

На правах рукописи

СЕРБИН Евгений Дмитриевич

**МАГНИТНЫЕ И МАГНИТОАКУСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ
СТРУКТУРОСКОПИИ ДЕФОРМИРОВАННЫХ И
ТЕРМООБРАБОТАННЫХ СТАЛЕЙ**

2.5.9. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2024

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН).

Научный руководитель: **Костин Владимир Николаевич**, доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией комплексных методов контроля в федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт физики металлов имени М.Н. Михеева» Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

Официальные оппоненты: **Леньков Сергей Викторович**, доктор технических наук, главный научный сотрудник Физико-технического института в федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», г. Ижевск.

Дерусова Дарья Александровна, доктор технических наук, старший научный сотрудник, и.о. заведующего лабораторией лазерной вибродиагностики материалов в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «19» сентября 2024 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании объединенного диссертационного совета 99.1.087.02 по адресу: 620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФМ УрО РАН и на сайте www.impr.uran.ru в разделе Диссертационный совет.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук

Василенко Ольга Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Повышение требований к эксплуатационным характеристикам материалов и изделий, необходимость обеспечения надежности и долговечности машин и механизмов, а также постоянное расширение областей применения физических методов контроля и диагностики определяют необходимость постоянного совершенствования этих методов.

В ферромагнетиках взаимодействие доменных границ с дефектами кристаллического строения обуславливает высокую чувствительность магнитных параметров к изменению структурно-фазового и напряженно-деформированного состояний материала. Основной магнитной методикой определения структурно-фазового и напряженно-деформированного состояний (т.е. структуроскопии) контролируемых объектов является измерение различных параметров магнитного гистерезиса [1–4]. Однако существующие средства магнитной структуроскопии ферромагнитных материалов имеют ряд ограничений. Практически все известные приборы являются однопараметровыми (коэрцитиметры, измерители намагниченности насыщения, измерители магнитной проницаемости и т.д.). Кроме того, известные приборы обеспечивают измерение магнитных свойств тела, а не вещества [5]. При этом достоверное измерение магнитных свойств требует обеспечения хорошего контакта измерительного преобразователя с поверхностью контролируемого объекта. В настоящее время известна разработанная в ИФМ УрО РАН аппаратно-программная система DIUS-1.21M, которая не только осуществляет измерение целого комплекса параметров вещества контролируемых ферромагнитных объектов, но и позволяет минимизировать влияние немагнитного зазора и других мешающих факторов на результаты измерений [6–8]. Актуальной задачей является расширение функциональных возможностей аппаратно-программной системы многопараметровой магнитной структуроскопии DIUS-1.21M, а также новых поколений таких систем, что требует поиска новых структурно-чувствительных параметров и разработки методик совместного анализа нескольких магнитных параметров.

Известные средства ультразвуковой структуроскопии имеют ограниченную область применения [9–14]. Измерение скорости ультразвука (например, в методе акустоупругости) предъявляет высокие требования к качеству подготовки поверхности объектов контроля, а также требует обеспечения прецизионных измерений с относительной погрешностью не более 0,1 процента. Интерпретацию результатов затрудняет то, что такие методики чувствительны к неоднородностям материала, сопоставимым по размерам с длиной ультразвуковой волны [9–14].

Однако необходимость получения наиболее полной и достоверной информации о состоянии объектов делает актуальным комплексное применение методик контроля, использующих параметры различной физической природы. Примером таких методик может быть комбинирование магнитных и акустических параметров [15, 16].

Новую информацию о структурно-фазовом и напряженно-деформированном состояниях могут дать параметры магнитоакустической эмиссии (МАЭ), под которой

понимается совокупность упругих колебаний, возникающих в ферромагнетике при воздействии на него переменного магнитного поля. Эффект МАЭ используется при исследовании микроструктуры сталей и сплавов [17], при изучении доменной структуры [18], взаимосвязи магнитных и акустических свойств ферромагнитных материалов [19], а также взаимосвязи магнитоакустических параметров и магнитострикционной чувствительности [20], для определения структурно-фазового [21] и напряженно-деформированного состояний материалов и объектов [22, 23]. В настоящее время МАЭ в различных материалах интенсивно исследуется научными группами разных стран, однако имеющихся результатов недостаточно для применения МАЭ в неразрушающем контроле. Кроме того, открытым остается вопрос об оптимальных способах возбуждения и регистрации параметров МАЭ. Таким образом, исследование эффекта магнитоакустической эмиссии с целью его применения в неразрушающем контроле структурно-фазового и напряженно-деформированного состояний является перспективной задачей.

Степень разработанности темы исследования. К настоящему времени известно множество магнитных параметров контроля структурно-фазового состояния материалов [2, 4]. Однако определяемые на кривой намагничивания магнитные параметры (начальная и максимальная восприимчивости, потери на перемагничивание в слабых полях и т.д.) не могут быть использованы на практике в связи с невозможностью полного размагничивания реальных объектов контроля. В данной работе предложены новые более чувствительные в сравнении с коэрцитивной силой магнитные параметры, определяемые формой предельной петли магнитного гистерезиса вещества, которые могут быть локально измерены с помощью имеющейся аппаратно-программной системы DIUS-1.21M и рассчитаны с помощью новой авторской программы «Программа расчета критических полей, определяемых формой петли магнитного гистерезиса и кривой намагничивания ферромагнитных материалов “Нк|Нкс”» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023660786 от 24 мая 2023 г.).

Перестройка доменной структуры при перемагничивании может быть охарактеризована различными размерными, количественными и временными параметрами. Для ферромагнетиков характерно различие длин пробега, площадей доменных границ, числа одновременно смещающихся границ, времени смещений доменных границ, а также соотношения этих параметров [24, 25]. Отмеченные выше особенности должны отражаться в амплитудно-частотном спектре МАЭ. Однако до настоящего времени исследований амплитудно-частотных характеристик МАЭ не проводилось и основной количественной характеристикой МАЭ являлось среднее квадратичное значение огибающей потока упругих колебаний [26–29]. В работе предложены новые структурно-чувствительные спектральные параметры МАЭ, такие как основная частота МАЭ, амплитуда гармоники с частотой, равной удвоенной частоте переменного магнитного поля, а также поля максимумов МАЭ. На ряде углеродистых сталей и сплавов исследовано влияние на указанные параметры контроля холодной пластической деформации и термической обработки.

До проведения диссертационного исследования для возбуждения МАЭ применяли переменное поле с частотой от единиц герц до нескольких килогерц [25–29]. В данной работе экспериментально установлено, что зависимость амплитуды МАЭ от частоты переменного магнитного поля немонотонна и имеет максимум при 3–5 Гц независимо от магнитных свойств, формы и размеров образцов и характеристик акустического измерительного тракта, что определяет оптимальный способ возбуждения МАЭ.

Показана необходимость и возможность комплексного анализа магнитных и магнитоакустических параметров для достоверного определения функциональных свойств ряда холоднодеформированных и термообработанных ферромагнитных углеродистых сталей.

