

На правах рукописи

ВАСИЛЕНКО Ольга Николаевна

**Методы и средства многопараметровой магнитной
структуроскопии изделий с использованием составных
разомкнутых магнитных цепей**

01.04.11 – физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ
диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург - 2014

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового Красного Знамени Институте физики металлов Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург

Научный руководитель – Костин Владимир Николаевич,
доктор технических наук, доцент,
главный научный сотрудник
Института физики металлов УрО РАН

Официальные оппоненты: Гуревич Сергей Юрьевич,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Общей и
экспериментальной физики» Южно-
Уральского государственного университета

Задворкин Сергей Михайлович,
кандидат физико-математических наук,
заведующий лабораторией технической
диагностики Института машиноведения
УрО РАН

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Тюменский государственный нефтегазовый
университет»

Защита состоится 30 мая 2014 г. в 11 часов 00 минут
на заседании диссертационного совета Д 004.003.01 при ФГБУН Ордена Тру-
дового Красного Знамени Институте физики металлов УрО РАН по адресу:
620990, г. Екатеринбург, ул. С.Ковалевской, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики метал-
лов УрО РАН и на сайте imr.uran.ru.

Автореферат разослан « » апреля 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Лошкарева Наталья Николаевна,

© Институт физики металлов УрО РАН, 2014 г.

© Василенко О.Н., 2014 г

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время магнитные измерения применяются как для определения непосредственно магнитных свойств материалов, так и для суждения по величине этих свойств о структурно-фазовом состоянии, внутренних и приложенных напряжениях, наличии различного рода дефектов и других важных технологических характеристиках изделий.

Магнитные методы структурно-фазового анализа достаточно давно и широко применяются в промышленности. Дальнейшее их развитие, очевидно, может идти в двух направлениях. Первое – поиск новых параметров контроля, разработка новых методик и измерительных преобразователей, позволяющих измерять физические характеристики, являющиеся параметрами контроля. Второе направление, значительно расширяющее диапазон применения физических методов неразрушающего контроля, - использование одновременно нескольких физических характеристик в качестве параметров контроля. Многопараметровые методы контроля обеспечивают высокую информативность и достоверность оценки состояния материалов [1-3]. Однако для их реализации требуются устройства, позволяющие с достаточной для практики точностью определять необходимый комплекс параметров контроля и, по возможности, обладающие мобильностью, простотой и удобством измерений, возможностью оцифровки, компьютерной обработки и сохранения результатов измерений.

Специфика магнитного вида неразрушающего контроля заключается в сложности измерений и интерпретации результатов [1, 4-6]. Необходимо, как правило, определять магнитные характеристики не тела, а вещества контролируемых изделий. В открытой цепи это возможно только для тел малых размеров и простой формы. Для крупногабаритных изделий и изделий сложной формы определение магнитных свойств вещества возможно только с использованием приставных преобразователей, т.е. составных магнитных цепей, что требует решения весьма специфических задач по определению истинных значений поля и намагниченности в контролируемом участке изделия.

Для правильного выбора конструкции и размеров намагничивающих устройств, а также для определения оптимальных мест расположения первичных измерительных преобразователей необходимы детальные сведения о пространственном распределении поля и потока внутри контролируемых объектов различных типоразмеров, а также над поверхностью таких объектов в зоне контроля.

Обычно проведение магнитных измерений затруднено из-за загрязнения поверхности изделий, значительной шероховатости поверхности, а также наличия немагнитных покрытий на объектах контроля. Появление зазора в

составной замкнутой магнитной цепи в связи с указанными причинами вносит существенные погрешности в результаты измерений магнитных свойств вещества. Таким образом, особенно актуально получение в результате работы новых методик и средств локального и бесконтактного определения магнитных свойств вещества, по которым можно будет судить о физико-механических характеристиках контролируемых объектов.

Степень разработанности темы исследования. До проведения диссертационных исследований было недостаточно сведений о распределении магнитных полей и потоков внутри и над поверхностью намагничиваемых приставными электромагнитами массивных ферромагнитных объектов. В рамках настоящего исследования такие сведения были получены путем численного моделирования и сопоставления их результатов с экспериментальными данными. Эти сведения послужили основой для конструирования приставного преобразователя, обеспечивающего необходимое намагничивание зоны контроля, а также разработки новых многопараметровых способов и аппаратно-программных средств локального измерения магнитных свойств вещества при наличии зазора в магнитной цепи и с учетом влияния формы и размеров объектов контроля на результаты измерений.

Цели и задачи. Целью настоящей работы является разработка новых способов и средств локального и бесконтактного измерения двух наиболее информативных параметров магнитной структуроскопии - коэрцитивной силы и индукции коэрцитивного возврата.

Для достижения поставленной цели в работе решались задачи:

1. Теоретическое и экспериментальное исследование пространственного распределения поля и потока внутри и над поверхностью имеющих различные геометрические размеры и магнитные свойства ферромагнитных объектов, которые контактно или бесконтактно намагничиваются приставными электромагнитами различных типоразмеров.

2. Усовершенствование конструкции приставных электромагнитов для обеспечения необходимого для измерения магнитных свойств вещества намагничивания ферромагнитных объектов.

3. Разработка способов и аппаратно-программных средств локального и бесконтактного измерения комплекса магнитных параметров, характеризующих функциональные свойства изделий и объектов.

Научная новизна полученных в диссертации результатов может быть сформулирована в виде следующих положений:

1. Показано, что применяемые в настоящее время П-образные электромагниты с межполюсным расстоянием, значительно превышающим толщину их полюсов, намагничивают межполюсную зону массивных испытуемых объектов недостаточно эффективно, при этом измеряемая по размагничива-

ющему току коэрцитивная сила в основном определяется свойствами тех объемов контролируемого объекта, которые находятся под полюсами и в непосредственной близости от них.

2. Появление и рост зазора в составной магнитной цепи, образуемой П-образным электромагнитом и объектом, приводит к существенному изменению информативных объемов и дополнительному снижению чувствительности к магнитным неоднородностям в середине межполюсной зоны.

3. Определено, что необходимая для измерения магнитных свойств вещества плотность тангенциальной составляющей магнитного потока в межполюсной зоне объекта наиболее эффективно может быть достигнута путем уменьшения межполюсного расстояния используемых электромагнитов с помощью встречно направленных наконечников.

4. Установлено, что для различных типов приставных электромагнитов уменьшение влияния зазора в составной магнитной цепи «преобразователь-объект» на результаты локального измерения коэрцитивной силы и индукции коэрцитивного возврата может быть достигнуто путем дополнительного измерения максимального магнитного потока.

5. Установлено, что для уменьшения влияния формы массивных контролируемых объектов на результаты локального измерения коэрцитивной силы и индукции коэрцитивного возврата может быть достигнуто путем дополнительного измерения остающейся после выключения намагничивающего тока тангенциальной составляющей магнитного поля вблизи поверхности объекта в составной цепи “электромагнит-объект”.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные в работе результаты моделирования пространственного распределения магнитных поля и потока в массивных объектах, намагничиваемых приставными электромагнитами, расширяют представления о характере локального намагничивания ферромагнетиков различных форм и размеров.

Рекомендованные требования к приставным электромагнитам могут быть использованы при конструировании новых измерительных преобразователей для коэрцитиметров и магнитных структуроскопов.

