
УДК 620.179.14

А. В. Кушнер, В. А. Новиков

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ДЕФЕКТОВ В ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ РАССЕЙНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ НАМАГНИЧИВАНИИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ

UDC 620.179.14

A. V. Kushner, V. A. Novikov

THE ANALYSIS OF MODELS OF DEFECTS THROUGH THEORETICAL RESEARCH OF MAGNETIC STRAY FIELDS ARISING DURING FERROMAGNETIC OBJECTS MAGNETIZATION

Аннотация

Проанализированы модели дефектов в теоретических исследованиях магнитных полей рассеяния, возникающих при намагничивании ферромагнитных объектов. Дан сравнительный анализ результатов расчетов полей рассеяния дефектов для различных моделей.

Ключевые слова:

магнитный контроль, модели дефектов сплошности, теоретические исследования, поля рассеяния дефектов.

Abstract

Models of defects have been analyzed in the theoretical research of magnetic stray fields arising during the magnetization of ferromagnetic objects. The comparative analysis of calculations of stray fields of defects for different models is presented.

Key words:

magnetic control, models of integrity defects, theoretical research, stray fields of defects.

С целью оптимизации условий магнитного контроля ферромагнитных объектов произведем анализ моделей дефектов в теоретических исследованиях магнитных полей рассеяния, возникающих при намагничивании ферромагнитных объектов.

В. К. Аркадьев впервые предложил магнитное поле рассеяния, создаваемое поверхностной трещиной, рассматривать как поле, образованное двумя разноименными линейными «магнитными зарядами», имеющими равномерную линейную плотность и расположенными в углах выхода трещины на поверхности объекта [1]. Такая модель

хорошо передает структуру поля рассеяния на расстояниях не менее трехкратного значения раскрытия дефекта. Однако при расчете ближних полей у боковых граней дефекта нормальная составляющая поля несплошности обращается в бесконечно большую величину. Данная методика позволяет учесть только один параметр дефекта – ширину его раскрытия.

В [2] проведен расчет магнитного поля объекта, состоящего из двух сред с различными магнитными проницаемостями. Поверхность раздела сред представляет собой две полуплоскости, образующие двугранный угол. Магнитное

поле создается током, текущим по прямолинейному проводнику в пространстве параллельно ребру границы раздела сред. Расчет производится для случая постоянной магнитной проницаемости сред. При этом автор отмечает, что для конечных проницаемостей при использовании метода конформных преобразований задача не может быть решена точно.

Н. П. Большаковым получено аналитическое выражение для тангенциальной составляющей поля рассеяния дефекта, имеющего полуцилиндрический профиль, в точке над его центром [3]. Дефект находится в ферромагнитном полупространстве. Объект намагничивается внешним однородным полем, направленным параллельно поверхности. За источник вторичного поля в этом случае приняты поверхностные «поляризационные заряды», распределенные по закону косинуса.

А. Б. Сапожниковым получены выражения для скалярного потенциала, определяющего компоненты напряженности магнитостатического поля включений в виде бесконечно вытянутых эллиптического и кругового цилиндров при условии, что объект намагничен таким по величине полем, что магнитная проницаемость среды постоянна. Исследованы зависимости величины поля рассеяния дефекта от степени раскрытия и глубины залегания дефекта [4].

С целью проведения магнитного контроля качества объемной или поверхностной закалки массивных стальных изделий последние зачастую подвергают локальному намагничиванию при помощи приставных электромагнитов. В этом случае распределение индукции в толще изделия, а следовательно, величина и распределение поля остаточной намагниченности определенным образом связаны с магнитной индукцией в полюсе электромагнита, с магнитными свойствами испытуемого участка изделия и с геометрическими размерами полюсов электромагнита.

Поэтому в [5] был проведен расчет распределения индукции в массивном стальном изделии при локальном его намагничивании с помощью приставного электромагнита. Было установлено, что поле остаточной намагниченности открытого полюса так же, как и индукция в неограниченном ферромагнитном полупространстве, с достаточной для практики точностью описывается формулами, полученными в предположении постоянства поверхностной плотности «магнитных зарядов». Это позволяет проводить расчет как геометрических размеров намагничивающих устройств, так и основных параметров регистрирующего устройства для контроля структуры и твердости стальных изделий по измерениям поля остаточной намагниченности. Но при этом распределение остаточной индукции в изделии не описывается количественно с такой же степенью точности. Экспериментально установлено, что нижней границей индукции для определения глубины промагничивания стального изделия следует считать индукцию $B_{\min} \approx 0,6$ Тл. Регулирование глубины промагничивания стального изделия может быть осуществлено как путем соответствующего выбора геометрических размеров полюса электромагнита, так и путем изменения средней индукции в полюсе.