Цель работы заключалась в нахождении новых магнитных и магнитоакустических структурно-чувствительных параметров, разработке методик их измерения и определении возможностей комплексного применения магнитных и магнитоакустических параметров для структуроскопии ферромагнитных сталей.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие **задачи**:

1. Выявление новых, зависящих от формы предельной петли гистерезиса, структурно-чувствительных магнитных параметров контроля термообработки и пластической деформации ферромагнитных сталей и разработка методик их определения на реальных объектах.

2. Определение возможностей селективного измерения спектральных параметров магнитоакустической эмиссии в конструкционных сталях и сплавах. Определение оптимальных условий возбуждения и измерения амплитудно-частотных параметров МАЭ.

3. Выяснение влияния холодной пластической деформации и термической обработки на комплекс магнитных и магнитоакустических характеристик ряда углеродистых сталей различного состава.

Научная новизна работы:

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

1. На примере холоднодеформированной и отожженной стали 20Г, а также закаленной и отпущенной стали 7ХЗ, показана возможность применения новых структурно-чувствительных магнитных параметров, определяемых формой кривых намагничивания и предельной петли гистерезиса в области преобладающих смещений 90-градусных доменных границ, для более чувствительного и достоверного локального контроля термических обработок и пластической деформации.

2. Впервые показана возможность применения новых спектральных параметров магнитоакустической структуроскопии: основной частоты и амплитуды гармоника МАЭ двойной частоты перемагничивания. На примере сталей 60С2А и 95Х18 показано, что эти параметры могут быть применимы для контроля качества средне- и высокотемпературного отпуска закаленных сталей с содержанием углерода более 0,3%. Установлено, что амплитуда гармоника МАЭ с частотой, равной двойной частоте перемагничивания, пропорциональна динамической магнитоакустической чувствительности

ферромагнитного материала и измерение этого параметра позволяет оценивать величину акустического отклика ферромагнитных материалов на изменение намагничивающего поля.

3. Установлено, что сопоставление характеристик сигналов МАЭ с гистерезисными магнитными параметрами ферромагнитных материалов позволяет ввести новые структурно-чувствительные параметры: временной сдвиг максимума МАЭ и поля максимумов МАЭ. На примере стали 70Г впервые показано, что поле максимума МАЭ, определяемое по временному сдвигу максимума сигнала МАЭ при известном характере временной зависимости перемагничивающего поля, является аналогом усредненного критического поля 90-градусных доменных границ, имеющего отличную от коэрцитивной силы структурную чувствительность, и может применяться для повышения достоверности контроля термических обработок и степени пластической деформации.

Теоретическая и практическая значимость.

Предложены новые структурно-чувствительные магнитные параметры – критические поля, определяемые формой предельной петли магнитного гистерезиса. Показано, что эти параметры могут быть определены с помощью аппаратно-программной системы DIUS-1.21M, а также имеют большую структурную чувствительность, чем известные магнитные параметры. С учетом методических рекомендаций и в соавторстве с Костиным В.Н. – научным руководителем автора диссертационной работы – разработана и включена в состав программного обеспечения АПС DIUS-1.21M программа для расчета критических полей, определяемых формой петли магнитного гистерезиса (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023660786 от 24 мая 2023 г.).

Выявлены оптимальные условия возбуждения и измерения магнитоакустической эмиссии в ферромагнитных конструкционных сталях. Разработана методика бесконтактного измерения низкочастотных параметров МАЭ с применением лазерной интерферометрии. Разработана программа расчета магнитоакустической чувствительности и других численных характеристик полевой зависимости магнитоакустической ферромагнитных материалов (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023660788 от 24 мая 2023 г.).

Определены возможности комплексного применения магнитных и МАЭ-параметров для многопараметровой структуроскопии ферромагнитных сталей и даны рекомендации по применению новых структурно-чувствительных параметров контроля ферромагнитных сталей.

Полученные в работе результаты расширяют представление об амплитудно-частотном анализе магнитоакустической эмиссии, дополняют физические основы МАЭ-спектроскопии ферромагнитных материалов и используются в учебном процессе ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» в курсе дисциплин «Электрический и магнитный контроль», а также «Электромагнитный контроль» при подготовке бакалавров и магистров по направлениям 12.03.01 и 12.04.01 Приборостроение.

Приведенные в работе результаты измерений магнитных, магнитоакустических и магнитоакустических характеристик могут применяться при разработке

электромагнитно-акустических внутритрубных дефектоскопов ООО «Научно-производственный центр «Внутритрубная диагностика».

Методология и методы исследования. Проведение магнитных измерений и выбор параметров контроля проводились в соответствии с методологией магнитного структурно-фазового анализа при использовании магнитных свойств вещества. При измерении магнитоакустической эмиссии использовались элементы методологии акустико-эмиссионного контроля. Экспериментальные исследования проводились с применением цифровой регистрации и обработки измерительных сигналов, а также анализа экспериментальных данных с помощью разработанных программ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Критические поля, определяемые формой кривых намагничивания и предельной петли гистерезиса в области преобладающих смещений 90-градусных доменных границ, имеют более высокую чувствительность к изменению температуры отжига холоднодеформированной стали 20Г и температуры отпуска закаленной стали 7ХЗ, чем коэрцитивная сила и остаточная магнитная индукция.

2. Зависимость амплитуды магнитоакустической эмиссии от частоты переменного магнитного поля имеет сходный немонотонный характер с максимумом при частотах поля 3–5 Гц для различных по физическим свойствам и размерам металлических ферромагнетиков.

3. Амплитуда гармоники МАЭ с частотой, равной удвоенной частоте переменного магнитного поля, пропорциональна динамической магнитоэлектрической чувствительности ферромагнетика.

4. Эффективными параметрами диагностики холоднодеформированных и отожженных ферромагнитных сталей являются амплитуда и поле максимума магнитоакустической эмиссии, а параметрами диагностики закаленных и отпущенных сталей являются амплитуда и основная частота магнитоакустической эмиссии.

Степень достоверности и апробация результатов. Воспроизводимость полученных в работе результатов обосновывает их достоверность. Также достоверность результатов обеспечивается применением аттестованных измерительных приборов, экспериментальных установок, а также методик измерений и обработки экспериментальных данных. Дополнительно, достоверность подтверждается согласованностью промежуточных результатов с результатами других авторов. Выводы, сделанные в диссертационной работе, логически следуют из результатов экспериментальных исследований и не противоречат современным научным представлениям.

