

**Механика материалов:
прочность, ресурс, безопасность****Materials mechanics:
strength, durability, safety**DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-8-49-57>**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ И МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ
НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОСТИ В КОНСТРУКЦИОННЫХ
СТАЛЯХ И СПЛАВАХ (ОБЗОР)**© **Алексей Геннадьевич Ефимов**¹¹ ЗАО «НИИИИ МНПО «СПЕКТР», Россия, 119048, Москва, ул. Усачева, д. 35, стр. 1; e-mail: grazier@mail.ru

*Статья поступила 13 декабря 2019 г. Поступила после доработки 10 февраля 2020 г.
Принята к публикации 30 марта 2020 г.*

Контроль напряженно-деформированного состояния, действующих напряжений, накопленной усталостной поврежденности — одна из задач неразрушающего контроля. В данном обзоре рассмотрены современные исследования в области вихретокового и электромагнитного методов, направленные на решение задачи контроля накопленной поврежденности в конструкционных сталях и сплавах. Отмечены разработки для практической реализации метода коэрцитивной силы, вихретоковой структуроскопии немагнитных материалов, метода высших гармоник, метода контроля по остаточной намагниченности, метода магнитных шумов (шумов Баркгаузена). Рассмотрены физические основы методов неразрушающего контроля, проведен их краткий сравнительный анализ. Приведены примеры контроля изделий ответственного назначения, таких как действующие нефте- и газопроводы, авиационные детали, детали подшипников, сосуды под давлением, детали кранового хозяйства и др. Исследована возможность применения вихретокового метода для контроля аустенитной фазы холоднокатаных аустенитных сталей (AISI 304, AISI 321, AISI 316). Показаны примеры статических и усталостных испытаний образцов из различных сталей и сплавов: Ст3, Ст20, Ст45, Д16Т, АМг6, АМг6Н, 12Х18Н9Т, 08Х18Н9, 40Х, Р91. Рассмотрены вопросы метрологии, отмечены мешающие параметры, влияющие на погрешность измерения. Для ряда методов продемонстрированы примеры используемой аппаратуры. Сделаны выводы о границах применимости указанных методов и существующих ограничениях. В обзорной статье приведены ссылки как на основополагающие труды в области электромагнитной структуроскопии, так и на современные исследования в данной области, имеющие значение для практического внедрения приборов, основанных на электромагнитном и магнитном методах неразрушающего контроля.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние; пластичность; разрушение; накопление повреждений; малоцикловая усталость; долговечность; ресурс; неразрушающий контроль; электромагнитный контроль; магнитный контроль.

**ELECTROMAGNETIC AND MAGNETIC METHODS OF NON-DESTRUCTIVE
TESTING FOR CONTROL OF DAMAGE ACCUMULATION
IN STRUCTURAL STEELS AND ALLOYS (REVIEW)**© **Alexey G. Efimov**¹¹ JSC RII "SPECTRUM", 35, str. 1, Usacheva ul., Moscow, 119048, Russia; e-mail: grazier@mail.ru

Received December 13, 2020. Revised February 10, 2020. Accepted March 30, 2020.

Control of the stress-strain state, compressive and tension stresses, accumulated fatigue damage is one of the goals of non-destructive testing. We consider data of current research in the field of eddy current and electromagnetic methods of non-destructive testing aimed at solving the problem of monitoring the accumulated damage in structural steels and alloys. Developments for practical implementation of the coercive force method, the eddy current structurescopy of non-magnetic materials, the method of higher harmonics and remanence-based control, the method of magnetic noise (Barkhausen noise) are considered. The physical foundations of non-destructive testing methods are considered along with their brief comparative analysis. Examples of non-destructive testing of critical units, such as operating oil and gas pipelines,

aircraft parts, bearing parts, pressure vessels, crane parts, etc. are given. The possibility of using the eddy current method for control of the austenitic phase of cold rolled austenitic steels (AISI 304, AISI 321, AISI 316) is analyzed. The examples of static and fatigue tests of the samples of various steels and alloys are given: St3, St20, St45, D16T, AMg6, AMg6N, 12Kh18N9T, 08Kh18N9, 40Kh, R91. Metrology issues and the impact of interfering parameters affecting the measurement error are considered. The equipment used for a number of methods is discussed. Conclusions regarding the limits of applicability and limitations of the considered methods are drawn. The review provides links to both the fundamental works in the field of electromagnetic structurescopy and to modern research in this area which is important for the practical implementation of the devices based on electromagnetic and magnetic methods of non-destructive testing.

Keywords: stress-strain state; ductility; fracture; damage accumulation; low-cycle fatigue; durability; resource; non-destructive testing; electromagnetic control; magnetic control.

Введение

Электромагнитная структуроскопия позволяет контролировать качество структуры и анализировать состав проводящих ток материалов с помощью вихретокового метода, метода высших гармоник (МВГ), метода шумов Баркгаузена, метода нелинейных искажений, метода коэрцитивной силы и других методов, связанных с воздействием на контролируемый объект переменных (иногда в комбинации с постоянными) электромагнитных полей. Возможности электромагнитных методов определяются наличием связи между структурным состоянием, механическими свойствами материала, а также его электрическими и магнитными характеристиками: электропроводностью, магнитной проницаемостью, коэрцитивной силой и др.