Разработанные способы локального и бесконтактного измерения коэрцитивной силы и индукции коэрцитивного возврата, характеризующих функциональные свойства объектов, являются основой нового метода многопараметровой магнитной структуроскопии изделий.

Получен патент на способ локального измерения коэрцитивной силы ферромагнитных объектов.

Методология и методы исследования. При выборе необходимых параметров контроля использовалась методология магнитного структурно-фазового анализа с ориентацией на преимущественное использование маг-

нитных свойств веществ. При исследовании особенностей локального намагничивания массивных объектов и разработке методов и средств измерений была использована методология цифрового моделирования пространственного распределения магнитных полей и потоков внутри и вблизи поверхности намагничиваемых объектов. Экспериментальные исследования выполнялись с использованием цифровых технологий управления измерениями, сбора и анализа экспериментальных данных.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту:

1. Количественные данные о пространственном распределении магнитных полей и потоков внутри и вблизи поверхности локально намагничиваемых приставными электромагнитами массивных ферромагнитных объектов различных размеров и формы.

2. Результаты исследований влияния немагнитного зазора в составной магнитной цепи и формы контролируемых массивных объектов на результаты измерений магнитных параметров контроля.

3. Рекомендации по созданию намагничивающих устройств, обладающих пониженным пространственным рассеянием потока и обеспечивающих уровень намагничивания зоны контроля, достаточный для измерения магнитных свойств вещества.

4. Способы уменьшения влияния зазора в составной магнитной цепи и типоразмеров контролируемых объектов путем учета дополнительно измеряемых магнитных параметров.

5. Аппаратно-программные средства локального и бесконтактного измерения коэрцитивной силы и магнитной индукции коэрцитивного возврата.

Личный вклад автора. Постановка задач проводилась автором совместно с научным руководителем. Автором проведено компьютерное моделирование пространственного распределения магнитных полей и магнитного потока внутри и около поверхности массивных ферромагнитных объектов различных типоразмеров, намагничиваемых приставными электромагнитами. Василенко О.Н. проведены экспериментальные исследования влияния неоднородности намагничивания пластин приставным электромагнитом на результаты измерения магнитных параметров контроля. Автором получены экспериментальные данные, выполнена статистическая обработка, проведён анализ полученных данных с целью разработки нового способа локального измерения магнитных свойств при наличии зазора в магнитной цепи. Результаты исследований неоднократно докладывались диссертантом на всероссийских и международных конференциях. Вместе с руководителем автор принимала участие в обсуждении результатов исследований, написании статей по выполненной работе и написании заявки на патент РФ на изобретение.

Степень достоверности. Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается их устойчивой воспроизводимостью, использованием аттестованных измерительных приборов и экспериментальных установок, аттестованных методик измерений и методов обработки экспериментальных данных. Достоверность также подтверждается согласованностью промежуточных результатов с результатами других авторов. Выводы, сделанные в диссертации, логически следуют из результатов модельных и экспериментальных исследований и не противоречат современным научным представлениям.

Апробация результатов. Материалы диссертации были представлены на следующих конференциях и семинарах: V Всероссийской конференции «Механика микронеоднородных материалов и разрушение» (г. Екатеринбург, 2008 г.), IX, X, XII и XIV Всероссийских школах-семинарах по проблемам физики конденсированного состояния вещества (г. Екатеринбург, 2008 г., 2009 г., 2011 г., 2013 г.), XXIV, XXV Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля» (г. Екатеринбург, 2009 г., 2011 г.), пятнадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (г. Кемерово-Томск, 2009 г.), XIX Всероссийской конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике (г. Самара, 2011 г.), XXVII Международная конференция „Дефектоскопия 2012” (г. Созополь, Болгария, 2012 г.), V Байкальской международной конференции "Магнитные материалы. Новые технологии" (г. Иркутск, 2012 г.), 4-й международной научно-технической конференции “Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов” (г. Могилев, Республика Беларусь, 2012 г.), 7-й национальной научно-технической конференции “Неразрушающий контроль и техническая диагностика - UkrNDT-2012” (г. Киев, Украина, 2012 г.), XXVIII Международная конференция „Дефектоскопия 2013” (г. Созополь, Болгария, 2013 г.).

Диссертационная работа выполнена в лаборатории комплексных методов контроля ИФМ УрО РАН в рамках: плановой темы РАН (шифр «ДИАГНОСТИКА», номер государственной регистрации 01201064334), Программ фундаментальных исследований Президиума РАН «Анализ, моделирование и экспериментальное исследование топологии магнитных и акустических полей в ферромагнитных объектах» (проект № 09-П-2-1001) и «Математическое и физическое моделирование неоднородных электромагнитных полей и разработка многоцелевых программно-аппаратных систем контроля с использованием бесконтактных методов измерений» (проект № 12-П-2-1031), Программы Президента РФ государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук «Разработка метода контроля стадии предразрушения стальных конструкций по магнитным и акустическим параметрам» (про-

ект № МК-27162010.8), Проекта РФФИ № 12-08-33098 мол_a_вед «Моделирование и экспериментальное исследование взаимосвязи инициированных деформацией изменений структуры, прочностных, магнитных и акустических свойств стальных объектов», Программы ориентированных фундаментальных исследований УрО РАН «Влияние упругих и пластических деформаций на электромагнитные свойства трубных сталей, методика и аппаратура для обнаружения опасных напряжений и дефектов в трубах» (проект № 11-2-02-СГ), Региональной целевой программы развития вычислительных, телекоммуникационных и информационных ресурсов УрО РАН «Моделирование в среде ANSYS намагничивающих и измерительных систем локальной диагностики ферромагнитных объектов» (проект № РЦП-13-П2).

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в 4 научных статьях в журналах из перечня ВАК РФ и WoS, 1 статье в монографии, 1 патенте на изобретение, 7 статьях в сборниках трудов конференций, 10 тезисах докладов.

Соответствие диссертации Паспорту научной специальности. Содержание диссертации соответствует пункту 5 «Разработка различных магнитных материалов, технологических приемов, направленных на улучшение их характеристик, приборов и устройств, основанных на использовании магнитных явлений и материалов» паспорта специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы, состоящего из 159 наименований, и трех приложений. Общий объем диссертации составляет 131 страницу, в том числе 54 рисунка и 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы её цель и задачи, приведены основные положения, выносимые на защиту, и показана научная новизна, научная и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе приводится краткий обзор существующих методов и средств локального измерения магнитных свойств ферромагнитных объектов. Рассмотрены основы магнитного структурно-фазового анализа ферромагнитных материалов, магнитные параметры неразрушающего контроля и различие структурной чувствительности магнитных свойств вещества и тела. Проанализированы существующие способы и средства локального измерения магнитных свойств вещества массивных ферромагнитных объектов. Рассмотрено влияние на результаты магнитных измерений таких мешающих факторов, как немагнитный зазор в составной цепи “преобразователь-объект” и изменение формы и размеров объектов контроля. Описаны теоретические и экспериментальные методы исследования и оптимизации составных магнитных цепей.

Вторая глава посвящена описанию методики компьютерного моделирования в программах Ansys и Femm, заключающегося в численном решении системы уравнений Максвелла при заданных граничных условиях методом конечных элементов, и объектов модельного исследования (составных магнитных цепей). В главе 2 также приведены методики измерения магнитных свойств вещества баллистическим методом при помощи пермеметра (ГОСТ 8.377-80). Описаны способы и устройства (СИМТЕСТ и КИФМ-1М) локального определения относительных значений магнитных свойств вещества с использованием приставных преобразователей. Приведены сведения о размерах, химическом составе, термической обработке и физических свойствах экспериментально исследуемых образцов. Представлено описание статистической обработки экспериментальных данных методом множественной линейной регрессии и используемой для этого программы.