Для расчета полей рассеяния дефектов полуэллиптического и полукругового профилей рассмотрена безграничная ферромагнитная среда с дефектом в виде бесконечно длинного цилиндра, намагниченная однородным магнитным полем, направленным перпендикулярно образующей цилиндра [6]. Расчет поля рассеяния, обусловленного немагнитным включением, произведен посредством решения уравнения Лапласа при условии, что источником вторичного поля являются поверхностные поляризационные «заряды», распределенные по поверхности инородного включения по закону косинуса. В этом случае такое включение можно рас-

смаатривать как заряженный слой с эллиптическим профилем, находящимся в среде с постоянной магнитной проницаемостью. В [7, 8] считается, что если не учитывать перераспределение «поляризационных зарядов» на поверхности дефекта и объекта, то все положения для цилиндрического включения будут справедливы и для полуцилиндрических поверхностных дефектов.

Ф. Фёрстером выполнен расчет поля рассеяния поверхностных трещин конечной и бесконечной глубины, находящихся в полубесконечном ферромагнитном объекте, для линейного случая ($\mu = \text{const}$) [9–11]. Расчет поля рассеяния бесконечно глубокой трещины в ферромагнитном материале с очень большой магнитной проницаемостью получен методом конформного преобразования. При этом напряженность магнитного поля описывается не в явной форме, как функция преобразованных координат, а получается посредством цифровых методов из исходных координат. Как отмечает автор, из расчетов легко выводятся приближенные формулы для бесконечно глубокой трещины, а из них – простые расчетные формулы для полей рассеяния трещин конечной глубины и заданной ширины.

Рассмотренные математические модели поверхностных дефектов имеют существенный недостаток: для сравнения результатов расчета и эксперимента расчетные кривые должны быть приведены к эксперименту путем приравнивания значений в точке над центром дефекта для каждого типа дефекта при изменении любого параметра несплошности, а также при каждом изменении намагничивающего поля. Кроме того, при увеличении намагничивающего поля растет несоответствие расчетных значений полей рассеяния дефектов с результатами экспериментов. В случае выхода дефекта на поверхность объекта возрастает расхождение результатов расчета и эксперимента, так как расчетное значение нормальной составляющей

поля над гранью дефекта, перпендикулярного поверхности объекта, стремится к бесконечности.

В [12, 13] методом «магнитных зарядов» рассчитано поле двух щелей, расположенных симметрично относительно оси, перпендикулярной поверхности пластины. Расчет выполнен для случая, когда дефекты расположены параллельно поверхностям пластины и имеют клинообразные окончания. Объект намагничивается однородным постоянным полем перпендикулярно его поверхности. Принято допущение, что «магнитные заряды» равномерно распределены по всем граням дефектов, а их наличие на поверхности пластины не учитывается. В результате расчета было установлено, что H_x имеет экстремальные значения на краях дефектов, а ее характер и положения экстремумов существенно не меняются при изменении параметров несплошностей, которые влияют только на величину их поля рассеяния. Расстояние между экстремумами зависит лишь от расстояния между дефектами.

Разработана методика определения диаметра литого ядра точечных сварных соединений, выполненных контактной точечной сваркой.

В [14, 15] предложено использовать модели дефектов с закругленными углами или модели с пакетным распределением поверхностных «поляризационных зарядов». В [14] произведен расчет поля рассеяния дефекта, аппроксимированного двумя гранями конечных размеров, «заряженных» до некоторого значения поверхностной плотности σ . Установлено, что величина поля рассеяния дефекта зависит от его протяженности l в определенном диапазоне линейным образом. В плоскости, перпендикулярной граням в центре дефекта, поле рассеяния дефекта при малых l пропорционально его длине, а при больших – стремится к своему предельному значению тем быстрее, чем меньше глубина дефекта h (при фиксирован-

ной ширине $2b$). При слабых намагничивающих полях кривые $H_x(l)$ и $H_y(l)$ быстрее приближаются к своему предельному значению, $H(l \rightarrow \infty)$, чем при сильных H_0 . Установлено, что распределение поля рассеяния дефекта конечной протяженности слабо зависит от l , а также незначительно изменяется вдоль его длины и только при $z > l$ это изменение становится интенсивным.

Дальнейшим развитием задачи исследования полей рассеяния дефектов является работа [15]. В ней приведены расчетные формулы полей рассеяния дефектов в форме прямоугольного параллелепипеда конечной длины, клина, цилиндра эллиптического и кругового профилей, полуэллипсоида и полушара. Это дает возможность произвести расчет и выполнить сравнение распределения полей рассеяния дефектов различной формы.

Модель дефекта в виде ленточного диполя [7] позволяет объяснить многие закономерности в поведении поля рассеяния дефекта, однако она оказывается неудовлетворительной при описании распределения поля рассеяния дефекта в непосредственной близости от поверхности изделия. Для исключения данного недостатка в [16] рассмотрена усовершенствованная модель ленточного диполя, в которой учтено образование «зарядов» не только на гранях дефекта, но и на поверхности контролируемого объекта в окрестностях дефекта. Чтобы учесть различную плотность «магнитных зарядов», была применена пакетная модель, которая заключается в том, что участок, на котором учитываются «магнитные заряды», разбивают на несколько интервалов, имеющих различную плотность «зарядов». При этом было получено хорошее совпадение расчетных и экспериментальных результатов.