Помимо таких классических задач электромагнитной структуроскопии, как определение степени химической чистоты материалов и сплавов, сортировка по химическому составу, контроль нарушения режимов термообработки, контроль обезуглероживания, также можно выделить контроль накопленной поврежденности, выявление участков возможных будущих разрушений, определение оставшегося запаса прочности и ресурса детали. Существует ряд фундаментальных трудов по электромагнитной и магнитной структуроскопии [1 – 5], однако контроль напряженно-деформированного состояния (НДС) в должной мере в них не освещен. Вызывает также интерес одна из немногочисленных публикаций [6], посвященная методу высших гармоник (МВГ).

В работе [7] приведены результаты исследований механических свойств сталей и сплавов с использованием различных методов неразрушающего контроля — акустической эмиссии, магнитной памяти металла, вихретокового метода, метода коэрцитивной силы. Проведена качественная и количественная оценка результатов, полученных различными методами на одних и тех же образцах из стали 20, стали 45 и 12X18N9T в результате статического растяжения

и усталостных испытаний. Изучена стадийность процесса разрушения.

Данный обзор является продолжением исследований в области контроля поврежденности материала и выполнен в целях расширения диапазона применяемых методов неразрушающего контроля. Рассмотрено текущее состояние исследований в перспективной области контроля НДС и прогнозирования остаточного ресурса на основе анализа фундаментальных публикаций, энциклопедий, справочников, материалов российских и международных конференций по неразрушающему контролю и технической диагностике.

Метод высших гармоник

Метод высших гармоник (МВГ) традиционно применяют для контроля структуры ферромагнитных изделий. В отличие от метода вихревых токов в этом методе, помимо первой гармоники вторичной ЭДС (или вместе с ней), используют высшие гармоники, которые более тесно, чем первая, связаны с чувствительными к структуре параметрами. Третья гармоника менее, чем первая, подвержена влиянию изменения магнитного потока в зазоре между объектом контроля и измерительной обмоткой. Метод высших гармоник широко применяют для контроля структуры таких ферромагнитных материалов, как сталь и чугун. Структура ферромагнетика тесно связана с его прочностными характеристиками: усталостной поврежденностью, остаточными и упругими напряжениями, пределом прочности и т.д.

В последние годы не часто встречаются публикации, посвященные этому методу неразрушающего контроля [8, 9]. В МВГ чаще всего используют проходные преобразователи, описание накладных преобразователей для контроля структуры методом высших гармоник встречается очень редко. Поэтому вызывает интерес работа [10], в которой изложены результаты изучения влияния усталостной поврежденности подшипников на амплитуду высших гармоник выходного сигнала накладного преобразователя с разделенными магнитопроводами. Показано,

что по амплитуде седьмой гармоники можно судить о развитии субмикротрещин до размеров микротрещин, что позволило создать прибор, устанавливающий ресурс работы подшипников. На текущий момент единственным серийно выпускаемым в РФ структуроскопом, основанным на методе высших гармоник, является вихретоковый структуроскоп ВС3010, производимый компанией ООО «АКА-контроль».

Вихретоковая структуроскопия немагнитных материалов

Вихретоковую структуроскопию немагнитных металлов и сплавов чаще всего используют для сортировки сплавов по маркам, контроля режимов термоупрочнения, обнаружения локальных аномальных участков, имеющих отклонение от значения удельной электрической проводимости, вызванное производственным браком или эксплуатационными воздействиями.

Разработкой вихретокового метода контроля механических характеристик алюминиевых сплавов начали заниматься достаточно давно. Основные работы проводили во Всесоюзном институте авиационных материалов (ВИАМ) и Всесоюзном институте легких сплавов (ВИЛС). В настоящее время эту работу продолжают в ЗАО «НИИИМ МНПО «СПЕКТР», и связана она с построением указанных зависимостей для новых сплавов и полуфабрикатов из них. В первую очередь это актуально для высокопрочных гранулируемых сплавов, а также сплавов с Li и Sc.

Для большинства традиционных алюминиевых сплавов получены корреляционные зависимости предела прочности, предела текучести и относительного удлинения от удельной электрической проводимости [11]. Таким образом, используя поля корреляционных зависимостей для выбранных сплавов и полуфабрикатов, после измерения удельной электрической проводимости можно определить с достаточной для практики точностью механические характеристики изделия. Исследования показали, что изделия из одного и того же сплава с разной удельной электрической проводимостью обладают разной малоцикловой усталостью (МЦУ). На основании полученных данных можно сделать вывод, что чем меньше удельная электрическая проводимость и выше статическая прочность изделия из одного и того же сплава, тем дольше оно будет работать в условиях циклических нагрузок. По значениям удельной электрической проводимости не только определяют механические характеристики изделий, но и прогнозируют сопротивление разрушению при усталости.

В работе [12] представлены данные измерения удельной электропроводности в зависи-

мости от деформации, накапливаемой в образцах из сплава АМг6 при кратковременном растяжении по программе $de/dt = \text{const}$ и после длительных испытаний на ползучесть. Ученые ЗАО «НИИИМ МНПО «СПЕКТР» совместно с коллегами АО «ЦНИИмаш» проводили научно-исследовательские работы в целях определения анизотропии механических свойств алюминиевых сплавов. Полученные данные не публиковались в виду «закрытой» специфики контролируемых изделий. Для контроля анизотропии удельной электрической проводимости использовали накладные вихретоковые преобразователи (ВТП) с несимметричной формой обмоток, имеющих значительно отличающуюся протяженность по осям в плоскости, параллельной поверхности объекта контроля. Вращая накладной преобразователь вокруг его вертикальной оси, фиксировали максимальное и минимальное значения удельной электрической проводимости и делали вывод о направлении, вдоль которого материал испытывал максимальную деформацию. В результате НИОКР был создан измеритель анизотропии удельной электрической проводимости ВАЭ-10Н.