В третьей главе представлены результаты численного моделирования и экспериментального исследования топографии полей и потоков в локально намагничиваемых ферромагнитных объектах. Правильность выбора параметров и граничных условий при моделировании первоначально была проверена путем сопоставления рассчитанных и известных экспериментальных [7] результатов при одинаковых размерах и свойствах элементов цепи «электромагнит-изделие».

Типичное пространственное распределение плотности магнитного потока (т.е. индукции) в массивной ферромагнитной плите, намагничиваемой П-образным электромагнитом, иллюстрируется рисунком 1. Здесь представлено распределение индукции в продольном сечении плиты из стали 3 с шириной

$L_z=112$ мм, а также электромагнита из динамной стали ($H_c=50$ А/м) с размерами полюсов $l_z = 28$ мм, $l_x = 25$ мм и расстоянием между центрами полюсов $X_0=100$ мм при магнитодвижущей силе (МДС) равной 1800 ампервитков.

Анализ результатов моделирования показал, что намагниченный объем плиты представляет собой половину разрезанного вдоль длинной оси и перетянутого у нейтральной плоскости эллипсоида вращения. При этом основная часть межполюсного пространства намагничивается крайне слабо вследствие бокового рассеяния и заглупления магнитного потока. Для объектов с различными размерами и свойствами, намагничиваемых широко распространенными электромагнитами с межполюсным расстоянием 50 мм и сечением полюсов 10x28 мм, плотность магнитного потока в межполюсной зоне в 2-5 раз меньше, чем в околополюсной зоне.

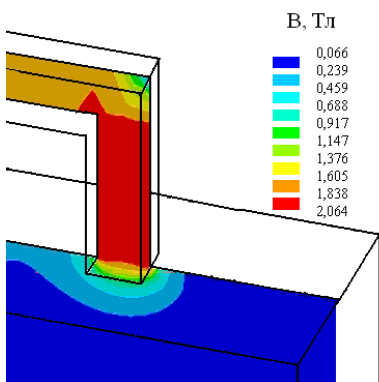


Рисунок 1 – Плотность магнитного потока в продольном сечении электромагнита и плиты из стали 3

оказывает существенного влияния на пространственное распределение потока. Из полученных результатов следует, что наиболее эффективным способом уменьшения бокового рассеяния, а, значит, увеличения плотности потока в намагничиваемом объекте, является уменьшение межполюсного расстояния.

Возможность сближения полюсов П-образного электромагнита ограничивается толщиной намагничивающих катушек, создающих необходимую магнитодвижущую силу. Преодолеть это ограничение можно путем уменьшения эффективного межполюсного расстояния при использовании встречно направленных фигурных наконечников на полюсах электромагнита. Для проверки эффективности этого предложения было проведено 3D-моделирование потока, создаваемого в массивной плите из динамной стали шириной 112 мм электромагнитом с полюсами 10x28 мм и различными типами наконечников

Для количественного определения бокового рассеяния была определена процентная доля магнитного потока, выходящего за профиль полюсов электромагнита в различных секущих плоскостях, от величины потока в магнитопроводе. Анализ данных показал, что боковое растекание магнитного потока весьма существенно во всех секущих плоскостях, однако в межполюсном пространстве доля бокового рассеяния превышает 50 % даже для сравнительно узкой пластины толщиной 56 мм. При этом изменение магнитных свойств намагничиваемых пластин не

(МДС=1800 ампер-витков). На рисунке 2 представлены зависимости тангенциальных составляющих поля и индукции от глубины объекта в нейтральном сечении и распределения индукции в среднем продольном сечении для двух значений межполюсного расстояния в 50 мм (а, б, в) и 35 мм (г, д, е) и трех основных типов наконечников: прямого (а, г), стопообразного (б, д) и косого (в, е). Фигурные наконечники уменьшали минимальное расстояние между полюсами до 25 мм и 5 мм соответственно.

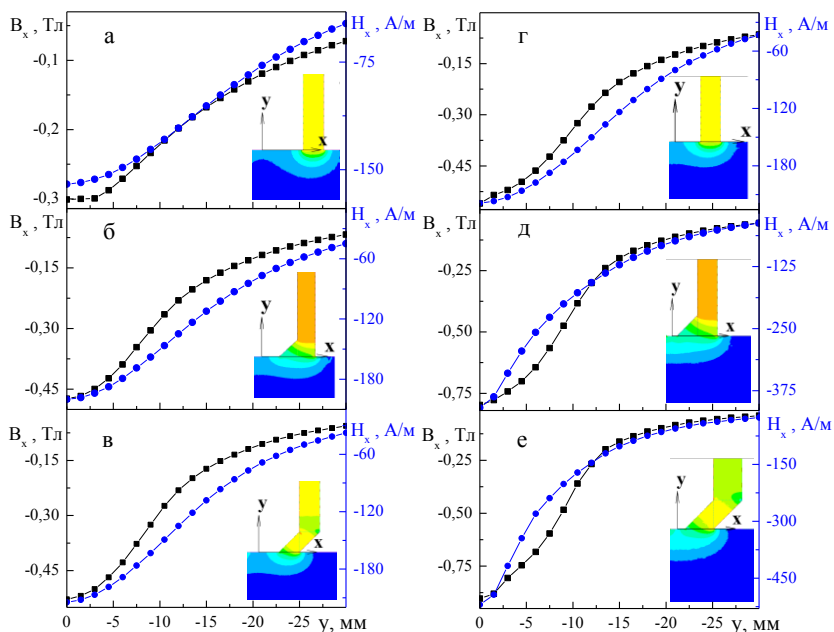


Рисунок 2 – Зависимости тангенциальных составляющих поля и индукции от глубины в нейтральном сечении для электромагнитов с $X_0 = 50$ мм (а, б, в) и $X_0 = 35$ мм (г, д, е) при использовании различных полюсных наконечников

Сравнение рисунков 2а-2в показывает, что применение фигурных наконечников для наиболее распространенного электромагнита с $X_0 = 50$ мм позволяет в 1,5 раза увеличить плотность магнитного потока в межполюсной области массивного объекта. Аналогичный результат получается и для электромагнита с межполюсным расстоянием в 35 мм. Одновременное уменьшение межполюсного расстояния с 50 до 35 мм и использование “косых” наконечников увеличивает тангенциальные составляющие поля и плотности потока в нейтральной плоскости объекта почти в 3 раза.

Для определения возможности измерения внутреннего поля в контролируемых объектах при наличии зазора в составной цепи были рассчитаны зна-

чения магнитного поля в межполюсном пространстве над поверхностью ферромагнетиков. Установлено, что удаление датчика от поверхности объекта на 0,5 мм, 1,5 мм и 4 мм оказывает аддитивное влияние на величину измеряемого над поверхностью объектов поля. Это означает, что при бесконтактном датчик внутреннего поля может находиться в межполюсном пространстве на достаточно большом удалении от поверхности объекта. Результаты моделирования были подтверждены экспериментально.

В четвертой главе приведены результаты теоретического и экспериментального исследования контактного и бесконтактного намагничивания массивных ферромагнитных объектов.