Сложность расчета поля «пакетной» модели состоит в том, что для определения размеров «пакетов» в зависимости от параметров дефекта приходится решать трансцендентные уравне-

ния и фактически для каждого дефекта проводить подбор размера «пакета» по данным эксперимента [16].

В [17] действие объемных «поляризационных зарядов» учитывается заменой их на расчетные «заряды», сосредоточенные на линиях, расположенных на некотором расстоянии от поляризационных плоскостей. Таким образом, расчет сводится к вычислению поля, создаваемого двумя линейными полюсами, расположенными на некотором расстоянии от поляризованных плоскостей. Исследования показали, что полученные в [17] выражения для расчета магнитостатического поля трещины позволяют с достаточной степенью точности провести количественное исследование всех характеристик поля как вблизи выхода трещины, так и вдали от нее в образцах с учетом их магнитных характеристик и размеров трещин.

Следует также отметить, что для нахождения аналитической связи между параметрами полей рассеяния дефектов, магнитными характеристиками материала изделия и размерами дефекта необходимо учитывать, кроме краевого эффекта, нелинейность магнитной проницаемости и магнитных свойств материалов [19]. Такой метод количественного расчета создаст возможности для идентификации дефектов по величине полей рассеяния и их распределения.

В ряде теоретических и экспериментальных работ отмечено, что при изменении в определенном диапазоне глубины дефекта постоянного раскрытия магнитное поле рассеяния дефекта практически остается неизменным, хотя расчетные формулы устанавливают его пропорциональную зависимость от глубины [20–22]. Это объясняется тем, что при намагничивании магнитный поток, обусловленный внешним полем, разветвляется на два: одна часть участвует в формировании поля рассеяния дефекта, другая – огибает дефект.

В [23] показано, что магнитное поле рассеяния дефекта эквивалентно

полю, которое создавало бы ферромагнитное тело, имеющее размеры дефекта, расположенное в вакууме и намагниченное в противоположном направлении. В этом случае при расчете магнитных полей рассеяния дефектов можно пользоваться (формально) выражениями, полученными для ферромагнитных тел, имеющих те же размеры, что и дефект, в том числе выражениями для коэффициентов размагничивания ферромагнитных тел заданной формы.

В связи с широким использованием ЭВМ получены математические модели, которые количественно описывают поля рассеяния с учетом параметров дефектов и магнитных свойств контролируемого объекта, что позволяет решить обратную задачу [15, 24–28].

В [29] Г. Добманом проведен критический обзор аналитических исследований полей поверхностных дефектов. Предложено поле рассеяния поверхностных дефектов описывать посредством интегральных уравнений, решаемых методом последовательных приближений. Этот подход известен как метод Г. А. Гринберга [30]. В [31] определены основные закономерности распределения магнитного поля рассеяния дефекта в виде бесконечно длинного прямоугольного паза, расположенного на поверхности ферромагнитного полупространства, при намагничивании нормально поверхности. Согласно результатам расчета при увеличении глубины дефекта поле его рассеяния остается постоянным. На самом деле величина поля рассеяния, обусловленного дефектом, должна уменьшаться вследствие удаления дна дефекта.

Основой модели в [32] являются предложенные в [17] уравнения составляющих поля вблизи поверхностного дефекта, грани которого нормальны поверхности. Такой подход дает возможность решать задачи практической дефектоскопии с применением ЭВМ в реальном времени в условиях помех и неточных измерений. Приведенные алго-

ритмы при небольшой модификации позволяют получать оценки параметров сколь угодно большого числа дефектов в одном протяженном объекте.

На основе анализа обширного экспериментального материала по результатам исследований полей рассеяния, создаваемых дефектами, в [33] предложена модель поля протяженного поверхностного дефекта прямоугольного профиля в виде системы двух углубленных линейных «магнитных зарядов». Согласно принятой модели расположение «зарядов» на поверхностях граней дефектов зависит от параметров дефекта. В работе установлены функциональные зависимости распределения «магнитных зарядов» от параметров дефекта и магнитных характеристик среды. Проведено сравнение результатов эксперимента и расчетов для ряда широко известных математических моделей полей рассеяния поверхностных дефектов (модель В. К. Аркадзева, модель Н. Н. Зацепина – В. Е. Щербинина, модель с «зарядами», распределенными по линейному закону, и модель углубленных «зарядов» для группы дефектов). Выявлено, что самое близкое количественное и качественное соответствие с экспериментом дает расчет поля для модели «углубленных зарядов».