В работах [13, 14] приведена методология оценки накопленной поврежденности в аустенитной стали, вызванной циклическими нагрузками. Исследования проводили вихретоковым и ультразвуковым методами. Полученные данные показали, что циклическая нагрузка приводит к увеличению объема мартенситной фазы, тем самым усиливая пластическую деформацию, и, как следствие, приводит к увеличению поврежденности в аустенитной фазе, имеющей более низкую прочность и жесткость. Приведены результаты экспериментальных исследований, проведена сравнительная оценка данных, полученных разными методами неразрушающего контроля. В эксперименте использовали ферритометр ИМП-2М, откалиброванный на образце с известным значением ферритной фазы.

В работе [15] рассмотрена возможность вихретокового неразрушающего контроля свойств холоднокатаных аустенитных сталей (AISI 304, AISI 321, AISI 316). Рассмотрено влияние режимов прокатки на объем аустенитной фазы. Измерена фаза вносимого напряжения ВТП на образце до и после прокатки. Установлена взаимосвязь между изменением фазы вносимого напряжения ВТП и объемом аустенитной фазы.

Метод магнитных шумов Баркгаузена

При намагничивании и перемагничивании ферромагнитных материалов намагниченность представляет собой набор дискретных изменений. Суть эффекта состоит в перемещении стенок магнитных доменов при монотонном и не-

прерывном внешнем воздействии, таком как изменение упругих напряжений, температуры или напряженности магнитного поля.

Диапазон частот энергетического спектра шумов Баркгаузена ограничен снизу частотой внешнего намагничивающего поля и чаще всего не превышает 0,5 МГц для большинства конструкционных материалов. Экспоненциальное затухание шума происходит при удалении от поверхности материала. На затухание влияют такие параметры, как электропроводность и магнитная проницаемость контролируемого материала, а также частотный диапазон внешнего намагничивающего поля. Интенсивность шумов Баркгаузена зависит от приложенного усилия и микроструктуры материала. Глубина контролируемого слоя не превышает нескольких миллиметров. Точность определения одно- и двухосных поверхностных напряжений зависит от соответствия микроструктур калибровочного и испытываемых образцов.

Недостаток метода — зависимость от качества подготовки поверхности. Отмечено [16, 17] значительное влияние поверхностно-пластического деформирования на шумы Баркгаузена. Проведенные эксперименты показали, что увеличение напряжений до 400 МПа приводит к росту выходного сигнала в 1,6 раза, однако присутствие на поверхности наклепа может изменить выходной сигнал в десятки раз. Указанный факт является одним из серьезных ограничений практического применения данного метода на реальных объектах контроля.

Опубликованы [18] данные экспериментального исследования усталостной деградации металла с помощью метода магнитных шумов. Изучена взаимосвязь шумов Баркгаузена с изменением микроструктуры ферромагнитных материалов в процессе усталостного старения.

В статье [19] приведены результаты математического моделирования двухосного НДС материала, подтвержденные экспериментальными данными, полученными для образца типа «крест» квазиоптимальной формы при двухосном нагружении. Проведенный эксперимент подтвердил инвариантность магнитошумового метода на эффекте Баркгаузена при произвольных изменениях шаровой компоненты тензора напряжений.

В работе [20] представлен пример практической реализации системы дистанционного контроля НДС труб большого диаметра на основании измерения параметров магнитного шума. Описаны электронные части измерительной системы и системы передачи данных, построенной на базе мобильной сети. Приведены параметры шумов Баркгаузена, полученные для ряда образцов из трубной стали.

Магнитошумовой метод, или метод шумов Баркгаузена, реализован в ряде приборов, предназначенных для измерения механических напряжений металлоконструкций. Примером могут служить приборы типа Stresscan 500, Rollscan 300, INTROSCAN и т.п. Средства неразрушающего контроля, основанные на данном методе, способны определять величину напряжений только в тонком поверхностном слое, что существенно ограничивает их практическое применение. Необходимо учитывать, что состояние поверхностного слоя может значительно отличаться от состояния основного металла. Поверхностный слой, подверженный внешним воздействиям, часто имеет наклеп, царапины, а также возникающие в процессе производства зоны с азотированием и цементацией. Однако для проведения НК интерес представляет зона поврежденности, а именно в поверхностном слое происходит зарождение трещин.

Магнитная структуроскопия (метод коэрцитивной силы)

В основе метода коэрцитивной силы (H_c) лежит взаимосвязь между магнитными свойствами металлов и сплавов, их структурно-фазовым состоянием и механическими свойствами. Корреляционные зависимости между коэрцитивной силой и степенью остаточной деформации образцов позволяют установить степень поврежденности металла и его упругую пластическую деформацию. Также можно говорить об оценке остаточного ресурса конструкции. Для ряда конструкционных сталей, таких, например, как Ст3, данная взаимосвязь однозначна и подлежит численной оценке. Установлено, что для малоуглеродистых и низколегированных сталей средний размер ферритного зерна является основным параметром, который определяет их прочностные и магнитные свойства.

Для большинства низкоуглеродистых сталей, используемых в конструкциях ответственного назначения, как правило, существует корреляция между механическими и магнитными свойствами. Метод коэрцитивной силы успешно применяют для установления начала пластической деформации в элементах крановых, лифтовых конструкций и при контроле сосудов, находящихся под давлением.