Результаты исследований были представлены на следующих конференциях: XVI, XIX Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (г. Екатеринбург, ИФМ УрО РАН, ноябрь 2015 и 2018 гг.), XXVIII, XXXI Уральская конференция «Физические методы неразрушающего контроля», (г. Екатеринбург, ИФМ УрО РАН, ноябрь 2015 и 2018 гг.), LVII Международная конференция «Актуальные проблемы прочности» (г. Севастополь, СевГУ, май 2016 г.), Международная

конференция «Дни неразрушающего контроля» (г. Созополь, Болгария, ИМех БАН, июнь 2017, 2018 и 2019 гг.), XII Международная научно-техническая конференция «Современные методы и технологии создания и обработки материалов» (г. Минск, Беларусь, ФТИ НАН Беларуси, сентябрь 2017 г.), 6-я Межд. научно-техническая конференция и выставка «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов» (г. Могилев, Беларусь, БРУ, сентябрь 2017 г.), XII Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций», (г. Екатеринбург, ИМАШ УрО РАН, май 2018 г.), VIII Байкальская международная конференция «Магнитные материалы. Новые технологии» (г. Иркутск, ИГУ, август 2018 г.), V, VI, VII, VII Международная молодежная научная конференция «Физика. Технологии. Инновации» (г. Екатеринбург, УрФУ, май 2018, 2019, 2020 и 2021 гг.), VII Euro-Asian Symposium «Trends in MAGnetism» (г. Екатеринбург, ИФМ УрО РАН, сентябрь 2019 г.), 15th International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials (г. Порторож, Словения, Американское общество неразрушающего контроля, сентябрь 2019 г.), XXIII Всероссийская научно-техническая конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике (г. Москва, РОНКТД, октябрь 2023 г.).

Диссертационная работа выполнена в лаборатории комплексных методов контроля ИФМ УрО РАН в рамках: государственного задания РАН (шифр «Диагностика», № г.р. 01201463329, а также № АААА-А18-118020690196-3), проекта Комплексной программы УрО РАН «Исследование магнитоупругих эффектов и топологии внутренних и внешних электромагнитных полей применительно к диагностике структурно-фазового и напряженно-деформированного состояний ферромагнитных объектов, подвергающихся термическим и деформационным воздействиям» (№ 15-17-2-5), а также проекта РФФИ № 18-38-00253 мол_а «Магнитоакустический контроль прочностных свойств холоднодеформированных углеродистых сталей».

Личный вклад автора. Определение задач исследования проводилось автором совместно с научным руководителем. Автором самостоятельно получены основные экспериментальные данные магнитных измерений с помощью аппаратно-программной системы DIUS-1.21M, а также зависимостей характеристик МАЭ от амплитуды и частоты переменного магнитного поля, от условий измерений и свойств ферромагнитных материалов, выполнена их статистическая обработка и проведен анализ результатов. Также автор самостоятельно обрабатывал и анализировал результаты магнитных измерений, полученных с помощью магнитоизмерительного комплекса Remagraph. В соавторстве с научным руководителем Костиным В.Н. создана программа для расчета критических полей, определяемых формой петли магнитного гистерезиса (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023660786 от 24 мая 2023 г.), а также самостоятельно создана программа расчета магнитоэлектрической чувствительности (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023660788 от 24 мая 2023 г.). Кроме того, автором проведены исследования влияния холодной пластической деформации и термической обработки на комплекс магнитных и

магнитоакустических характеристик ряда модельных ферромагнитных сплавов и сталей, а также исследования взаимосвязи магнитных и магнитоакустических параметров и возможности их комплексного применения для диагностики ферромагнитных сплавов и сталей. Результаты выполненных исследований автор докладывал на международных и всероссийских конференциях. Вместе с руководителем и соавторами автор диссертационной работы принимал участие в написании научных статей в рецензируемые журналы.

Публикации. По теме исследования опубликовано 11 научных статей: 10 статей в рецензируемых научных журналах, определенных перечнем ВАК РФ [A1-A10], из которых 8 в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus [A1-A8], а также 1 статья в сборнике трудов конференции [A11] и 20 тезисов в сборниках трудов международных и всероссийских конференций, зарегистрировано 2 программы ЭВМ.

Соответствие паспорту научной специальности. Содержание диссертации соответствует пункту 1 «Обоснование и разработка новых и усовершенствование существующих методов неразрушающего контроля, диагностики и мониторинга состояния материалов, изделий и сооружений», а также пункту 4 «Методы и аппаратные средства контроля и диагностики размерных, кинематических, динамических, вибрационных, акустических и тепловых параметров механизмов, машин и оборудования» паспорта специальности 2.5.9. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Работа изложена на 130 страницах, включая 53 рисунка и 6 таблиц. Библиографический список цитируемой литературы содержит 203 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность выбранной темы диссертационного исследования, характеризуется степень ее разработанности, определяются цели и задачи, перечисляются положения, выносимые на защиту, излагается методология исследования, его новизна, достоверность, а также приводится описание апробации результатов.

В **первой главе** приведен обзор современного состояния электромагнитного контроля структуры и функциональных свойств ферромагнитных сталей. Описаны магнитные параметры структурно-фазового анализа и оценки напряженно-деформированного состояния ферромагнитных сталей. Рассмотрена структурная чувствительность параметров магнитного неразрушающего контроля. Описаны методики и приборы магнитной структуроскопии, а также комплексные методики многопараметрового анализа микроструктуры и напряжений ферромагнитных сталей.

Приведено описание методик и средств акустического контроля структурно-фазового и напряженно-деформированного состояний ферромагнитных сталей. Рассмотрены современные применения метода акустоупругости.

Описаны физическая сущность, условия возбуждения и измерения магнитоакустической эмиссии, а также современное состояние исследований и перспективы применения явления магнитоакустической эмиссии в структуроскопии ферромагнитных сталей.

В заключении к главе сформулированы цель и задачи работы.

Во **второй главе** приведено описание характеристик образцов, применяемых методик исследований, используемого оборудования и установок.

Основными применяемыми методами являлись магнитный контроль в открытых и замкнутых магнитных цепях с измерением магнитных параметров вещества ферромагнетиков, а также измерения магнитоакустической эмиссии с помощью акустико-эмиссионных пьезоэлектрических преобразователей в металлических ферромагнетиках при приложении внешнего переменного магнитного поля в открытой магнитной цепи.

Магнитные измерения свойств вещества проводились на магнитоизмерительном комплексе Remagraph C-500 (Steingroever GmbH) в замкнутой магнитной цепи, а также проводились локальные измерения магнитных параметров вещества с помощью программно-аппаратной системы DIUS-1.15M (ИФМ УрО РАН) с приставным электромагнитом с зазором-преобразователем.

Для возбуждения и измерения магнитоакустической эмиссии применялась оригинальная установка, описанная в работе [A2].

Изучение влияния условий возбуждения на параметры магнитоакустической эмиссии в ферромагнетиках проводилось на группе образцов, отличающихся по структурно-фазовому составу и, соответственно, по магнитным свойствам, из сталей марок 10, 65Г, 95Х18.

Исследование влияния формы и геометрических размеров ферромагнетиков на величину и характер магнитоакустической эмиссии проводилось на группе образцов из отожженного пермендюра (50 % Fe, 50 % Co) различной длины и сечения.