В [34] для учета влияния нелинейных свойств ферромагнитной среды на поле поверхностного дефекта использован метод последовательных приближений. В качестве исходных взяты формулы из [7, 11]. Установлено, что полученные выражения хорошо описывают поле только узких поверхностных дефектов, ширина которых составляет десятые и сотые доли миллиметра. Показано, что существенный вклад в поле поверхностных дефектов вносят «объемные заряды».

В [35] предложена модель магнитного поля рассеяния дефекта в виде бесконечно тонкого соленоида прямоугольного сечения, длина которого равна ширине дефекта, а высота – его глу-

бине. Принято допущение, что по обмотке соленоида протекает ток, плотность которого равна нормальной составляющей намагниченности ферромагнетика, в котором находится данный дефект. Модель является универсальной, что подтверждают результаты расчетов, полученных ранее Н. Н. Зацепиным, В. Е. Щербининым, Ф. Фёрстером.

На основе учета размагничивающего фактора дефекта в [36] получено аналитическое выражение для количественной оценки поверхностной плотности «магнитных зарядов», возникающих на гранях дефектов при тангенциальном намагничивании ферромагнитного изделия, а также уточненные расчетные соотношения, описывающие распределение магнитного поля рассеяния дефекта конечной глубины.

В [37] проведен самосогласованный расчет плотности «поверхностных зарядов» на гранях поверхностного дефекта. Показано, что в общем случае модель дефекта с постоянной плотностью «зарядов» возможна лишь для нелинейной ферромагнитной среды. Наличие объемных «зарядов» влечет за собой существенное изменение поверхностных «зарядов». Поле объемных «зарядов» вблизи дефекта направлено в ту же сторону, что и внешнее намагничивающее поле, возрастая с приближением к дну дефекта, что приводит к возрастанию величины поверхностных «зарядов» и однородному их распределению. Из-за существенной взаимосвязи поверхностных и объемных «магнитных зарядов» необходимо определять их одновременно самосогласованным образом, причем с учетом реальной кривой намагничивания материала. Выполненные в [37] расчеты позволили установить плотность «зарядов» на гранях несплошности и поле поверхностного дефекта.

В предложенной в [38] расчетной модели дефект был представлен в виде тонкого бесконечного соленоида прямоугольного сечения с длиной, равной глубине дефекта, высотой, равной ширине

его раскрытия, по которому протекает ток с поверхностной плотностью, равной нормальной составляющей намагниченности ферромагнитного полупространства, в котором находится данный дефект. Получены выражения для расчета тангенциальной и нормальной составляющих магнитного поля прямого и наклонного поверхностных дефектов, находящихся в ферромагнитном объекте в приложенном магнитном поле.

В [39] произведен расчет модели поверхностного дефекта в виде прямоугольной канавки в нелинейной магнитной среде. Расчет иницирующего поля осуществлялся по формулам Н. Н. Зацепина – В. Е. Щербинина [7], а величина плотности «магнитных зарядов» σ определялась самосогласованным образом, т. е. с учетом поля «объемных зарядов», как это описано в [37]. Сравнение результатов теоретических расчетов с экспериментом показало их хорошее совпадение.

В [40] получены формулы составляющих напряженности магнитного поля поверхностного дефекта в виде прямоугольного паза при намагничивании ферромагнетика неоднородным полем магнитов. Исследована зависимость распределения напряженности поля от смещения дефекта относительно центра намагничивающей системы. Анализ аналитических выражений поля рассеяния дефекта для рассматриваемой модели намагничивающей системы показывает, что оптимальность расположения чувствительных элементов преобразователя, установленная для однородного намагничивающего поля, сохраняется и для неоднородного. Однако в последнем случае форма выходного сигнала преобразователя от дефекта зависит от неоднородности намагничивающего поля и зависимость становится существенной при отношении величины намагничиваемой зоны $\Delta_{хн}$ к величине зоны чувствительности преобразователя $\Delta_{хе}$ менее 5. Разумеется, данная цифра справедлива лишь для

введенных здесь критериев определения величин $\Delta_{хн}$ и $\Delta_{хе}$.

В [41] выполнен расчет магнито-статического поля, наклонного к поверхности изделия дефекта в виде щели при однородном и неоднородном распределении магнитных поляризационных «зарядов» вдоль его граней. Анализируются выражения для тангенциальной и нормальной составляющих поля в зависимости от угла наклона плоскости дефекта относительно нормали к поверхности. Сравнение расчетных данных с экспериментом показало, что учет неоднородности распределения «зарядов» вдоль граней дает лучшее совпадение с экспериментом, чем модель однородной поляризации. Выявлено, что при прочих равных условиях величина нормальной и тангенциальной компонент поля практически не зависит от угла наклона плоскости дефекта.