Локальное полюсное намагничивание приводит к неоднородному распределению поля и потока в контролируемом объекте. Наличие немагнитного (воздух, краска и т.д.) зазора в составной магнитной цепи “преобразователь-объект” оказывает существенное влияние на пространственное распределение полей и потоков и, как следствие, на результаты локального измерения магнитных свойств. На рисунке 3 представлено пространственное распределение плотности магнитного потока в продольном сечении массивной плиты, намагничиваемой П-образным электромагнитом с межполюсным расстоянием 50 мм (рисунки 3а, 3б) и 35 мм (рисунки 3в, 3г) контактно (а, в) и при наличии между полюсами и плитой зазора $d = 1$ мм (б, г). Как видно из рисунка 3а, даже без зазора центр межполюсного пространства намагничивается значительно слабее, чем околополюсное и подполюсное пространство ферромагнитного объекта. Появление зазора в 1 мм приводит к тому, что общий магнитный поток в цепи “преобразователь-объект” падает почти в 2 раза. Кроме того, при этом зазоре межполюсное пространство объекта практически не намагничивается, и П-образный электромагнит действует как два отдельных однополюсных электромагнита.

При контактном намагничивании уменьшение межполюсного расстояния от 50 до 35 мм (смотри рисунки 3а и 3в) повышает плотность магнитного потока в центре межполюсного пространства от 0,3 Тл до 0,55 Тл (почти двукратное увеличение). При этом тангенциальная составляющая магнитного поля в центре межполюсной области объекта (т.е. внутреннее поле) возрастает от 1,6 А/см ($X_0 = 50$ мм) до 2,14 А/см ($X_0 = 35$ мм), т.е. более, чем на 30 %. Уменьшение межполюсного расстояния также снижает влияние зазора на характер намагничивания (рисунки 3б и 3г): при зазоре в 1 мм и межполюсном расстоянии $X_0 = 50$ мм плотность магнитного потока в поверхностном слое объекта под центром межполюсного пространства составляет 0,21 Тл, а при $X_0 = 35$ мм – плотность потока равна 0,41 Тл. Рассмотренные варианты межполюсного расстояния отличаются тем, что в случае $X_0 = 50$ мм межполюсное расстояние существенно превышает ширину ($Y_0 = 28$ мм) полюсов

электромагнита, а во втором случае $X_0 < Y_0$.

Пространственное распределение поля и потока меняется при изменении толщины намагничиваемых пластин (при неизменной их ширине). При уменьшении толщины (а значит и поперечного сечения) плотность магнитного потока в межполюсной области пластины возрастает и характер изменения

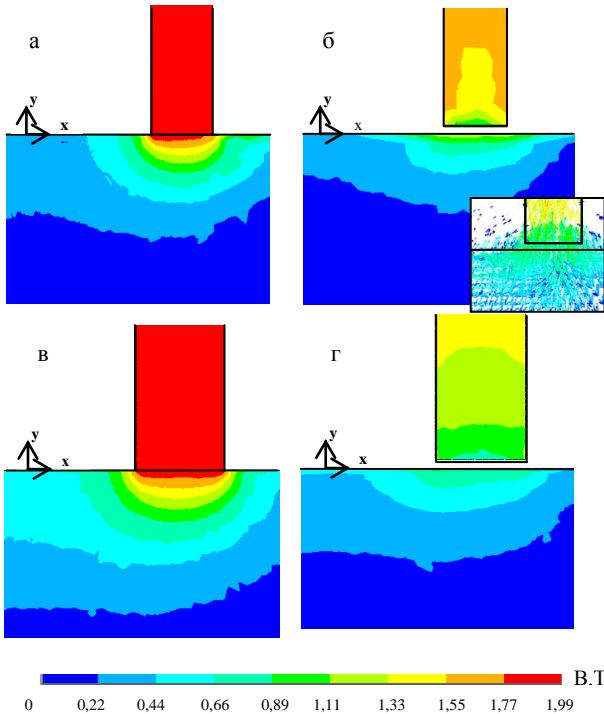


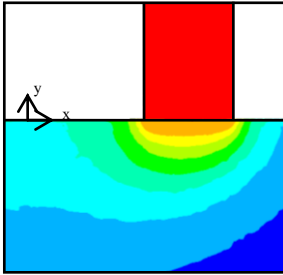
Рисунок 3 – Магнитная индукция (плотность магнитного потока) в массивной плите из динамной стали с размерами 300x230x84 мм, намагничиваемой электромагнитом с сечением полюсов 10x28 мм и межполюсным расстоянием 50 мм (а, б) и 35мм(в, г), при нулевом зазоре между полюсами (а, в) электромагнита и объектом и зазоре 1 мм (б, г)

плотности потока зависит от магнитных свойств намагничиваемых пластин. На рисунке 4 представлено распределение плотности магнитного потока в продольном сечении массивных плит и пластин с различными магнитными свойствами. Увеличение коэрцитивной силы затрудняет намагничивание околополюсной и межполюсной зоны как достаточно толстых намагничиваемых объектов (плита, рисунки 4а, 4в), так и пластин (рисунки 4б, 4г). Плотность магнитного потока в поверхностной зоне плит в центре межполюсного пространства уменьшается на 18 %, а плотность потока уменьшается на 8 % при увеличении коэрцитивной силы в 10 раз. Меньшая плотность потока в поверхностной зоне плит связана, очевидно, с распространением магнитного потока на большую в сравнении с пластиной той же ширины площадь поперечного сечения намагничиваемого объекта.

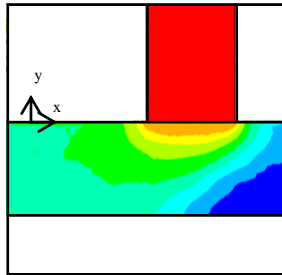
плотности потока зависит от магнитных свойств намагничиваемых пластин.

На рисунке 4 представлено распределение плотности магнитного потока в продольном сечении массивных плит и пластин с различными магнитными свойствами. Увеличение коэрцитивной силы затрудняет намагничивание околополюсной и межполюсной зоны как достаточно толстых намагничиваемых объектов (плита, рисунки 4а, 4в), так и пластин (рисунки 4б, 4г). Плотность магнитного потока в поверхностной

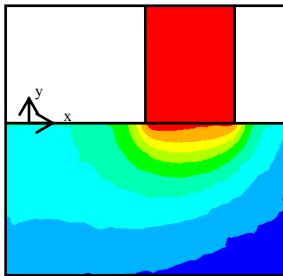
а) плита с $H_c = 3$ А/см



б) пластина с $H_c = 3$ А/см



в) плита с $H_c = 14$ А/см



г) пластина с $H_c = 14$ А/см

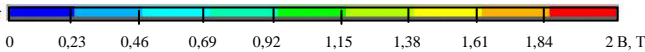
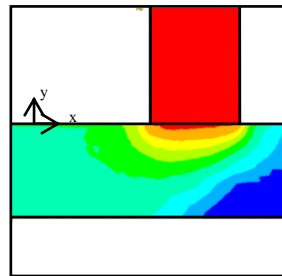


Рисунок 4 - Плотность магнитного потока в продольном сечении намагничиваемых П-образным электромагнитом с межполюсным расстоянием 35 мм массивных плит с размерами 300x230x82 (а, в) и пластин с размерами 300x12x84 (б, г), имеющих различные магнитные свойства

