности кривой намагничивания в задачах магнитной дефектоскопии. - Труды СФТИ при ТГУ, Томск, 1948, вып. 26, с. 183-188.
- 6 Neumann H., Warmut K. - *Wiss. Veröff. Siemenskonzern*”. 1932. № 2, s. 11.
- 7 Аркадьев, В. К. - Электромагнитные процессы в металлах, ч. 1. ОНТИ, Москва-Ленинград, 1934, с.114-123.
- 8 Чернышев, Е. Т. Магнитные измерения / Е. Н. Чечурина, Н. Г. Чернышева, Н. В. Студенцов. - Изд-во комитета стандартов, мер и измерительных приборов при СМ СССР, Москва, 1969, с. 144-155.
- 9 Александров, А. Г. О структуре поля над дефектом при намагничивании образца по частному циклу в открытой цепи электромагнита. - Тезисы докладов IX Всесоюзной н.-т. конф. «Неразрушающие физические методы и средства контроля». Секция В – магнитные методы. Минск, 1981, с. 235–237.
- 10 Чернышев, А. В. Магнитное поле в полости поверхностной щели при намагничивании образца в разомкнутой магнитной цепи / Н. Н. Зацепин, Н. О. Гусак, В. И. Шевкунов. - Дефектоскопия, 1986, №1, с. 13–17.
- 11 Чернышев А. В. Нормальная составляющая магнитного поля дефекта в убывающем намагничивающем поле / Н. Н. Зацепин, Н. О. Гусак. - Изв. АН БССР, сер. физ.–техн. наук, 1988, № 1, с. 93–95.
- 12 Чернышев А. В. Магнитное поле рассеяния в области поперечного паза. - ISSN 0235 – 3474. Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 1991, №2, с. 27–29.
- 13 Гусев, А. П. Экспериментальное исследование магнитного взаимодействия ферромагнитных тел. – Дефектоскопия, 1994, №1, с.14-18
- 14 Гусев, А. П. Модели магнитных зарядов и потоков в задаче дефектоскопии с локальным намагничиванием. - Дефектоскопия. – 2014. № № 6. – С. 46 – 53.

Контакты:

gusevar@iaph.bas-net.by (Гусев Александр Петрович)