Основные факторы, влияющие на погрешность измерения коэрцитивной силы: толщина объекта контроля и величина немагнитного зазора между преобразователем и контролируемой поверхностью. Настройку и поверку всех коэрцитиметров проводят на стандартных образцах, имеющих строго определенные геометрические размеры (комплект стандартных образцов коэр-

цитивной силы — СОКС). В этом случае на показания магнитных структуроскопов не учитывается погрешность, вызванная влиянием толщины изделия в зоне контроля. Разница показаний на тонком листе и массивной плите, изготовленных из одного и того же материала, может достигать 20 %. При уменьшении толщины лабораторных образцов в два раза (например, с 10 до 5 мм) значение коэрцитивной силы меняется на 5 %, что сравнимо с допускаемой основной погрешностью измерения прибора. Расчет дополнительных экспериментально полученных поправок представлен в [21].

В работе [22] исследовано влияние немагнитного покрытия на поверхности металла на результаты коэрцитиметрии. Это важно для магнитного контроля конструкций с защитными покрытиями, например нефтегазовых трубопроводов. Пассивная защита труб от коррозии предполагает применение антикоррозионного покрытия. В случае удаления покрытия для проведения измерений необходимо его обязательное восстановление. Рассмотрено влияние структуры трубных сталей на анизотропию коэрцитивной силы при продольном растяжении.

На глубину промагничивания металла влияют в основном габаритные размеры полюсной системы преобразователя и сила тока намагничивания, для большинства портативных коэрцитиметров эта глубина не превышает 20 – 30 мм [2].

Интересные результаты представлены в работе [22], посвященной оценке НДС нефте- и газопроводов с помощью метода коэрцитивной силы. Получены экспериментальные зависимости показаний магнитного структуроскопа (коэрцитиметра) от величины касательных напряжений — коэрцитивную силу измеряли в двух взаимно перпендикулярных направлениях вдоль образующих трубы. Подтверждено увеличение разности значений коэрцитивной силы, полученных для продольного и поперечного расположений преобразователя при росте касательных напряжений. С точки зрения практики полезной следует считать предложенную методику определения максимальной величины относительной деформации материала, которая на основании полученных значений коэрцитивной силы в четырех точках одного сечения трубопровода позволяет рассчитать коэрцитивную силу ненагруженного металла и оценить параметры напряженно-деформированного состояния конструкции.

В схожих исследованиях [23, 24] рассмотрены аналитические зависимости между остаточной намагниченностью, коэрцитивной силой и максимальной магнитной проницаемостью металла, полученные для напряженного и ненапряженного состояний. Исследования проводили для

трубных сталей, особое внимание уделяли околошовной зоне. Доказано, что механические напряжения не изменяют характер установленной ранее взаимосвязи между магнитными характеристиками, полученной для ненапряженного состояния металла.

В [25] рассмотрена применимость магнитных параметров для контроля остаточных напряжений в ферромагнитных конструкционных сталях. Установлена однозначная корреляция коэрцитивной силы, начальной магнитной проницаемости, обратимой магнитной проницаемости в остаточном состоянии и отношения начальной и обратимой проницаемостей с уровнем микронапряжений для железа Armco. Таким образом, продемонстрированы перспективы использования этих параметров для оценки остаточных напряжений в ферромагнитных конструкционных материалах. Показано, что отношение обратимой магнитной проницаемости в остаточном состоянии к начальной магнитной проницаемости более чувствительно к изменению микронапряжений, чем традиционно используемая коэрцитивная сила.

В статье [26] показано, что механические свойства стали 40X монотонно изменяются при изменении температуры отпуска после закалки и имеют корреляционную зависимость. Получены уравнения линейной регрессии, определены коэффициенты корреляции и итоговая расчетная погрешность. Показано, что твердость HRC стали 40X не имеет однозначной зависимости от ее коэрцитивной силы во всем диапазоне изменения температуры отпуска. При этом значительная погрешность измерения не позволяет использовать для контроля твердости стали 40X такой параметр контроля, как релаксационная намагниченность. Для магнитной структуроскопии предложен параметр H_{c1} , для расчета которого использована коэрцитивная сила H_c , измеренная на образцах из стали 40X, и отношение остаточной намагниченности к намагниченности технического насыщения. Показано, что полученные результаты имеют невысокую относительную погрешность и устанавливают однозначную взаимосвязь между H_{c1} и температурой отпуска стали 40X в реально применяемом на практике диапазоне. Доказано, что метод коэрцитивной силы может применяться для контроля твердости стали 40X.

В [27] предложена оригинальная конструкция преобразователя магнитного структуроскопа (коэрцитиметра). Преобразователь предназначен для контроля напряженного состояния и накопленной поврежденности контролируемого ферромагнитного материала. П-образный приставной преобразователь состоит из постоянных магнитов из NdFeB, связанных перемычкой из магни-

томягкого материала. Чувствительным элементом является датчик Холла, расположенный в межполюсном интервале и измеряющий тангенциальную составляющую напряженности магнитного поля. К преимуществам такого преобразователя следует отнести возможность непрерывного измерения параметров и низкое электропотребление. Авторами установлена однозначная связь между тангенциальной компонентой магнитного поля в межполюсном пространстве и магнитной проницаемостью материала. К недостаткам предложенной конструкции следует отнести невозможность применения на объектах сложной криволинейной формы.

В [28] рассмотрена дополнительная погрешность измерения коэрцитивной силы, вызванная работой по частным кривым намагничивания. Измерения проводили на образцах из стали Q235 при различных значениях тока возбуждения намагничивающего устройства.