Оценка влияния содержания углерода на зависимость магнитоакустических параметров от режимов термической обработки проводилась на отобранных образцах из термообработанных конструкционных сталей 09Г2, 35 и 60С2А. Выбор сталей был обусловлен отсутствием действенных методов контроля их средне- и высокотемпературного отпуска.

Оценка чувствительности магнитных свойств сталей после закалки к разупрочняющему воздействию термических обработок, а также исследование характера зависимости магнитоакустической эмиссии от частоты переменного поля проводилось на образцах закаленных и отпущенных сталей различного химического состава, таких как сталь 10, 65Г и 95Х18.

Исследования магнитных и магнитоакустических параметров контроля напряженно-деформированного состояния, а также связи этих параметров с прочностными свойствами материала были проведены на наборах образцов из сталей 20Г и 70Г, подвергнутых холодной пластической деформации прокаткой до 40 % и 63 % соответственно (по изменению сечения) и отожженных впоследствии при различных температурах в

диапазоне от 20 до 800 °С в течение 1 часа с последующим охлаждением на воздухе. Также измерение магнитных параметров проводилось на группе образцов стали 7Х3, закаленных при 860 °С и отпущенных при различных температурах.

Для исследования влияния холодной пластической деформации и термической обработки на комплекс магнитных и магнитоакустических параметров применялись наборы образцов сталей 20Г и 70Г, указанные выше, а также исходные закаленные листы из низколегированной стали с содержанием углерода 0,2 %, соответствующей марке стали 20ХН2М, подвергнутые холодной прокатке до 20 % и последующему прессованию.

Для бесконтактных измерений магнитострикционных параметров ферромагнетиков применялся лазерный сканирующий вибромметр Polytec PSV-500-HV, реализующий схему интерферометра Маха-Цандера, а также специально изготовленные держатели образцов из дюралюминия.

В **третьей главе** приведено описание методики расчета новых параметров магнитной структуроскопии, определяемых формой петли гистерезиса.

Разработана методика, основанная на нахождении критического поля H_k^l , величина которого определяется формой предельной петли гистерезиса в области преобладающих смещений 90-градусных доменных границ. Предложенная методика основана на расчетном построении “безгистерезисной кривой намагничивания”, которая является результатом усреднения ветвей петли гистерезиса. Методика проиллюстрирована на рисунке 1.

Для каждого фиксированного значения магнитной индукции B_i производится определение соответствующих ей полей для нисходящей H_i^d и восходящей H_i^u ветвей петли гистерезиса, между которыми вычисляется среднее поле. Ставя ему в соответствие значение индукции B_i получается точка на расчетной “кривой намагничивания”. По точке пересечения касательных к этой расчетной кривой производится определение значения критического поля H_k^l . Аналогично возможно определение критического поля H_k^c по кривой намагничивания.

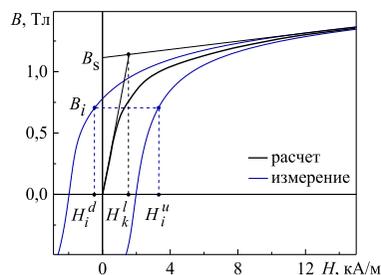


Рисунок 1 – Методика определения критического поля H_k^l по расчетной “кривой намагничивания”

Показано, что при локальных магнитных измерениях изменение критических полей, определяемых формой петли гистерезиса, при увеличении температуры отжига

холоднодеформированной стали 20Г более, чем в 2 раза превосходит изменение таких известных параметров оценки напряженно-деформированного состояния, как коэрцитивная сила и остаточная магнитная индукция (рисунок 2, а).

Установлено, что критические поля, определяемые формой петли гистерезиса при увеличении температуры отпуска закаленной стали 7Х3 имеют на 20 % большую структурную чувствительность, чем коэрцитивная сила, и на 30 % – большую, чем остаточная магнитная индукция (рисунок 2, б).

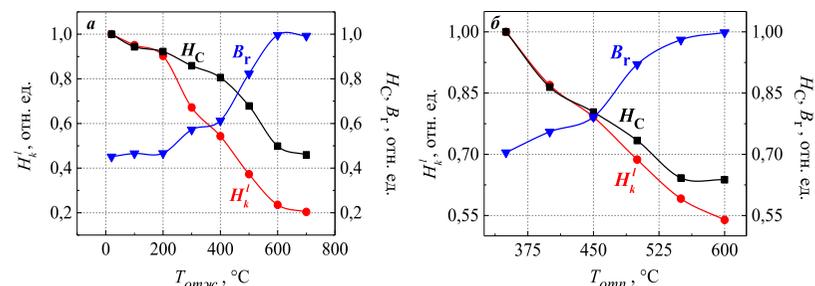


Рисунок 2 – Зависимости коэрцитивной силы, остаточной магнитной индукции и критического поля, определенного по форме петли гистерезиса, от температуры отжига холоднодеформированной стали 20Г (а) и температуры отпуска закаленной стали 7Х3 (б)

Таким образом, параметр H_k^l имеют большую чувствительность к изменению температур термообработки отожженной стали 20Г и отпущенной стали 7Х3, чем традиционные параметры H_c и B_r .

Результаты третьей главы опубликованы в работах [А5, А7].

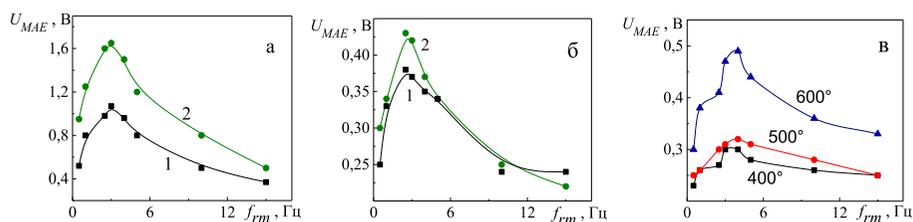
В **четвертой главе** приводятся результаты исследований зависимости параметров магнитоакустической эмиссии от условий ее возбуждения, таких как частота переменного магнитного поля, форма образцов, а также условий измерения, таких как амплитудно-частотные характеристики пьезоэлектрического преобразователя и выбор контактной жидкости. Также в главе описываются новые спектральные параметры МАЭ и демонстрируется возможность селективного измерения низкочастотных и высокочастотных параметров МАЭ.

Зависимости амплитуды МАЭ от частоты переменного магнитного поля для образцов из пермендюра и отпущенной стали 10 различных размеров при использовании различных контактных сред пьезопреобразователей приведены на рисунке 3.

Из рисунка 3 видно, что при изменении частоты переменного магнитного поля амплитуда сигнала МАЭ изменяется немонотонно. При уменьшении частоты переменного магнитного поля ниже 0,5 Гц сигнал резко уменьшается до уровня шума.