увеличению зазора в цепи и вариации свойств и положения ферромагнитных накладок, помещаемых на намагничиваемую пластину с размерами 2x40x90 мм и $H_c = 4,2$ А/см в центре межполюсного пространства (конфигурация 1) или вблизи одного из полюсов (конфигурация 2). Как видно из рисунка 5, увеличение зазора оказывает неодинаковое влияние на показания коэрцитиметра при различных положениях накладок. При конфигурации 1 увеличение зазора уменьшает не только соответствующие показания коэрцитиметра I_{Hc}^1 , но и прирост показаний $\Delta I_{Hc} = I_{Hc}^1 - I_{Hc}^0$, обусловленный помещением на пластину “магнитотвердых” накладок (рисунок 5а). Для накладки 1 прирост показаний при увеличении зазора до 0,5 мм уменьшается от 4 мА до 2,3 мА (на 43 %), а для накладки 2 - от 6,5 мА до 3,8 мА (на 42 %). При конфигурации 2 показания коэрцитиметра значительно слабее зависят от величины зазора. Абсолютные значения показаний I_{Hc}^2 для накладки 1 уменьшаются от 27,5

Для подтверждения результатов моделирования было проведено экспериментальное исследование влияния магнитных неоднородностей в межполюсном пространстве на результаты контактного и бесконтактного измерения коэрцитивной силы с помощью стандартного коэрцитиметра КИФМ-1М. На рисунке 5 представлены зависимости приращений показаний коэрцитиметра при увеличении зазора в цепи и вариации свойств и положения ферромагнитных накладок, помещаемых на намагничиваемую пластину с размерами 2x40x90 мм и $H_c = 4,2$ А/см в центре межполюсного пространства (конфигурация 1) или вблизи одного из полюсов (конфигурация 2). Как видно из рисунка 5, увеличение зазора оказывает неодинаковое влияние на показания коэрцитиметра при различных положениях накладок. При конфигурации 1 увеличение зазора уменьшает не только соответствующие показания коэрцитиметра I_{Hc}^1 , но и прирост показаний $\Delta I_{Hc} = I_{Hc}^1 - I_{Hc}^0$, обусловленный помещением на пластину “магнитотвердых” накладок (рисунок 5а). Для накладки 1 прирост показаний при увеличении зазора до 0,5 мм уменьшается от 4 мА до 2,3 мА (на 43 %), а для накладки 2 - от 6,5 мА до 3,8 мА (на 42 %). При конфигурации 2 показания коэрцитиметра значительно слабее зависят от величины зазора. Абсолютные значения показаний I_{Hc}^2 для накладки 1 уменьшаются от 27,5

мА до 17 мА, а для накладки 2 – от 32 мА до 25,3 мА. Из рисунка 5б видно, что прирост показаний ΔI_{Hc} при увеличении зазора до 0,5 мм для накладки 1

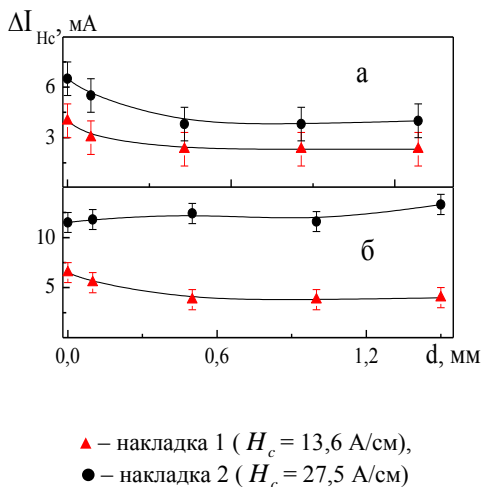


Рисунок 5 - Зависимости прироста показаний коэрцитиметра от величины зазора между пластиной и полюсами электромагнита

меньше, чем для пластины толщиной в 2 мм. Однако и в этом случае прирост показаний коэрцитиметра при конфигурации 2 существенно выше, чем при конфигурации 1. При толщине пластины 7,5 мм наличие и месторасположение накладок практически не оказывает влияния на показания коэрцитиметра.

Таким образом, магнитная неоднородность, находящаяся в центре межполюсного пространства оказывает значительно меньшее влияние на показания коэрцитиметра, чем такая же неоднородность вблизи полюса электромагнита. Кроме того, зазор между полюсами электромагнита и поверхностью намагничиваемого объекта сильнее снижает чувствительность к магнитной неоднородности в центре межполюсного пространства. Это необходимо учитывать при коэрцитиметрическом контроле изделий с неоднородными свойствами (поверхностно упрочненные зоны, наклепанные участки и т.д.).

В пятой главе представлены теоретические и экспериментальные основания многопараметровых способов локального измерения магнитных свойств вещества при наличии таких мешающих факторов, как немагнитный зазор и вариации формы и размеров объектов контроля.

Наиболее целесообразным и простым для технической реализации является метод совокупных измерений коэрцитивной силы и дополнительного параметра, чувствительного к зазору и не зависящего от магнитных свойств

уменьшается от 7 мА до 5,3 мА (на 24 %), а для накладки 2 – прирост практически не меняется. Увеличение толщины магнитомягкой пластины 6 уменьшает чувствительность коэрцитиметра к наличию и местоположению “высококоэрцитивных” накладок: при нулевом зазоре величина приращений показаний ΔI_{Hc} за счет “магнитотвердых” накладок для пластины толщиной в 4 мм заметно

контролируемых объектов. Магнитный поток в составной цепи Φ зависит от величины зазора на всех этапах намагничивания и перемагничивания. Величина Φ в наименьшей степени зависит от магнитных свойств контролируемого объекта при включении максимального намагничивающего тока. При неизменных геометрических параметрах магнитной цепи и фиксированной величине намагничивающего тока получающийся магнитный поток будет зависеть от намагниченности насыщения контролируемого объекта и величины зазора. Поскольку намагниченность насыщения является структурно не чувствительной магнитной характеристикой, которая остается неизменной при многих видах воздействия на ферромагнетик [1], величина магнитного потока при максимальном намагничивающем токе Φ_{\max} главным образом должна зависеть от наличия и величины зазора в составной магнитной цепи. Таким образом, можно считать, что величина Φ_{\max} может быть мерой величины немагнитного зазора в магнитной цепи “преобразователь-объект”. Очевидным достоинством параметра Φ_{\max} является то, что его использование возможно для электромагнитов различных типов. Кроме того, измерение величины Φ_{\max} полезно также для определения степени намагничивания контролируемого объекта, поскольку при малых значениях Φ_{\max} контролируемый участок объекта не намагнитится до необходимого технического насыщения и результаты измерений будут недостоверны.

Определение величины Φ_{\max} возможно различными способами, например, с помощью намотанной на полюс магнитопровода катушки и микроверметра. Однако наиболее удобно измерять величину Φ_{\max} с помощью специального отверстия-преобразователя, выполненного в магнитопроводе электромагнита [9, 10]. Отверстие-преобразователь представляет собой щель с плоскопараллельными стенками перпендикулярными направлению магнитного потока, специальная форма которого обеспечивает пропорциональность между напряженностью магнитного поля в отверстии и величиной магнитного потока в магнитопроводе. Магнитное поле в отверстии измеряется с помощью малогабаритного датчика поля (датчик Холла). Поскольку магнитный поток из магнитопровода практически полностью переходит в объект, то по величине магнитного потока в магнитопроводе можно судить о величине магнитного потока в объекте. В межполюсном пространстве электромагнита вблизи поверхности контролируемого объекта размещен датчик поля, сигнал которого пропорционален внутреннему магнитному полю в объекте. Результаты моделирования и экспериментальных исследований показывают, что максимальная величина магнитного потока Φ_{\max} , определяемая при фиксированной величине намагничивающего тока по показаниям датчика поля в щели-преобразователе, действительно может быть мерой величины немагнитного зазора в цепи “преобразователь-объект”, причем использование этого

параметра возможно для электромагнитов различных типоразмеров.