Изменение магнитных свойств при деформации нержавеющей стали 08X18H9, относящейся к аустенитному классу, рассмотрено в [29]. Установлена взаимосвязь между действующими напряжениями (деформациями) и измеренными значениями коэрцитивной силы, а также объемом α -фазы в металле. Доказана возможность применения метода коэрцитивной силы для оценки деградации и снижения механических свойств сталей аустенитного класса, подвергающихся деформационным воздействиям в ходе эксплуатационных воздействий.

В [30] представлены результаты исследования влияния пластической деформации на магнитные свойства образцов из мартенситной стали Р91. Исследования параметров петли гистерезиса и магнитных шумов Баргаузена проводили для случая одноосного растяжения и сжатия со значением пластической деформации $\varepsilon = 10\%$. Выбор материала и диапазона деформации объясняется ожидаемыми высокими остаточными напряжениями в материале (для случая как сжатия, так и растяжения), который не демонстрирует повышения интенсивности магнитных шумов как функции упругих напряжений. Полученные соотношения показывают, что при низком уровне деформации изменения плотности дислокаций могут играть доминирующую роль, однако при более высоком ее уровне остаточные напряжения становятся доминирующим фактором. Это приводит к значительному уменьшению сигнала шумов Баркагузена для деформации растяжения и увеличению — для случая сжатия. Оба варианта нагружения приводят к повышению коэрцитивной силы образцов, однако растяжение сильнее влияет на ее изменение.

Контроль НДС по остаточной намагниченности металла

Еще один метод контроля напряженно-деформированного состояния основан на измерении напряженности поля остаточной намагниченности металла. Увеличение действующих механических напряжений приводит к монотонному уменьшению остаточной намагниченности вплоть до начала пластической деформации металла. Установлено, что напряженность поля остаточной намагниченности металла деформированного стального изделия, элемента металлоконструкции линейно возрастает с повышением механического напряжения во всей области деформации металла. Чувствительность остаточной намагниченности металла к действующим механическим напряжениям соизмерима с чувствительностью магнитных шумов металла. Процесс измерения разбивают на два этапа: на первом этапе с помощью мощного постоянного магнита намагничивают локальный участок ферромагнитного объекта контроля, на втором этапе измеряют значения напряженности остаточного магнитного поля с помощью магнитометра или миллитесламетра.

В работах [31 – 34] исследовано влияние изменения химического состава и структуры металла конструкционных сталей на результаты магнитного контроля его напряженно-деформированного состояния по напряженности поля остаточной намагниченности. Показана возможность выявления локальных областей с значительными изменениями химсостава. Магнитный контроль по остаточной намагниченности также позволяет выявить НДС металла и определить причину его возникновения. Установлено, что увеличение содержания углерода в стали в незначительной степени влияет на напряженность поля остаточной намагниченности металла, хотя и приводит к изменению других магнитных параметров.

Результаты исследования напряженности поля остаточной намагниченности стальных труб, которые подвергаются воздействию изгибающего и крутящего механических моментов, приведены в [32]. Обобщенные выражения, характеризующие взаимосвязь между механическими и магнитными величинами, а также расчетные зависимости для напряженности поля остаточной намагниченности металла получены как для одноосного напряженного состояния металла, так и для приложенного крутящего момента. Показана однозначная взаимосвязь между величиной напряженности поля остаточной намагниченности и действующим крутящим моментом, однако отмечено, что на результаты измерений значительное влияние оказывают

геометрические размеры сечения трубы в зоне контроля.