Для всех образцов пермендюра и стали 10 различных размеров максимальная амплитуда приходится на частоты переменного магнитного поля 3–5 Гц. При дальнейшем увеличении частоты сигнал достаточно быстро уменьшается и при частоте 15 Гц и более становится соизмерим с шумовым уровнем. Видно, что несмотря на различие как продольных размеров

образцов, так и их поперечного сечения, частота максимума МАЭ остается неизменной. Следует отметить, что пермендюр обладает высокой магнитной проницаемостью и глубина скин-слоя, где поле в e раз слабее, при частоте переменного магнитного поля 10 Гц составляла порядка 1,2 мм.



а – образец пермендюра (2×9×161 мм); б – образец пермендюра (4,1×40×89 мм);
в – образцы стали 10 (4,6×40,1×90 мм) с различными температурами отпуска;
1 – трансформаторное масло; 2 – литол-24

Рисунок 3 – Зависимость амплитуды МАЭ от частоты переменного магнитного поля

Тесная связь МАЭ с гистерезисными свойствами ферромагнетиков позволяет помимо амплитудно-частотных характеристик МАЭ производить сопоставление сигналов МАЭ с гистерезисными магнитными характеристиками материалов. На рисунке 4 ($f_m = 4$ Гц) приведены фрагменты оцифрованных осциллограмм переменного магнитного поля, которое изменяется по синусоидальному закону, и сигнала МАЭ двух образцов стали 70Г с температурами отжига 200 и 700 °С.

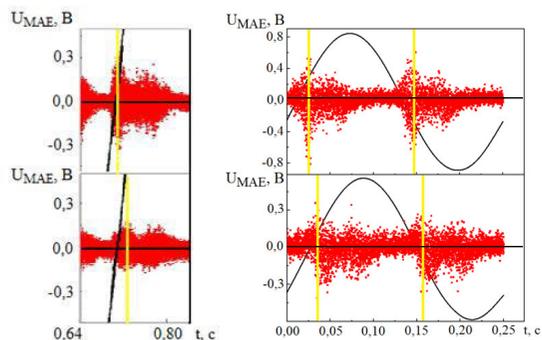


Рисунок 4 – Фрагменты оцифрованных осциллограмм переменного магнитного поля (●) и магнитоакустической эмиссии (■), отожженного при 700 °С (вверху) и при 200 °С (внизу) образцов из стали 70Г

На нисходящей и восходящей ветвях петель гистерезиса стального образца имеется по два максимума МАЭ. При известной зависимости переменного магнитного поля от времени мерой различия полей максимумов, как показано желтыми вертикальными линиями на рисунке 4, может быть временной сдвиг между соответствующими максимумами. Напряженность магнитного поля, соответствующая максимальному значению огибающей сигнала МАЭ является полем максимума МАЭ, которое может выступать в качестве аналога среднего

критического поля 90-градусных доменных границ, поскольку их необратимые смещения являются основным источником магнитоакустической эмиссии в ферромагнетиках. Как видно из рисунка 4, для образца с $T_{отж} = 700$ °С поле максимума достаточно мало, а для образца с $T_{отж} = 200$ °С – соответствует более высоким значениям внешнего магнитного поля.

Также в главе отмечено, что в малых полях амплитуда гармоник сигнала МАЭ с частотой, равной удвоенной частоте переменного магнитного поля, пропорциональна динамической магнитоэстрикционной чувствительности.

В конце главы отмечено, что характер зависимости сигнала магнитоакустической эмиссии от частоты переменного магнитного поля не зависит от формы и структурно-фазового состояния перематничиваемых ферромагнитных объектов, а структурная чувствительность параметров МАЭ не зависит от условий измерения, таких как амплитудно-частотные характеристики пьезопреобразователей и контактная жидкость. Показана возможность селективного измерения низкочастотных спектральных параметров МАЭ, связанных с магнитоэстрикционными характеристиками ферромагнетиков, а также высокочастотных параметров МАЭ, связанных с динамикой перестройки 90-градусных доменных границ ферромагнетиков.

Результаты третьей главы опубликованы в работах [A1, A2, A11].

В **пятой главе** представлены результаты исследований возможностей контроля прочностных свойств сталей различного состава после термических и деформационных обработок по магнитным и магнитоакустическим характеристикам.

С целью определения возможности практического применения остаточной магнитной индукции B_r в качестве параметра контроля качества отжига холоднодеформированных сталей, а также для оценки возможности применения в тех же целях индукции коэрцитивного возврата B_{Hc} были выполнены измерения этих величин на холоднодеформированных и отожженных сталях 20Г и 70Г с помощью аппаратно-программной системы DIUS-1.21M (рисунок 5).

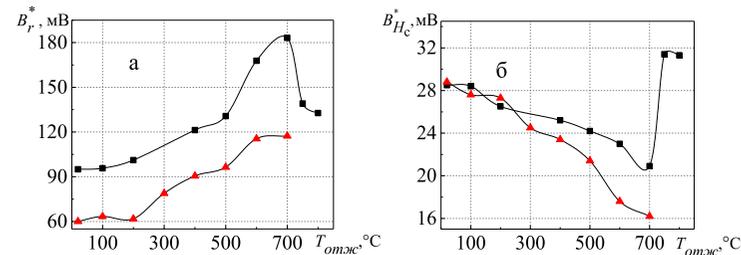


Рисунок 5 – Измеренные с помощью АПС DIUS-1.21M зависимости относительных величин остаточной магнитной индукции вещества B_r (а) и индукции коэрцитивного возврата B_{Hc} (б) от температуры отжига образцов из сталей 20Г (▲) и 70Г (■)

Из рисунка 5 видно, что остаточная магнитная индукция и индукция коэрцитивного возврата могут использоваться для контроля отпуска закаленных и отжига холоднодеформированных сталей как отдельно, так и совместно. Причиной резкого изменения магнитных параметров стали 70Г при температуре отпуска свыше 700 °С является ухудшение

структуры и повышение уровня внутренних напряжений вследствие достаточно быстрого охлаждения на воздухе, также известного как «подкалка», что подтверждается более высокой твердостью образцов, отожженных при температурах выше 700 °С, как видно из таблицы 1.

Таблица 1 – Твердость отожженных холоднодеформированных образцов стали 70Г

$T_{отж}$, °С	20	100	200	300	400	500	600	700	750	800
HRB	112	113	114,5	115	113	110	108	102	106	107

В качестве параметра контроля предложена основная частота f^* магнитоакустической эмиссии (т.е. частота гармоники с максимальной амплитудой и мощностью). На рисунке 6 приведены зависимости основной частоты МАЭ сигнала, определенные при частоте переменного магнитного поля $f_{pm} = 5$ Гц, от температуры отпуска сталей 35 и 60С2А.