В [42] получены формулы для расчета плотности поверхностных «зарядов» на гранях дефекта конечной протяженности в пластине конечной толщины и магнитного поля рассеяния дефекта над поверхностью ферромагнетика. Установлено, что влияние толщины тонкой ферромагнитной пластины на магнитное поле рассеяния дефекта более существенно, чем в случае толстой пластины, и им можно пренебречь, если глубина дефекта составляет менее 20...25 % от толщины изделия.

На зависимость величины магнитного поля от протяженности дефекта слабо влияют раскрытие дефекта и толщина изделия, существенное воздействие оказывает высота точки измерения. Влиянием протяженности дефекта на его магнитное поле можно пренебречь, если выполняются условия: $l/h \leq 2...3$ (где l – длина, а h – глубина дефекта) – в случае толстой пластины и $l/h \leq 8$ – тонкой ферромагнитной.

В [43] с помощью приближенной модели обтекания потоком индукции выведены аналитические выражения для плотности «магнитных зарядов» на

поверхностях дефекта.

В [44, 45] получена динамическая модель дефекта сплошности при нормальном намагничивании полем стержневого магнита конечных размеров. Установлено, что при нормальном намагничивании объекта стержневым магнитом существует продольная составляющая магнитного поля, намагничивающая боковые грани дефекта сплошности, тем самым образуя дополнительное магнитное поле, искажающее распределение магнитного поля рассеяния дефекта, создаваемого лишь за счет нормального намагничивающего поля. При этом выявляемость дефекта ухудшается. Наиболее существенное искажение распределения магнитного поля рассеяния дефекта характерно для дефектов малого раскрытия. С увеличением раскрытия искажение распределения магнитного поля рассеяния дефекта уменьшается и приближается к распределению магнитного поля при действии только лишь нормальной составляющей. Полученная модель позволяет для заданной глубины дефекта выбрать режим намагничивания, обеспечивающий наилучшую его выявляемость при нормальном намагничивании.

В [46] проводится численный анализ конфигурации магнитных полей ферромагнитных объектов ограниченной протяженности с поверхностными дефектами сплошности конечных размеров произвольной формы с использованием метода пространственных интегральных уравнений. Разработанная методика численного моделирования магнитного поля объектов контроля сложной формы показала достаточно высокую объективность, в том числе и при анализе полей объектов ограниченной протяженности с поверхностными дефектами сплошности. Данная методика дает возможность изучить характер распределения магнитного поля объектов, имеющих поверхностные дефекты сплошности, с учетом их геометрических особенностей и магнитных свойств

материалов. Результаты моделирования могут быть использованы при проектировании более эффективных технических средств неразрушающего контроля магнитным методом, позволяющим повысить выявляемость поверхностных дефектов в ферромагнитных объектах, обладающих сложной геометрической конфигурацией.

Проведенный анализ показал, что в работах рассматривается характер изменения поля в зоне дефектов различной конфигурации, находящихся в объекте, намагниченном постоянным однородным полем. При этом не учитывается возможное его изменение по ширине и глубине несплошности.

В [47, 48] установлены закономерности изменения магнитного поля в зоне поверхностного дефекта в виде прямоугольной щели объекта, намагниченного *неподвижным* постоянным магнитом, обращенным к объекту гранью с одним полюсом, учитывающие изменение намагничивающего поля с увеличением глубины и расстояния от плоскости симметрии магнита до дефекта, позволившие объяснить вид сигнала, обусловленного дефектом, при магнитографическом контроле с использованием для считывания записи с магнитной ленты дефектоскопов с индукционными магнитными головками.

Показано, что расчетная сигналограмма несплошности «с дном» ферромагнитного объекта, смещенной относительно плоскости симметрии неподвижного магнита, обращенного к объекту гранью с одним полюсом, асимметричного вида и содержит два положительных и два отрицательных экстремума, а ее положительная часть имеет глубокий провал. Степень асимметрии сигнала зависит от расстояния дефекта до плоскости симметрии магнита и объясняется нахождением граней несплошности в поле разной напряженности и неравномерным распределением «магнитных зарядов» на поверхности объекта и дне дефекта. Неравномерность рас-

пределения «магнитных зарядов» на боковых стенках дефекта необходимо учитывать при глубине несплошности более 3 мм и ее расположении на расстоянии более 0,25 ширины полюса магнита. Экспериментальные сигналограммы качественно близки к расчетным только для несплошностей, ширина которых больше, чем в 2,5 раза превышает толщину сердечника индукционной головки дефектоскопа, что определяется разрешающей способностью прибора. Если несплошность имеет ширину меньше 2,5 мм, то характерный провал на сигналограмме отсутствует, а ее отрицательные экстремумы становятся много меньше по модулю положительного.