Выводы

Методы магнитной и электромагнитной структуроскопии можно успешно применять для контроля накопленной поврежденности и напряженно-деформированного состояния, однако каждый из них имеет ряд ограничений. Для метода высших гармоник — это преимущественное использование проходных преобразователей и влияние формы объекта контроля. Для вихре-токовой структуроскопии немагнитных материалов зависимости получены преимущественно для авиационных алюминиевых сплавов, в то время как для титановых сплавов корреляционных зависимостей между удельной электрической проводимостью и накопленной поврежденностью в результате проведенных исследований установлено не было. Для метода коэрцитивной силы основные ограничения — влияние толщины контролируемого изделия на результаты измерения коэрцитивной силы, а также невозможность локального измерения, поскольку зона, для которой проводится интегральная оценка, определяется габаритными размерами магнитопровода преобразователя. Метод магнитных шумов Баркгаузена позволяет получить оценку только для приповерхностного слоя и требует высокой квалификации специалиста для расшифровки результатов. Метод контроля по остаточной намагниченности обладает такими же недостатками, что и метод коэрцитивной силы, за исключением чуть лучшей локальности контроля. Несмотря на указанные ограничения, электромагнитные методы широко применяют в разработанных средствах неразрушающего контроля, предназначенных для экспресс-анализа структурных аномалий металлоизделий.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 19-19-00674.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дорофеев А. Л., Ершов Р. Е. Физические основы электромагнитной структуроскопии. — Новосибирск: Наука, 1985. — 172 с.
2. Михеев М. Н., Горкунов Э. С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. — М.: Наука, 1993. — 252 с.
3. Бида Г. В. Магнитные свойства термоупрочненных сталей и неразрушающий контроль их качества. — М.: Маршрут, 2006. — 304 с.
4. Нячишурок А. П. Модель магнитного гистерезиса и ее применение в магнитной структуроскопии конструкционных сталей: дис. ... докт. техн. наук. — Екатеринбург, 2007. — 262 с.
5. Клюев В. В., Мужикский В. Ф., Горкунов Э. С., Щербинин В. Е. Неразрушающий контроль: Справочник / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 6. Магнитные методы контроля. — М.: Машиностроение, 2006. — 827 с.
6. Покровский А. Д., Хвалебнов Ю. П. Метод высших гармоник в электромагнитной дефектоскопии. — М.: Машиностроение, 1980. — 55 с.
7. Тютин М. Р., Ботвина Л. Р., Левин В. П., Ефимов А. Г. и др. Исследование механических свойств конструкционных сталей акустическими и магнитными методами / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 7. С. 44 – 48.
8. Соковец К. А. Магнитный контроль параметров ферромагнитных объектов методом высших гармоник: магистерская диссертация. — Томск: ТПУ, ИШНКБ, 2018. — 92 с.
9. Кошельников В. С., Покровский А. Д. Исследование сигналов вихревого преобразователя при контроле методом высших гармоник / Вестник МЭИ. 2016. № 3. С. 50 – 53.
10. Зайченко Г. М., Зайцев А. М., Куракин Г. М. Применение метода высших гармоник для оценки работоспособности деталей подшипников качения / Неразрушающий контроль электромагнитными методами. Материалы конференции. Сб. 1. — М.: МДНТП, 1971. С. 79 – 84.
11. Бакунов А. С., Мужикский В. Ф., Попов Б. Е. Контроль механических свойств алюминиевых сплавов электромагнитным методом / Дефектоскопия. 1995. № 3. С. 61 – 67.
12. Хайлов А. Н., Пенькова Т. Н., Бакунов А. С., Мужикский В. Ф. и др. Неразрушающий контроль механических характеристик алюминиевых сплавов по удельной электрической проводимости / Дефектоскопия. 2006. № 7. С. 3 – 14.
13. Филинов В. В., Резников Ю. А., Вагин А. В., Кузнецов Н. С. Опыт применения метода эффекта Баркгаузена для контроля напряженного состояния деталей из высокопрочной стали / Дефектоскопия. 1992. № 5. С. 17 – 20.
14. Mishakin V. V., Klyushnikov V. A., Gonchar A. V., Kachanov M. On assessing damage in austenitic steel based on combination of the acoustic and eddy current monitoring / Int. J. Engin. Sci. 2019. Vol. 135. P. 17 – 22.
15. Гончар А. В., Бизяева О. Н., Ключников В. А., Мишакин В. В. Исследование ультразвуковым и вихревым методами процесса пластического деформирования сварного соединения из аустенитной стали / Дефектоскопия. 2016. № 10. С. 76 – 83.
16. Khan S. H., Farhad Ali, Iqbal M. A., Khan A. Nusair. Eddy current detection of changes in stainless steel after cold reductions / NDT. Net Journal. 2007. P. 1 – 6.
17. Горкунов Э. С., Драгошанский Ю. Н., Маховски М. Эффект Баркгаузена и его использование в структуроскопии ферромагнитных материалов / Дефектоскопия. 1998. № 1. С. 5 – 27.
18. Венгринович В. Л., Винтов Д. А. Распределение шумов баркгаузена в зоне концентрации напряжений при усталостных испытаниях стали 10ХСНД / Контроль. Диагностика. 2015. № 8. С. 31 – 38.
19. Венгринович В. Л., Винтов Д. А., Прудников А. Н., Подуольников П. А. и др. Особенности измерения напряжений в ферромагнетиках методом эффекта Баркгаузена / Контроль. Диагностика. 2017. № 8. С. 10 – 17.
20. Гарифуллин Н. М. Система дистанционного контроля напряженно-деформированного состояния трубопроводов на базе электромагнитного метода / Вестник башкирского университета. 2017. Т. 22. № 2. С. 336 – 339.
21. Агиней Р. В. Разработка методики оценки напряженного состояния нефтегазопроводов по коэрцитивной силе металла: дис. ... канд. техн. наук. — Ухта, 2005. — 143 с.
22. Бердник М. М. Развитие метода оценки напряженно-деформированного состояния нефтегазопроводов по коэрцитивной силе металла: дис. ... канд. техн. наук. — Ухта, 2010. — 175 с.
23. Сандомирский С. Г. Взаимосвязь между магнитными параметрами металла околошовной зоны трубных сталей при действии касательных и нормальных напряжений / Деформация и разрушение материалов. 2016. № 10. С. 30 – 34.