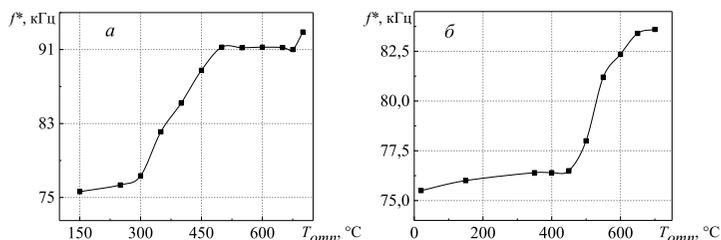


Рисунок 6 – Зависимость основной частоты сигнала магнитоакустической эмиссии от температуры отпуска сталей 35 (а) и 60С2А (б) (размеры образцов 10х10х62 мм)

Как видно из рисунка 6, при увеличении температуры отпуска сталей 35 и 60С2А основная частота МАЭ практически монотонно растет в диапазоне (350–700) °С, что демонстрирует возможность применения основной частоты МАЭ в качестве параметра контроля средне- и высокотемпературного отпуска сталей различного химического состава.

На рисунке 7 приведены зависимости амплитуды МАЭ и остаточной магнитной индукции B_r от температуры отжига образцов из холоднодеформированных и отожженных сталей 20Г и 70Г. Хорошо видна корреляция между остаточной магнитной индукцией и амплитудой МАЭ, а также сопоставимость изменения этих величин.

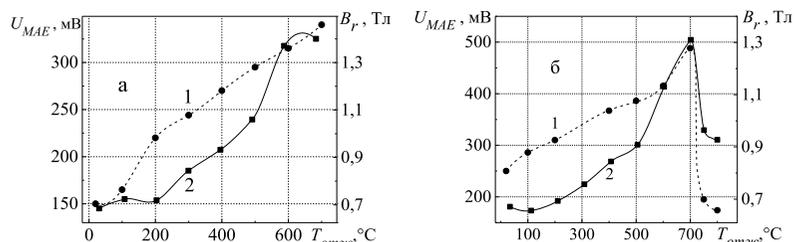


Рисунок 7 – Зависимости амплитуды МАЭ (1) и остаточной магнитной индукции (2) от температуры отжига образцов холоднодеформированных и отожженных сталей 20Г (а) и 70Г (б)

Из рисунка 7 также видно, что образцы стали 70Г, отожженные при температурах выше 700 °С, имеют значения остаточной магнитной индукции, сопоставимые с образцами, отожженными при более низких температурах, в то время как амплитуда МАЭ для температур отжига свыше 700 °С значительно ниже, чем для всех остальных температур отжига.

Поскольку ранее в [24] отмечалась корреляция амплитуды гармоники МАЭ с частотой, равной удвоенной частоте переменного магнитного поля, было проведено бесконтактное измерение динамической магнитоэстрикционной чувствительности с помощью лазерной интерферометрии. Определенные зависимости средней $(\delta l_{2f}/dH)_{avg}$ (а) и максимальной $(\delta l_{2f}/dH)_{max}$ (б) динамической магнитоэстрикционной чувствительности ферромагнитных сталей различного химического состава от величины их положительного максимума магнитоэстрикции (табл. 1) представлены на рисунке 8.

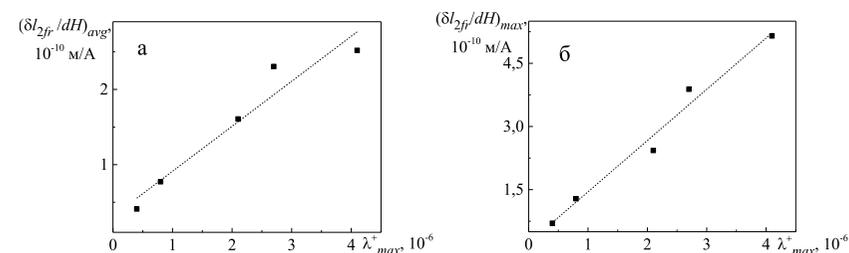


Рисунок 8 – Зависимость средней (а) и максимальной (б) динамической магнитоэстрикционной чувствительности сталей от величины их положительного максимума магнитоэстрикции

Квадрат коэффициента линейной корреляции величин $(\delta l_{2f}/dH)_{avg}$ и λ_{max}^+ равен $R^2 = 0,91$, а для величин $(\delta l_{2f}/dH)_{max}$ и λ_{max}^+ следует $R^2 = 0,97$. Таким образом, среднее и максимальное значения динамической магнитоэстрикционной чувствительности сталей хорошо коррелируют с величиной максимального удлинения исследованных сталей.

В конце главы отмечается, что контроль отпущенных ферромагнитных сталей можно проводить с применением амплитуды сигнала МАЭ, а также основной частоты МАЭ, являющейся новым спектральным параметром МАЭ. Временной сдвиг, пропорциональный полю максимальной магнитоакустической эмиссии, коррелирует с твердостью образцов и может быть применен в качестве диагностического параметра результирующего упрочнения исследуемой стали посредством двухстадийной пластической деформации. Оптимальными параметрами контроля отожженных ферромагнитных сталей являются амплитуда, временной сдвиг и поле максимума магнитоакустической эмиссии. Эти параметры коррелируют с остаточной магнитной индукцией исследованных сталей и могут быть диагностическими параметрами при бесконтактной диагностике протяженных ферромагнитных объектов (трубы, рельсы, балки и т.д.). Возможно бесконтактное измерение низкочастотных упругих колебаний, возникающих при перемагничивании ферромагнетиков. Определяемые по амплитуде

второй гармоники упругих колебаний образца среднее и максимальное значения динамической магнитострикционной чувствительности сталей коррелируют с величиной максимального магнитострикционного удлинения исследованных сталей и могут быть характеристиками динамической магнитострикции материалов.

Результаты пятой главы опубликованы в работе [А1, А3–А11].

В **заключении** подведены итоги диссертационного исследования, изложены его основные выводы и обобщающие результаты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были получены следующие основные результаты:

1. Показано, что определяемые формой предельной петли гистерезиса в области преобладающих смещений 90-градусных доменных границ критические поля имеют более высокую структурную чувствительность для отожженных и отпущенных ферромагнитных сталей, чем коэрцитивная сила и остаточная магнитная индукция. Разработано программное обеспечение, позволяющее определять эти параметры по результатам локальных магнитных измерений на реальных объектах контроля.

2. Установлено, что для металлических ферромагнетиков различного химического состава зависимость магнитоакустической эмиссии от частоты переменного магнитного поля имеет одинаковый немонотонный характер с максимальной амплитудой МАЭ при частотах магнитного поля 3–5 Гц, а изменение условий измерений не оказывает влияния на структурную чувствительность измеряемых параметров МАЭ. Показано, что амплитуда гармоники сигнала МАЭ с частотой, равной удвоенной частоте переменного магнитного поля, пропорциональна динамической магнитострикционной чувствительности материалов. Показана возможность селективного измерения низкочастотных спектральных параметров МАЭ, связанных с магнитострикционными характеристиками ферромагнетиков, а также высокочастотных параметров МАЭ, связанных с динамикой перестройки 90-градусных доменных границ ферромагнетиков.