В результате проведенного анализа литературных источников выявлено, что основными моделями дефектов в теоретических исследованиях магнитных полей рассеяния, возникающих при намагничивании ферромагнитных объектов, являются двугранный угол, полукруговой и цилиндрический профили, полуэллипсоид и полушар, бесконечно вытянутые эллиптический и круговой цилиндры, трещина, две параллельные щели, клин, бесконечно длинный прямоугольный паз, наклонный поверхностный дефект в виде щели, модель «углубленных зарядов», модель бесконечно тонкого соленоида прямоугольного сечения, длина которого равна ширине дефекта, а высота – его глубине. Во всех приведенных случаях решалась прямая задача, когда по известным параметрам дефекта при известной напряженности поля, с определенными принятыми допущениями, определяли составляющие напряженности магнитного поля рассеяния дефекта или суперпозиции полей в его зоне. В ряде работ с использованием ЭВМ получены математические модели, которые количественно описывают поля рассеяния с учетом параметров дефектов и магнитных свойств контролируемого объекта, что позволило решить обратную задачу.

Задачи решались методом «магнитных зарядов» в предположении, что $\mu = \text{const}$; поле рассеяния поверхностных дефектов описывалось посредством интегральных уравнений, решаемых методом последовательных приближений; иногда учитывалась нелинейность ферромагнитной среды.

Недостатком всех приведенных расчетов является то, что плотность «поляризационных зарядов» на поверхностях дефектов остается неизвестной [8, 14, 16]. Многие расчеты [1, 3, 7] для напряженности поля рассеяния в точках непосредственно у углов выхода трещины на поверхность дают бесконечно большие величины, кроме того, ни один из них не учитывает нелинейность магнитных характеристик материала образца. Иными словами, не отражается тот факт, что вследствие нелинейного намагничивания материала «поляризационные заряды» возникают не только на гранях трещины, но и в объеме материала, причем объемные «магнитные заряды» играют существенную роль в создании поля рассеяния дефекта [7]. Недостатком рассмотренных выше моделей полей рассеяния дефектов [2, 5, 7, 11, 14, 18] является то, что они не учи-

тывают краевые эффекты, а принятый линейным закон распределения «поляризационных зарядов» приводит к значительному усложнению расчетных выводов [14]. Поэтому для таких моделей можно говорить только о качественном соответствии, так как плотность поверхностных «магнитных зарядов» не известна.

Положительным моментом является то, что полученные модели дают возможность для заданной глубины дефекта изучить характер распределения магнитного поля объектов, имеющих поверхностные и внутренние дефекты сплошности с учетом их геометрических особенностей, а в ряде случаев и магнитных свойств материалов, выбрать режим намагничивания, обеспечивающий наилучшую их выявляемость при тангенциальном и нормальном намагничивании объектов, обладающих сложной геометрической конфигурацией. Результаты моделирования могут быть использованы при проектировании более эффективных технических средств неразрушающего контроля магнитным методом, позволяющих повысить выявляемость дефектов в ферромагнитных объектах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аркадьев, В. К.** О развитии теоретических основ дефектоскопии / В. К. Аркадьев // Изв. АН СССР. Отдел техн. наук. – 1937. – № 2. – С. 233–240.
2. **Губанов, А. И.** Расчет магнитного поля двугранного угла / А. И. Губанов // Журнал технической физики. – 1940. – Т. 10, вып. 5. – С. 376–394.
3. **Большаков, П. Н.** Исследование магнитных полей от поверхностных неоднородностей при электромагнитной дефектоскопии : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.11. – Томск, 1949. – 100 с.
4. **Сапожников, А. Б.** Основы электромагнитной дефектоскопии металлических тел : дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.11. – Томск, 1951. – 645 с.
5. **Томилов, Г. С.** Исследование распределения индукции в массивных стальных изделиях при локальном намагничивании их при помощи приставных электромагнитов / Г. С. Томилов // Дефектоскопия. – 1966. – № 3. – С. 77–85.
6. **Сапожников, А. Б.** К расчету поляризации некоторых простейших включений в постоянном магнитном поле / А. Б. Сапожников, И. А. Новикова // Тр. СФТИ. Электромагнитные методы контроля, магнитное экранирование, электродинамика простейших сред. – Томск, 1970. – Вып. 52. – С. 129–132.
7. **Зацепин, Н. Н.** К расчету магнитоэстатического поля поверхностных дефектов. I. Топография полей моделей дефектов / Н. Н. Зацепин, В. Е. Щербинин // Дефектоскопия. – 1966. – № 5. – С. 50–58.
8. **Маринчук, М. Е.** Исследование магнитоэстатических полей некоторых моделей поверхностных дефектов / М. Е. Маринчук, Н. С. Саворовский // Дефектоскопия. – 1969. – № 6. – С. 63–68.
9. **Förster, F.** Principi teorici e sperimentali del controllo non distruttivo con rivelazione del flusso disperse / F. Förster // La Metallurgia Italiana. – 1972. – № 4. – P. 137–147.