24. **Сандомирский С. Г.** Взаимосвязь между магнитными параметрами металла трубных сталей в напряженном состоянии. — В сб.: *Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций*. — Екатеринбург: Изд. ИМАШ УрО РАН, 2016. С. 121.
25. **Gorkunov E. S., Zadvorkin S. M., and Goruleva L. S.** Correlation of residual stresses with magnetic properties of Ar-mco iron / AIP Conference Proceedings 2053,030022 (2018).
26. **Сандомирский С. Г.** Корреляционные зависимости между механическими свойствами и магнитным параметром стали 40х / *Механика машин, механизмов и материалов*. 2019. № 3(48). С. 43 – 50.
27. **Zakharov V., Bezlyudko G., Solomakha R., Aman A.** Monitoring of Fatigue and Stress-Strain State of Structures and Equipment with New Magnetic Transducer / WCNDT 2016, Book of Abstracts. II. P. 1 – 4.
28. **Xin W., Ding K., Lv Q.** Theory and Experimental Study on Magnetic Monitoring of Steel Structure Fatigue Damage Based on Different Exciting Current / 7th Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring. 2018. <https://www.ndt.net/article/apwshnm2018/papers/94.pdf> (дата доступа 26 ноября 2019).
29. **Нехотящий В. А., Палиенко А. Л., Гопкало А. П.** Оценка деградации стали 08X18H9 по кинетике коэрцитивной силы / В мире неразрушающего контроля 2015. Т. 18. № 4. С. 14 – 16.
30. **Piotrowski L., Chmielewski M., Kowalewski Z.** The Dominant Influence of Plastic Deformation Induced Residual Stress on the Barkhausen Effect Signal in Martensitic Steels / Journal of Nondestruct Evaluation. 2017. N 36. DOI: 10.1007/s10921-016-0389-x.
31. **Загидулин Р. В., Загидулин Т. Р., Мардамшин В. Р., Бакиев Т. А.** К вопросу контроля сложного напряженного состояния металла стальных труб. Расчет напряженности поля остаточной намагниченности при сложном сопротивлении металла / Нефтегазовое дело. 2019. Т. 17. № 1. С. 91 – 98. DOI: 10.17122/ngdelo-2019-1-91-98.
32. **Загидулин Р. В., Загидулин Т. Р., Осипов К. О.** Исследование влияния структуры и элементного состава сплава на результаты магнитного контроля напряженного состояния металла / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 7. С. 55 – 61. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-7-55-61.
33. **Загидулин Р. В., Загидулин Т. Р., Аминев А. Ф., Осипов К. О.** К вопросу непрерывного магнитного контроля напряженно-деформированного состояния металла по напряженности поля остаточной намагниченности / Нефтегазовое дело. 2017. Т. 15. № 1. С. 169 – 174.
34. **Загидулин Т. Р.** Исследование и разработка метода локального магнитного контроля напряженно-деформированного состояния металла элементов корпусного оборудования и металлоконструкций: дис. ... канд. техн. наук. — Уфа, 2015. — 134 с.
6. **Pokrovsky A. D., Khvalebnov Yu. P.** The method of higher harmonics in electromagnetic defectoscopy. — Moscow: Mashinostroenie, 1980. — 55 p. [in Russian].
7. **Tyutin M. R., Botvina L. R., Levin V. P., Efimov A. G., et al.** Evaluation of Cyclic Damage of Structural Steels by Acoustic and Magnetic NDT Methods / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2017. Vol. 83. N 7. P. 44 – 48 [in Russian].
8. **Sokovets K. A.** Magnetic Control of Ferromagnetic Objects Parameters by Higher Harmonics Method. Master's Thesis. — Tomsk: TPU, ISHNKB, 2018. — 92 p. [in Russian].
9. **Koshel'nikov V. S., Pokrovskii A. D.** Study of Eddy Current Probe Signals During Control by Higher Harmonics Method / Vestn. MEI. 2016. N 3. P. 50 – 53 [in Russian].
10. **Zaivenko G. M., Zaitsev A. M., Kurakin G. M.** The Application of the Method of Higher Harmonics to Assess the Performance of Parts of Rolling Bearings / Non-destructive Testing by Electromagnetic Methods. Chapter I. — Moscow: MDNTP, 1971. P. 79 – 84 [in Russian].
11. **Bakunov A. S., Muzhitskii V. F., Popov B. E.** The Control of the Mechanical Properties of Aluminum Alloys by the Electromagnetic Method / Defektoskopiya. — 1995. N 3. P. 61 – 67 [in Russian].
12. **Khailov A. N., Pen'kova T. N., Bakunov A. S., Muzhitskii V. F., et al.** Non-destructive Testing of the Mechanical Characteristics of Aluminum Alloys by Electrical Conductivity / Defektoskopiya. 2006. N 7. P. 3 – 14 [in Russian].
13. **Filinov V. V., Reznikov Yu. A., Vagin A. V., Kuznetsov N. S.** The Experience of Applying the Barkhausen Effect Method to Control the Stress State of Parts Made of High-strength Steel / Defektoskopiya. 1992. N 5. P. 17 – 20 [in Russian].
14. **Mishakin V. V., Klyushnikov V. A., Gonchar A. V., Kachanov M.** On assessing damage in austenitic steel based on combination of the acoustic and eddy current monitoring / Int. J. Engin. Sci. 2019. Vol. 135. P. 17 – 22.
15. **Gonchar A. V., Bizyaeva I. T., Klyushnikov V. A., Mishakin V. V.** Ultrasonic and Eddy-current Research of the Process of Plastic Deformation of a Welded Joint Made of Austenitic Steel / Defektoskopiya. 2016. N 10. P. 76 – 83 [in Russian].
16. **Khan S. H., Farhad Ali, Iqbal M. A., Khan A. Nusair.** Eddy current detection of changes in stainless steel after cold reductions / NDT. Net Journal. 2007. P. 1 – 6.
17. **Gorkunov E. S., Dragoshanskii Yu. N., Makhovski M.** The Barkhausen Effect and its Implementation in the Structuroscopy of Ferromagnetic Materials / Defektoskopiya. 1998. N 1. P. 5 – 27 [in Russian].
18. **Vengrinovich V. L., Vintov D. A.** Barkhausen Noise Distribution in the Stress Concentration Zone During Fatigue Tests of 10HSND Steel / Kontrol'. Diagnostika. 2015. N 8. P. 31 – 38 [in Russian].
19. **Vengrinovich V. L., Vintov D. A., Prudnikov A. N., Podugol'nikov P. A.** Features of Measuring Stresses in Ferromagnets by the Barkhausen Effect Method / Kontrol'. Diagnostika. 2017. N 8. P. 10 – 17 [in Russian].
20. **Garifullin N. M.** Remote the Stress-strain State Pipelines Control System Based on the Electromagnetic Method / Vestn. Bashkir. Univ. 2017. Vol. 22. N 2. P. 336 – 339 [in Russian].
21. **Aginei R. V.** Development of a Methodology for Assessing the Stress State of Oil and Gas Pipelines by the Coercive Force of a Metal. Candidate's thesis. — Ukhta, 2005. — 143 p. [in Russian].
22. **Berdnik M. M.** Development of a Method for Assessing the Stress-strain State of Oil and Gas Pipelines by the Coercive Force of a Metal. Candidate's thesis. — Ukhta, 2010. — 175 p. [in Russian].
23. **Sandomirskii S. G.** The Relationship Between the Magnetic Parameters of the Metal of the Weld Zone of Pipe Steels Under the Action of Tangential and Normal Stresses / Deform. Razrush. Mater. 2016. N 10. P. 30 – 34 [in Russian].
24. **Sandomirskii S. G.** The Relationship Between the Magnetic Parameters of the Metal Pipe Steel in Tension / Mechanics, resource and diagnostics of materials and structures. Collection of materials. — Yekaterinburg: Izd. IMASH Uro RAN, 2016. P. 121 [in Russian].