Для ферромагнетика конечных размеров при его намагничивании в разомкнутой магнитной цепи соотношение между внешним H_e и внутренним H_i магнитными полями имеет вид [1]:

$$H_e = H_i + NM, \quad (1)$$

где N - коэффициент размагничивания,

M - намагничённость ферромагнетика.

Согласно выражению (1) у ферромагнетика конечных размеров, намагничиваемого в разомкнутой магнитной цепи, на нисходящей ветви предельной петли гистерезиса при нулевом значении внешнего магнитного поля ($H_e = 0$) намагничённость равна остаточной намагничённости тела ($M = M_r'$), а соответствующее этому магнитному состоянию значение внутреннего магнитного поля равно

$$H_i^* = -NM_r'. \quad (2)$$

При нулевом значении внутреннего магнитного поля ($H_i = 0$) намагничённость образца равна остаточной намагничённости вещества ($M = M_r$), а соответствующее значение внешнего магнитного поля равно

$$H_e^* = NM_r. \quad (3)$$

Складывая левые и правые части выражений (2) и (3) для остаточной намагничённости вещества получим

$$M_r = \frac{H_e^* + H_i^*}{N} + M_r' \quad (4)$$

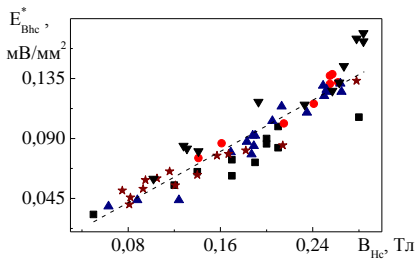
Применимость полученных выражений была проверена экспериментально: коэффициент линейной корреляции между измеренными в пермеатре и определенными с помощью (4) значениями остаточной намагничённости составил $R = 0,98$ при среднеквадратичном отклонении $S = 0,028$ Тл.

Аналоги параметров H_i^* и H_e^* могут быть использованы при разработке многопараметровых методик измерения остаточной индукции и индукции коэрцитивного возврата в составных цепях.

Для экспериментального определения возможности локального измерения изменяющейся в широких пределах индукции коэрцитивного возврата B_{hc} , перспективного параметра контроля прочностных свойств и напряженно-деформированного состояния большого класса сталей, как свойства вещества контролируемых объектов была отобрана большая группа закаленных и отпущенных при различных температурах образцов из сталей 09Г2, 20Н2М, 35, 45ХН, 7Х3 и 9ХФ, имеющих к тому же различную площадь поперечного сечения. Коэффициент линейной корреляции, рассчитанный по всем данным составил $R = 0,83$ при среднеквадратичном отклонении $S = 0,036$ Тл. Значения коэффициента корреляции и среднеквадратичного отклонения очевидно связаны с различием в площади поперечного сечения образцов. На рисунке 7

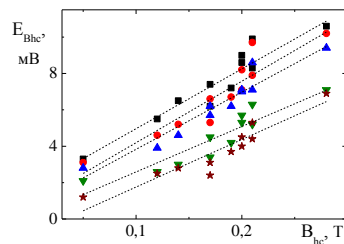
представлена зависимость нормированного на площадь поперечного сечения образцов сигнала E_{Bhc}^* от величины B_{Hc} . Коэффициент корреляции вырос до $R = 0,93$, а среднеквадратичное отклонение уменьшилось до $S = 0,023$ Тл. Таким образом, для образцов с площадью поперечного сечения меньше или сопоставимой с площадью поперечного сечения полюсов приставного намагничивающего устройства (для которых обеспечивается промагничивание всего сечения) учет площади сечения позволяет существенно уменьшить погрешность локального определения абсолютной величины индукции коэрцитивного возврата.

Для определения возможной методики уменьшения влияния зазора на образцах из сталей 20Н2М, 7Х3 и 9ХФ были проведены измерения относительной величины индукции коэрцитивного возврата E_{Bhc} при различных зазорах в составной цепи “объект-преобразователь”. Соотношение размеров образцов и преобразователя обеспечивало достаточный уровень намагничивания образцов при исследуемых зазорах. На рисунке 8 приведены определенные при различных зазорах зависимости сигнала приставного преобразователя E_{Bhc} от величины B_{Hc} образцов из стали 20Н2М. Как следует из приведенных данных появление и рост зазора приводит к снижению измеряемых значений E_{Bhc} и уменьшению угла наклона линии $E_{Bhc}(B_{Hc})$. Коэффициент линейной корреляции по всем приведенным на рисунке 8 данным составил $R = 0,73$ при $S = 0,038$ Тл. Общим для трех существенно отличающихся групп образцов является то, что зазор снижает уровень (аддитивное влияние) и уменьшает угол наклона (мультипликативное влияние) зависимости $E_{Bhc}(B_{Hc})$. Дополнительный учет параметра $E_{\Phi_{max}}$ позволил получить коэф-



▲ - 09Г2, ■ - 20Н2М, ★ - 35, ▼ - 45ХН,
● - 7Х3

Рисунок 7 – Зависимость нормированного сигнала приставного преобразователя E_{Bhc} от величины B_{Hc} образцов из сталей 09Г2, 20Н2М, 35, 45ХН и 7Х3



■ - d=0 мм, ● - d=0,1 мм; ▲ - d=0,19 мм, ▼ - d=0,4 мм; ★ - d=0,6 мм

Рисунок 8 – Зависимости сигнала приставного преобразователя E_{Bhc} от величины B_{Hc} образцов из стали 20Н2М при различных зазорах d в цепи

коэффициент множественной корреляции $R = 0,93$ между измеряемыми и истинными значениями для стали 20Н2М, а среднеквадратичное отклонение $S = 0,02$ Тл.

По аналогии с учетом влияния зазора при измерении индукции коэрцитивного возврата, можно считать, что дополнительное измерение величины магнитного потока Φ_{\max} , определяемого при максимальном фиксированном намагничивающем токе в электромагните, позволит компенсировать влияние зазора на результаты локального измерения коэрцитивной силы.

Учет влияния зазора на результат измерения коэрцитивной силы может быть выполнен с использованием линейной регрессионной модели вида:

$$H_c = A_0 + A_1 \cdot E_{Hc} + A_2 \cdot E_{\Phi_{\max}}, \quad (5)$$

где H_c – истинное значение коэрцитивной силы,

E_{Hc} – значение измеряемого сигнала, соответствующего коэрцитивной силе,

$E_{\Phi_{\max}}$ – значение измеряемого сигнала, соответствующего максимальному потоку в магнитной цепи,

A_0, A_1, A_2 – коэффициенты, зависящие от конфигурации магнитной цепи “преобразователь-объект” и их точные значения устанавливаются при градуировке конкретного коэрцитиметра.