10. **Förster, F.** Computer-controlled magnetic leakage field research Installation-examples and possibilities / F. Förster // 10-th World Conference on nondestructive testing. – 1982. – Vol. 1. – P. 172–186.
11. **Ферстер, Ф.** Неразрушающий контроль методом магнитных полей рассеяния. Теоретические и экспериментальные основы выявления поверхностных дефектов конечной и бесконечной глубины / Ф. Ферстер // Дефектоскопия. – 1982. – № 11. – С. 3–25.
12. **Куликов, В. Н.** Исследование магнитоэлектрических полей в зоне точечного сварного соединения / В. Н. Куликов // Дефектоскопия. – 1981. – № 8. – С. 39–47.
13. **Куликов, В. Н.** Исследование и разработка способа оценки качества и прочности точечных сварных соединений на базе магнитографического метода контроля : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.04.05 / В. Н. Куликов ; МВТУ им. Н. Э. Баумана. – М., 1979. – 17 с.
14. **Щербинин, В. Е.** Влияние протяженности дефекта на величину его магнитного поля / В. Е. Щербинин, А. И. Пашагин // Дефектоскопия. – 1972. – № 4. – С. 74–82.
15. **Новикова, И. А.** Цилиндрическая индукционная катушка прямоугольного сечения в сильно неоднородном постоянном магнитном поле / И. А. Новикова // Докл. XX науч.-техн. конф. по радиоэлектронике, посвященной 50-летию образования СССР. – Томск : Томск. ун-т, 1974. – С. 66–76.
16. **Щербинин, В. Е.** Об объемной поляризации трещины / В. Е. Щербинин, А. И. Пашагин // Дефектоскопия. – 1974. – № 4. – С. 106–110.
17. **Новикова, И. А.** Исследование полей искусственных открытых дефектов / И. А. Новикова, Н. В. Мирошин // Дефектоскопия. – 1973. – № 4. – С. 95–101.
18. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий : справочник / Под ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1976. – Кн. 1–2.
19. **Кифер, И. И.** Магнитные методы дефектоскопии / И. И. Кифер, Н. Н. Зацепин // Дефектоскопия. – 1969. – № 5. – С. 76–82.
20. **Lord, W.** Defect characterization from magnetic leakage fields / W. Lord, I. H. Hwang // Brit. J. NDT. – 1977. – № 1. – P. 14–18.
21. Residual and active leakage fields around defects in ferromagnetic materials / W. Lord [et al.] // Mater. Evaluation. – 1978. – № 7. – P. 47–54.
22. **Förster, F.** Neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der zerstörungsfreien Prüfung mit magnetischem Streufluss / F. Förster // 3 European Conference on Nondestructive Testing, Florence, 15–18 October. – 1984. – P. 287–303.
23. **Янус, Р. И.** Задачи по магнитной дефектоскопии / Р. И. Янус // Тр. ИФМ АН СССР. – Свердловск, 1979. – С. 54–57.
24. **Семенов, В. С.** Постоянное магнитное поле тел прямоугольного сечения, намагничиваемых источниками различных типов без учета взаимодействия поверхностных магнитных зарядов / В. С. Семенов, О. К. Радугин // Тр. СФТИ. Электромагнитные методы контроля, магнитное экранирование, электродинамика простейших сред. – Томск : Томск. ун-т, 1970. – Вып. 52. – С. 81–91.
25. **Мохова, Е. Н.** Прямоугольная призма постоянной восприимчивости в однородном магнитном поле / Е. Н. Мохова // Изв. АН СССР. Серия геофизическая. – 1958. – № 3. – С. 387–390.
26. **Щербинин, В. Е.** Плотность поверхностных зарядов на границах дефектов типа трещин / В. Е. Щербинин, А. И. Пашагин // Магнитные методы неразрушающего контроля : сб. ст. – Свердловск : ЦНУ АН СССР, 1979. – С. 54–57.
27. **Новикова, И. А.** Исследование полей поверхностных дефектов полуэллиптического и полукругового профилей по методу постоянного магнитного поля / И. А. Новикова, А. Б. Сапожников // Электромагнитные методы измерения, контроля и исследования свойств материалов. – Томск : Томск. ун-т, 1982. – С. 159–170.
28. **Bainton, K. F.** Characterizing defects by determining magnetic leakage fields / K. F. Bainton // Non-Destructive Testing International. – 1977. – Vol. 10, № 5. – P. 253–257.
29. **Dobmann, G.** New set-ups for mathematical-numerical solutions of magnetic leakage-flux testing with DS- and AC-mode in the FRG / G. Dobmann, G. Walle // 10-th World Conference on nondestructive testing. – 1982. – Vol. 2. – P. 148–155.
30. **Гринберг, Г. А.** Некоторые специальные методы решения электростатических и магнитоэлектрических задач / Г. А. Гринберг // Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. – М. ; Л. : АН СССР, 1949. – С. 255–320.
31. **Гусев, А. П.** Магнитное поле дефекта при нормальном намагничивании / А. П. Гусев, Н. Н. Зацепин // Вес. АНБ. – 1982. – № 3. – С. 102–107.
32. Об одном подходе к оценке параметров дефектов в реальном времени при наличии случайных возмущений / И. А. Новикова [и др.] // Дефектоскопия. – 1983. – № 6. – С. 47–52.
33. **Новикова, И. А.** Математическая модель, количественно описывающая магнитоэлектрические поля поверхностных дефектов, и ее применение в задачах дефектометрии / И. А. Новикова // Дефектоскопия. – 1986. – № 2. – С. 37–45.