REFERENCES

1. **Dorofeev A. L., Ershov R. E.** Physical Basis of Electromagnetic Structuroscopy. — Novosibirsk: Nauka, 1985. — 172 p. [in Russian].
2. **Mikheev M. N., Gorkunov E. S.** Magnetic Methods of Structural Analysis and Non-destructive Testing. — Moscow: Nauka, 1993. — 252 p. [in Russian].
3. **Bida G. V.** Magnetic Properties and and Non-destructive Testing of Thermal Hardened Steel. — Moscow: Marshrut, 2006. — 304 p. [in Russian].
4. **Nichipuruk A. P.** Magnetic Hysteresis Model and its Application in the Magnetic Structuroscopy of Structural Steels. Doctoral Thesis. — Yekaterinburg, 2007. — 262 p. [in Russian].
5. **Klyuev V. V., Muzhitsky V. F., Gorkunov E. S., Shcherbinin V. E.** Non-destructive testing. Handbook / V. V. Klyuev (general editor). Vol. 6. Magnetic control methods. — Moscow: Mashinostroenie, 2006. — 827 p. [in Russian].

25. **Gorkunov E. S., Zadvorkin S. M., and Goruleva L. S.** Correlation of residual stresses with magnetic properties of Armco iron / AIP Conference Proceedings 2053,030022 (2018).
26. **Sandomirskii S. G.** Correlation Between Mechanical Properties and Magnetic Parameter of Steel 40x / Mekh. Mash. Mekhanizmov Mater. 2019. N 3(48). P. 43 – 50 [in Russian].
27. **Zakharov V., Bezlyudko G., Solomakha R., Aman A.** Monitoring of Fatigue and Stress-Strain State of Structures and Equipment with New Magnetic Transducer / WCNDT 2016, Book of Abstracts. II. P. 1 – 4.
28. **Xin W., Ding K., Lv Q.** Theory and Experimental Study on Magnetic Monitoring of Steel Structure Fatigue Damage Based on Different Exciting Current / 7th Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring. 2018. <https://www.ndt.net/article/apwshm2018/papers/94.pdf> (accessed November 26, 2019) [in Russian].
29. **Nekhotyashchii V. A., Palienko A. L., Gopkalo A. P.** Assessment of Degradation of Steel 08Kh18N9 According to the Kinetics of Coercive Force/ V Mire Nerazrush. Kontr. 2015. Vol. 18. N 4. P. 14 – 16 [in Russian].
30. **Piotrowski L., Chmielewski M., Kowalewski Z.** The Dominant Influence of Plastic Deformation Induced Residual Stress on the Barkhausen Effect Signal in Martensitic Steels/ Journal of Nondestruct Evaluation. 2017. N 36. DOI: 10.1007/s10921-016-0389-x.
31. **Zagidulin R. V., Zagidulin T. R., Mardamshin V. R., Bakiev T. A.** Issues of Controlling the Complex Stress State of Metal in Steel Pipes. Calculation of the Field Strength of the Remanent Magnetization with a Complex Metal Resistance / Neftegaz. Delo. 2019. Vol. 17. N 1. P. 91 – 98. DOI: 10.17122/ngdelo-2019-1-91-98 [in Russian].
32. **Zagidulin R. V., Zagidulin T. R., Osipov K. O.** Investigation of the Influence of the Structure and Elemental Composition of the Alloy on the Results of Magnetic Control of the Stress State of the Metal / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2018. Vol. 84. N 7. P. 55 – 61 DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-7-55-61 [in Russian].
33. **Zagidulin R. V., Zagidulin T. R., Aminev A. F., Osipov K. O.** Issues of Continuous Magnetic Control of the Stress-strain State of a Metal by the Field Strength of the Remanent Magnetization / Neftegaz. Delo. 2017. Vol. 15. N 1. P. 169 – 174 [in Russian].
34. **Zagidulin T. R.** Research and Development of a Local Magnetic Control Method of the Stress-strain State of Metal Elements of Hull Equipment and Metal Structures. Candidate's thesis. — Ufa, 2015. — 134 p. [in Russian].