На рисунке 9 приведены зависимости измеренных с помощью приставного преобразователя характеристик E_{Hc} и $E_{\Phi_{\max}}$ от коэрцитивной силы группы закаленных и отпущенных при различных температурах образцов из стали 7Х3, имеющих размеры 9х9х65 мм. Указанные на рисунке линии 1 получены при нулевом зазоре, линии 2 – при $d = 0,5$ мм. В этом случае при определении коэрцитивной силы по одному параметру E_{Hc} при нулевом зазоре и при $d = 0,5$ мм коэффициент линейной корреляции составил $R = 0,97$, а среднеквадратичная погрешность $S = 1,65$ А/см. Для этих же образцов способ определения коэрцитивной силы с учетом параметра $E_{\Phi_{\max}}$ имеет погрешность 0,3 А/см, т.е. почти в 5 раз меньше, чем при однопараметровых измерениях, а коэффициент множественной корреляции $R = 0,99$.

Описанный способ компенсации влияния зазора может быть использован также при измерении коэрцитивной силы по величине размагничивающего тока I_{Hc} при нулевом магнитном потоке в цепи “преобразователь-объект”. На рисунке 10 приведены определенные при различных зазорах с помощью указанного выше П-образного преобразователя зависимости размагничивающего тока I_{Hc} от коэрцитивной силы образцов СОКС (размеры 7,5х33,8х57 мм).

Как видно из рисунка 10, зазор оказывает очень существенное влияние на соответствующие коэрцитивной силе значения размагничивающего тока I_{Hc} . Появление и рост зазора в цепи “преобразователь-объект” монотонно

сдвигает линию $I_{Hc}(H_c)$ в сторону меньших значений тока. Чувствительность размагничивающего тока I_{Hc} к зазору намного больше, чем величины E_{Hc} . Линейная аппроксимация зависимости $I_{Hc}(H_c)$, определенная по совокупности результатов при зазорах 0; 0,095; 0,185; 0,37 и 0,5 мм дала следующие результаты: $R = 0,85$; $S = 7,9$ А/см. Учет параметра $E_{\Phi_{max}}$ имеет погрешность 2,2 А/см, т.е. в 3 раза меньше, чем при однопараметровых измерениях, а коэффициент множественной корреляции $R = 0,99$.

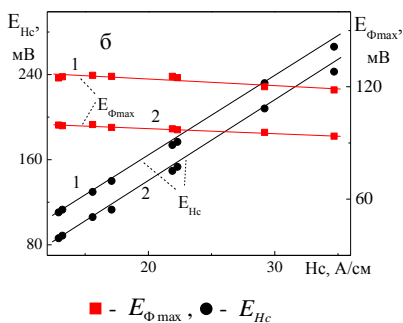


Рисунок 9 – Зависимости величин E_{Hc} и $E_{\Phi_{max}}$ от коэрцитивной силы термообработанных образцов из стали 7Х3, измеренные с помощью П-образного приставного преобразователя без зазора (линии 1) и с зазором $d = 0,5$ мм (линии 2)

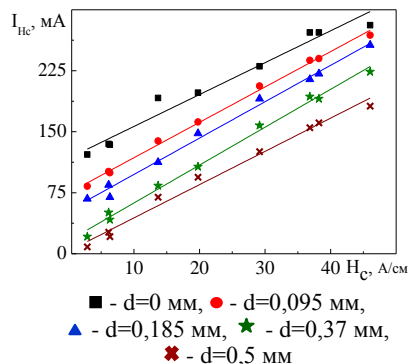


Рисунок 10 – Зависимости размагничивающего тока I_{Hc} от коэрцитивной силы образцов СОКС при различных значениях зазора

Таким образом, дополнительное измерение магнитного потока Φ_{max} позволяет достаточно простым способом компенсировать влияние зазора на результаты локального измерения коэрцитивной силы при ее регистрации как по размагничивающему току, так и по тангенциальной составляющей поля объекта в межполюсном пространстве приставных преобразователей различного типа. Для однослойных контролируемых объектов более предпочтительным является второй способ определения коэрцитивной силы вследствие его меньшей чувствительности к зазору. При этом типоразмер и магнитодвижущая сила приставного электромагнита должны обеспечивать достаточный уровень намагничивания межполюсной контролируемой зоны объекта.

Помимо зазора на результаты измерения коэрцитивной силы оказывает влияние конфигурация составной цепи “преобразователь - изделие”, которая для выбранного типоразмера преобразователя будет определяться формой и размерами контролируемых объектов. Поиск предполагаемого способа компенсации влияния формы и размеров основывался на выше приведенных теоретических соотношениях. Выражение (4) показывает связь остаточной

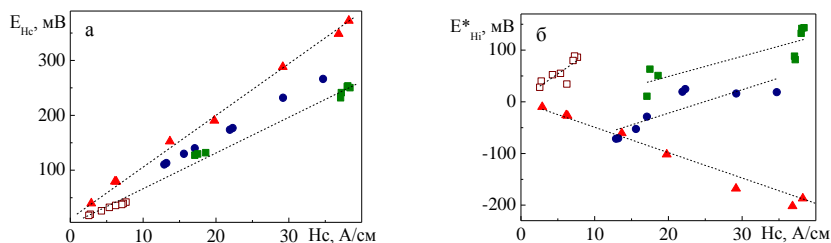
намагниченности вещества и остаточной намагниченности тела и при некоторых ограничениях на форму и размеры ферромагнитных объектов может быть использовано для определения свойств вещества в открытой цепи. Как видно, влияние размеров и формы объектов на результат магнитных измерений определяется первым слагаемым в (4).

В составной магнитной цепи “преобразователь - объект” имеются граничные поверхности, разделяющие области с различающимися магнитными свойствами. Такие граничные поверхности являются источниками размагничивающих полей. При уменьшении намагничивающего тока внутреннее поле в намагничиваемом объекте становится равным нулю при некотором положительном значении намагничивающего тока, а после отключения тока внутреннее поле становится отрицательным. Таким образом, для составной цепи также можно ввести параметры H_i^* (значение получающейся после выключения максимального намагничивающего тока тангенциальной составляющей магнитного поля на поверхности контролируемого участка объекта) и I^* (значение намагничивающего тока, при котором тангенциальная составляющая внутреннего поля объекта равна нулю), которые являются аналогами входящих в выражения (2) - (4) параметров.

Экспериментальные исследования показали, что учет даже одного параметра H_i^* позволяет существенно снизить погрешность измерения коэрцитивной силы, связанную с различием формы и размеров испытуемых объектов. На рисунке 11а приведены измеренные с помощью П-образного преобразователя (сечение полюса 12x 28 мм, межполюсное расстояние 30 мм) зависимости характеристики E_{Hc} от коэрцитивной силы объектов различных размеров и формы. Видно, что при одних и тех же измеренных значениях E_{Hc} разброс значений коэрцитивной силы варьируется от 3 до 15 А/см. При этом обусловленная различием размеров и формы контролируемых объектов среднеквадратичная погрешность определения коэрцитивной силы по одному параметру E_{Hc} составляет 4,2 А/см. Как видно из рисунка 11б, измеряемый датчиком поля сигнал $E_{H_i}^* \sim H_i^*$ для каждого из типоразмеров образцов коррелирует с коэрцитивной силой, однако значения сигнала и характер корреляции $E_{H_i}^*(H_c)$ зависят от формы и размеров образцов. Для показанной на рисунке 11 выборки учет величины $E_{H_i}^*$ уменьшает среднеквадратичную погрешность определения коэрцитивной силы до 1,5 А/см, т.е. почти в 3 раза, при этом коэффициент множественной корреляции составляет $R = 0,99$.