34. **Шур, М. Л.** Расчет поля поверхностного дефекта в нелинейной ферромагнитной среде / М. Л. Шур, Р. В. Загидулин, В. Е. Щербинин // Дефектоскопия. – 1987. – № 2. – С. 3–9.
35. **Мужицкий, В. Ф.** Модель поверхностного дефекта и расчет топографии его магнитостатического поля / В. Ф. Мужичкий // Дефектоскопия. – 1987. – № 3. – С. 24–29.
36. **Мужицкий, В. Ф.** К расчету магнитостатических полей рассеяния от поверхностных дефектов конечной глубины / В. Ф. Мужичкий // Дефектоскопия. – 1987. – № 7. – С. 8–13.
37. **Шур, М. Л.** Теоретические вопросы формирования поля поверхностного дефекта / М. Л. Шур, Р. В. Загидулин, В. Е. Щербинин // Дефектоскопия. – 1988. – № 3. – С. 14–25.
38. **Мужицкий, В. Ф.** Модель поверхностного дефекта при нормальном намагничивании и расчет топографии его магнитостатического поля / В. Ф. Мужичкий // Дефектоскопия. – 1988. – № 7. – С. 3–7.
39. **Шур, М. Л.** Самосогласованный расчет магнитостатического поля поверхностного дефекта / М. Л. Шур, Р. В. Загидулин, В. Е. Щербинин // Дефектоскопия. – 1988. – № 10. – С. 3–13.
40. **Гусев, А. П.** Магнитное поле поверхностного дефекта при намагничивании ферромагнетика неоднородным полем магнитов / А. П. Гусев, П. Н. Поярков // Дефектоскопия. – 1992. – № 11. – С. 71–75.
41. **Пашагин, А. И.** Магнитное поле дефекта, наклонного к поверхности изделия / А. И. Пашагин, Н. В. Яковлева // Дефектоскопия. – 1994. – № 5. – С. 53–58.
42. **Загидулин, Р. В.** Трехмерная модель дефекта сплошности конечной протяженности в ферромагнитной пластине / Р. В. Загидулин, В. Ф. Мужичкий // Дефектоскопия. – 2002. – № 11. – С. 17–25.
43. **Мужицкий, В. Ф.** Магнитное поле короткого дефекта типа прямоугольной щели / В. Ф. Мужичкий, В. Е. Щербинин // Дефектоскопия. – 2006. – № 2. – С. 58–63.
44. **Загидулин, Р. В.** Динамическая модель дефекта сплошности при нормальном намагничивании ферромагнитного изделия I. Магнитостатическое поле дефекта сплошности конечной протяженности / Р. В. Загидулин, В. Ф. Мужичкий, Д. А. Исаев // Дефектоскопия. – 2006. – № 10. – С. 17–23.
45. **Загидулин, Р. В.** Динамическая модель дефекта сплошности при нормальном намагничивании ферромагнитного изделия II. Магнитное поле дефекта сплошности при намагничивании изделия намагничивающим устройством конечных размеров / Р. В. Загидулин, В. Ф. Мужичкий, Д. А. Исаев // Дефектоскопия. – 2006. – № 11. – С. 17–23.
46. **Гальченко, В. Я.** Компьютерный анализ конфигурации магнитных полей поверхностных дефектов сплошности конечных размеров в ферромагнитной пластине ограниченной протяженности методом пространственных интегральных уравнений / В. Я. Гальченко, Д. Л. Остапушенко, М. А. Воробьев // Дефектоскопия. – 2009. – № 3. – С. 56–65.
47. Исследование распределения напряженности магнитного поля у поверхности ферромагнитного объекта, намагничиваемого перемещаемым постоянным магнитом / В. А. Новиков [и др.] // Вестн. МГТУ. – 2004. – № 2. – С. 81–84.
48. **Новиков, В. А.** Магнитное поле в зоне поверхностного дефекта объекта, намагниченного стационарным малогабаритным магнитом / В. А. Новиков, Г. И. Скрыбина, А. В. Кушнер // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2010. – № 4. – С. 159–165.

Статья сдана в редакцию 12 ноября 2013 года

Андрей Валерьевич Кушнер, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0298-45-85-76.

Владимир Алексеевич Новиков, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. E-mail: novikovva@tut.by.

Andrei Valeryevich Kushner, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: 8-0298-45-85-76.

Vladimir Alekseyevich Novikov, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: novikovva@tut.by.