3. Предложены новые контактные и бесконтактные методики и измерительные средства магнитоакустической эмиссии. Установлено, что высокочастотные параметры МАЭ, такие как амплитуда МАЭ, временной сдвиг и поле максимума МАЭ могут измеряться контактно с помощью пьезоэлектрических преобразователей, а низкочастотный параметр МАЭ, такой как амплитуда гармоники с частотой, равной удвоенной частоте переменного магнитного поля, может быть измерен бесконтактно с помощью разработанной методики, основанной на лазерной интерферометрии.

4. Показано, что для контроля отпуска закаленных и отжига холоднодеформированных сталей эффективными параметрами контроля могут быть остаточная магнитная индукция вещества и индукция коэрцитивного возврата, измерение которых может проводиться как отдельно, при однопараметровом контроле,

так и совместно, при двухпараметровом контроле. Установлено, что для контроля средне- и высокотемпературного отпуска ферромагнитных сталей амплитуда сигнала и основная частота магнитоакустической эмиссии являются наиболее чувствительными диагностическими к изменению прочностных свойств контролируемых сталей параметрами. Для контроля качества отжига холоднодеформированных сталей могут быть использованы амплитуда, временной сдвиг и поле максимума магнитоакустической эмиссии.

5. Установлено, что максимальная амплитуда магнитоакустической эмиссии имеет сходную с остаточной магнитной индукцией вещества структурную чувствительность, что может быть использовано при разработке бесконтактных средств структуроскопии протяженных объектов. Показано, что для контроля прочностных характеристик термообработанных и деформированных сталей целесообразно комплексное применение магнитных и магнитоакустических параметров.

СПИСОК РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, индексируемых в базе Web of Science, Scopus и входящих в перечень ВАК:

A1. Костин В.Н. Магнитные и магнитоакустические параметры контроля напряженно-деформированного состояния углеродистых сталей, подвергнутых холодной пластической деформации и отжигу / В.Н. Костин, О.Н. Василенко, Д.Ю. Филатенков, Ю.А. Чекакина, **Е.Д. Сербин**. – Текст: непосредственный // Дефектоскопия. – 2015. – Т. 10. – С. 33–41.

A2. Костин В.Н. Особенности возбуждения и регистрации магнитоакустической эмиссии в ферромагнитных объектах / В.Н. Костин, Д.Ю. Филатенков, Ю.А. Чекакина, О.Н. Василенко, **Е.Д. Сербин**. – Текст: непосредственный // Акустический журнал. – 2017. – Т. 63. – С. 209–216.

A3. Kostin V.N. The interrelationships of magnetic and magneto acoustic-emission characteristics of heat-treated steels of various chemical composition / V.N. Kostin, **E.D. Serbin**, O.N. Vasilenko. – Текст: непосредственный // MATEC Web of Conferences. – 2018. – V. 145. – P. 1–7.

A4. Kostin V.N. Complex application of magnetic and magnetoacoustic parameters in the structuroscopy of ferromagnetic materials / V.N. Kostin, **E.D. Serbin**, O.N. Vasilenko. – Текст: непосредственный // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1389. – P. 1–5.

A5. **Сербин Е.Д.** О возможности оценки магнитострикционных характеристик объемных ферромагнетиков по их магнитным свойствам / **Е.Д. Сербин**, В.Н. Костин. – Текст: непосредственный // Дефектоскопия. – 2019. – Т. 5. – С. 31–36.

A6. **Serbin E.** On the possibility of magnetoacoustic evaluation of the resulting strengthening of medium-carbon steel as a result of two-stage plastic deformation / **E. Serbin**, V. Kostin, N. Konev. – Текст: непосредственный // AIP Conference Proceedings. – 2020. – V. 2313. – P. 1–6.

A7. **Serbin E.D.** Influence of the two-stage plastic deformation on the complex of the magnetoacoustic characteristics of low-carbon steel and diagnostics of its structural state / **E.D. Serbin**, V.N. Kostin, O.N. Vasilenko, D.G. Ksenofontov, E.G. Gerasimov, P.B. Terentev. – Текст: непосредственный // NDT & E International. – 2020. – V. 116. – P. 1–6.

A8. Kostin, V.N. Non-contact measurement of magnetostriction of ferromagnetic materials by laser interferometry and speckle interferometry / V.N. Kostin, **E.D. Serbin**, A.P. Vladimirov, E.A. Rogova. – Текст: электронный // Procedia Structural Integrity. – 2023. – V. 50. – P. 151–154.

Публикации в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ:

A9. Костин В.Н. Магнитоакустический контроль твердости холоднотермообработанных углеродистых сталей / В.Н. Костин, В.И. Пудов, **Е.Д. Сербин**, О.Н. Василенко. – Текст: непосредственный // Деформация и разрушение материалов. – 2017. – Т. 2. – С. 41–46.

A10. **Сербин Е.Д.** Бесконтактное измерение динамических магнитострикционных параметров ферромагнетиков / **Е.Д. Сербин**, В.Н. Перов, В.Н. Костин. – Текст: непосредственный // Diagnostics, resource and mechanics of materials and structures. – 2023. – V. 6. – P. 121–131.

Публикации в других изданиях:

A11. Kostin V.N. On the Correlation of the Residual Magnetic Induction of Matter and the MAE Parameters in Ferromagnetic Materials / V.N. Kostin, **E.D. Serbin**. – Текст: непосредственный // International Journal "NDT Days". – 2018. – V. 1. – P. 59–64.

Результаты интеллектуальной деятельности:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023660786 Российская Федерация. Программа расчета критических полей, определяемых формой петли магнитного гистерезиса и кривой намагничивания ферромагнитных материалов “HkInKc”: № 2023660256: заявл. 24.05.2023; опубликовано 24.05.2023 / Е. Д. Сербин, В. Н. Костин; заявитель и правообладатель ИФМ УрО РАН. - 1 с.: ил. - Текст: непосредственный.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023660788 Российская Федерация. Программа расчета магнитострикционной чувствительности ферромагнитных материалов “MgnstrSens”: № 2023660258: заявл. 24.05.2023; опубликовано 24.05.2023 / Е.Д. Сербин; заявитель и правообладатель ИФМ УрО РАН. - 1 с.: ил. - Текст: непосредственный.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. - Изд. 2-е, перераб. и испр. – М.: Машиностроение, 2008. – Текст: непосредственный.

2. Михеев, М.Н. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля / М.Н. Михеев, Э.С. Горкунов. – М.: Наука, 1993. – 250 с. – Текст: непосредственный.

3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6: В 3 кн. Кн. 1: В.В. Клюев, В.Ф. Мужижкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. Магнитные методы контроля. 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 832 с.: ил. – Текст: непосредственный.

4. Altpeter, I. Electromagnetic techniques for materials characterization. In: G. Huebschen, I. Altpeter, R. Tschuncky, H.-G. Herrmann, editors. Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods, Woodhead Publishing Ltd. – 1st ed. – 2016. – P. 225-262. – Текст: непосредственный.