Дополнительное измерение параметра $E_{H_i}^*$ позволяет также компенсировать влияние размеров и формы объектов на результаты измерения коэрцитивной силы по размагничивающему току I_{Hc} . Для тех же образцов обусловленный формой разброс показаний I_{Hc} больше, чем разброс значений E_{Hc} , что особенно заметно при малых значениях измеряемой коэрцитивной силы.

В то же время характер изменения зависимости $I_{Hc}(H_c)$ при изменении формы образцов аналогичен изменению зависимости $E_{Hc}^*(H_c)$. Учет параметра E_{Hi}^* снижает среднеквадратичную погрешность определения коэрцитивной силы более, чем в 2 раза (с $S = 8,7$ А/см до $S = 4,1$ А/см), при этом коэффициент множественной корреляции возрастает от значения $R = 0,71$ до $R = 0,94$.



▲ - $a \times b = 33,8 \times 7,5$ мм (СОКС на ребре), ● - $8,9 \times 8,9$ мм, ■ - 5×10 мм, □ - $3,9 \times 10,1$ мм

Рисунок 11 – Зависимости величин E_{Hc} (а) и E_{Hi}^* (б) от коэрцитивной силы образцов различной высоты a и ширины b

Таким образом, описанная методика уменьшения влияния формы и размеров в принципе дает возможность локально измерять абсолютную величину коэрцитивной силы ферромагнитных объектов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Разработаны новые многопараметровые способы и средства локального бесконтактного измерения коэрцитивной силы и индукции коэрцитивного возврата, основанные на дополнительном измерении параметров, характеризующих составную цепь “преобразователь-объект”.

1. Установлено, что влияние зазора между полюсами электромагнита и поверхностью исследуемого ферромагнетика на результаты локального измерения коэрцитивной силы и индукции коэрцитивного возврата может быть учтено путем введения поправки, рассчитываемой из значения максимально-го магнитного потока в составной цепи “электромагнит-объект”.

2. Показано, что влияние формы массивных контролируемых объектов на результаты измерения их коэрцитивной силы и индукции коэрцитивного возврата может быть учтено путем введения поправки, определяемой из величины остающейся после выключения намагничивающего тока тангенциальной составляющей магнитного поля вблизи поверхности объекта.

3. Показана целесообразность изменения конструкции приставных магнитоизмерительных преобразователей. Установлено, что использование элек-

ромагнитов со встречно направленными наконечниками позволяет уменьшить межполюсное расстояние используемых электромагнитов и обеспечить необходимые для измерения магнитных свойств вещества однородность и плотность тангенциальной составляющей магнитной индукции в межполюсной зоне объекта.

4. Численным моделированием получено количественное описание пространственного распределения поля и потока в массивных объектах, намагничиваемых приставными электромагнитами, что позволяет оптимизировать выбор конструкции и параметров устройств намагничивания.

5. Разработан приставной магнитоизмерительный преобразователь, обеспечивающий требуемую величину индукции в межполюсном пространстве и измерение всех необходимых магнитных параметров. Создано программное обеспечение, позволяющее практически реализовать новые многопараметровые способы измерений.

Новые способы и средства магнитной структуроскопии переданы для использования ОАО НПК “Уралвагонзавод”.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Костин, В.Н. Моделирование пространственного распределения поля и индукции в локально намагничиваемых массивных объектах и оптимизация конструкции П-образных преобразователей [Текст] /В.Н. Костин, О.Н. Лукиных (Василенко), Я.Г. Смородинский, К.В. Костин // Дефектоскопия. – 2010. - № 6. - С. 13-21.

2. Костин, В.Н. Локальное измерение индукции коэрцитивного возврата при наличии зазора в составной цепи «преобразователь-объект» [Текст] /В.Н. Костин, О.Н. Василенко // Дефектоскопия. – 2012. - № 7. – С. 3-14.

3. Костин, В.Н. О некоторых новых возможностях локального измерения коэрцитивной силы ферромагнитных объектов [Текст] /В.Н. Костин, О.Н. Василенко // Дефектоскопия. – 2012. - № 7. – С. 15-26.

4. Василенко, О.Н. Топография поля и потока внутри и над поверхностью ферромагнитных пластин при их контактном и бесконтактном намагничивании [Текст] /О.Н. Василенко, В.Н. Костин // Дефектоскопия. – 2013. - № 9. – С. 23-34.

5. Пат. RU 2483301 С1 Российская Федерация, МПК7 G 01 N 27/72 (2006.01). Способ локального измерения коэрцитивной силы ферромагнитных объектов [Текст] /Костин В.Н., Василенко О.Н.; заявитель и патентообладатель ИФМ УрО РАН. – № 2011147435/28; заявл. 22.11.11; опубл. 27.05.13, Бюл. № 15. – 12 с. Костин В.Н., Бида Г.В. Магнитный структуроскоп МС-2 // Дефектоскопия. – 1989. - № 2. - С. 21-24.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Бакунов, А.С., Горкунов Э.С., Щербинин В.Е. Магнитный контроль [Текст] /А.С. Бакунов, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин – М.: ИД «Спектр», 2011. - 192 с.
2. Бида, Г.В. Магнитные характеристики тела – параметры неразрушающего контроля качества отпуска закаленных сталей (обзор) [Текст] /Г.В. Бида // Дефектоскопия. - 2002. - № 6. - С. 19-33.
3. Костин, В.Н. Многопараметровые методы структуроскопии стальных изделий с использованием магнитных свойств вещества [Текст] / В.Н. Костин, А.А. Осинцев, А.Н. Сташков, Т.П. Царькова // Дефектоскопия. – 2004. - № 3. - С. 69-82.
4. Tumanski, S. Handbook of Magnetic Measurements Series: Series in Sensors [Текст] / S. Tumanski. - USA: CRC Press, 2011. – 404 p.
5. Fiorillo, F. Characterization and Measurement of Magnetic Materials [Текст] / F. Fiorillo. –USA: Academic Press, 2004. – 666 p.
6. Stefanita, C.-G. Magnetism Basics and Applications [Текст] / C.-G. Stefanita. – USA: Springer Berlin Heidelberg, 2012. - 334 p.
7. Михеев, М.Н. Топография магнитной индукции в изделиях при локальном намагничивании их приставным электромагнитом [Текст] /М.Н.Михеев // Известия АН СССР. – 1948. - № 3-4. - С. 68-77.
8. Безлюдько, Г.Я. Серия портативных приборов-структуроскопов, основанных на измерении величины коэрцитивной силы [Текст] / Г.Я. Безлюдько, В.Ф. Мужикский, В.Б. Ремезов // Дефектоскопия – 2003. - № 4. - С. 43— 51.
9. Костин, В.Н. Измерение относительных значений магнитных свойств вещества контролируемых изделий в составных замкнутых цепях [Текст] / В.Н. Костин, Т.П. Царькова, Е.Ю. Сажина // Дефектоскопия. – 2001. - № 1. - С. 15-26.
10. Костин, В.Н. Мобильные средства многопараметровой магнитной структуроскопии [Текст] / В.Н. Костин, А.А. Осинцев, А.Н. Сташков, А.П. Ничипурк, К.В. Костин, Е.Ю. Сажина // Дефектоскопия. – 2008. - № 4. - С. 66-77.

Отпечатано на ризографе ИФМ УрО РАН тираж 100 заказ №

Объем 1.0 печ. л. формат 60×84 1/16

620990 г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18