5. Костин В.Н. Многоцелевые аппаратно-программные системы активного электромагнитного контроля как тенденция / В.Н. Костин, Я.Г. Смородинский. – Текст: непосредственный // Дефектоскопия. – 2017. – № 7. – С. 23–34.

6. Костин В.Н. Мобильная аппаратно-программная система магнитной структуроскопии DIUS-1.15M / В.Н. Костин, О.Н. Василенко, А.В. Бызов. – Текст: непосредственный // Дефектоскопия. – 2018. – С. 47–53.

7. Костин В.Н. Локальное измерение индукции коэрцитивного возврата при наличии зазора в составной цепи / В.Н. Костин, О.Н. Василенко. – Текст: непосредственный // Дефектоскопия. – 2012. – С. 3–14.
8. Костин, В.Н. О некоторых новых возможностях локального измерения коэрцитивной силы ферромагнитных объектов / В.Н. Костин, О.Н. Василенко. – Текст: непосредственный // Дефектоскопия. – 2012. – С. 15–25.
9. Hübschen, G. Ultrasonic techniques for materials characterization. In: G. Huebschen, I. Altpeter, R. Tschuncky, H.-G. Herrmann, editors. *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods*. – Woodhead Publishing Ltd. – 1st ed. – 2016. – P. 177–224. – Текст: непосредственный.
10. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. *Ультразвуковой контроль*. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.: ил. – Текст: непосредственный.
11. Крауткремер, Й., Крауткремер Г. *Ультразвуковой контроль материалов*. Справочник. Под ред. В.Н. Волченко, Й. Крауткремер, Г. Крауткремер – М.: Металлургия, 1991. – 752 с. – Текст: непосредственный.
12. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 4: В 3 кн. Кн. 1: В.А. Анисимов, Б.И. Каторгин, А.Н. Куценко и др. *Акустическая тензометрия*. 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 736 с.: ил. – Текст: непосредственный.
13. Муравьев В.В. *Скорость звука и структура сталей и сплавов* / В.В. Муравьев, Л.Б. Зуев, К.Л. Комаров. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1996. – 184 с. – Текст: непосредственный.
14. Никитина, Н.Е. *Акустоупругость. Опыт практического применения*. – Н. Новгород: ТАЛАМ, 2005. – 208 с. – Текст: непосредственный.
15. Tschuncky R. Hybrid methods for materials characterization. In: G. Huebschen, I. Altpeter, R. Tschuncky, H.-G. Herrmann, editors. *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods*, Woodhead Publishing Ltd. – 1st ed. – 2016. – P. 263–291. – Текст: непосредственный.
16. Combination of both Ultrasound and 3MA NDT technique for mechanical parameters calibration on heavy plates / D. Böttger, Y. Gabi, B. Straß [и др.]. – Текст: непосредственный // 12th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2018), e-Journal of Nondestructive Testing. – V. 23(8) – P. 1–4.
17. Study on the applicability of the measurements of magnetoelastic properties for a nondestructive evaluation of thermally induced microstructure changes in the P91 grade steel / L. Piotrowski, B. Augustyniak, M. Chmielewski. – Текст: непосредственный // NDT&E International. – 2012. – V. 47. – p. 157-162.
18. Ranjan R. Magnetoacoustic emission, magnetization and Barkhausen effect in decarburized steels / R. Ranjan, D.S. Jiles, P.K. Rastogi. – Текст: непосредственный // IEEE Trans. Magn. – 1986. – V. 22. – I. 5. – P. 511–513.

19. Иванова Й. Сравнительные измерения напряженного состояния проката углеродистой стали посредством шума Баркгаузена и ультразвука / Й. Иванова, Т. Парталин. – Текст: непосредственный // Дефектоскопия. – 2012. – № 2. – С. 83–94.
20. Piotrowski, L. On the correlation between magnetoacoustic emission and magnetostriction dependence on the applied magnetic field / L. Piotrowski, M. Chmielewski, B. Augustyniak. – Текст: непосредственный // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2016. – V. 410. – P. 34–40.
21. Magnetic Barkhausen Noise and Magneto Acoustic Emission in Stainless Steel Plates / M.R.N. Astudillo, N. Núñez, P.M.I. López [и др.]. – Текст: непосредственный // Procedia Materials Science. – 2015. – V. 8. – p. 678–682.
22. Skalsky V.R. Nondestructive evaluation of pipelines: magnetoacoustic diagnostics of deformation / V.R. Skalsky, S.I. Hirnyj, R.N. Basarab. – Текст: непосредственный // Oil and Gas Business. – 2013. – No. 5. – P. 301–313.
23. Piotrowski L. The influence of elastic deformation on the properties of the magnetoacoustic emission (MAE) signal for GO electrical steel / L. Piotrowski, M. Chmielewski, B. Augustyniak. – Текст: непосредственный // J. Mag. Mag. Mater. – 2014. – V. 324. – I. 16. – p. 2496–2500.
24. Костин В.Н. Амплитудно-частотные характеристики магнитоакустической эмиссии термобработанных сплавов железа / В.Н. Костин, М.А. Гурьев, О.Н. Василенко и [и др.]. – Текст: непосредственный // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т. 16. – № 5. – С. 103–110.
25. Dhar A. The effect of sample size on magneto-acoustic emission / A. Dhar, C. Jagadish, D.L. Atherton. – Текст: непосредственный // NDT & E International. – V. 24. – I. 1. – 1991. – P. 15–19.
26. Горкунов Э.С. Магнитоупругая акустическая эмиссия в ферромагнитных материалах 1. Влияние кристаллографической анизотропии / Э.С. Горкунов, Ю.Н. Драгошанский, В.А. Хамитов, В.М. Шевнин. – Текст: непосредственный // Дефектоскопия. – 2001. – № 3. – С. 3–23.
27. Горкунов Э.С. Магнитоупругая акустическая эмиссия в ферромагнитных материалах 2. Влияние упругих и пластических деформаций на параметры магнитоупругой акустической эмиссии / Э.С. Горкунов, Ю.Н. Драгошанский, В.А. Хамитов. – Текст: непосредственный // Дефектоскопия. – 2001. – № 12. – С. 3–30.
28. Горкунов Э.С. Магнитоупругая акустическая эмиссия в ферромагнитных материалах 3. Влияние структурных изменений на магнитоупругую акустическую эмиссию (обзор) / Э.С. Горкунов, А.И. Ульянов, В.А. Хамитов. – Текст: непосредственный // Дефектоскопия. – 2002. – № 5. – С. 86–112.
29. Филинов В.В. Контроль механических напряжений в изделиях из сталей на основе регистрации магнитных и магнитоакустических шумов перемагничивания / В.В. Филинов, А.В. Филинова. – Текст: непосредственный // Контроль. Диагностика. – 2007. – № 2. – С. 41–44.

