



На правах рукописи

Соколов Роман Александрович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОНТРОЛЯ ЛОКАЛЬНЫХ  
НЕОДНОРОДНОСТЕЙ КОРРОЗИОННЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ  
СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ, ОБОРУДОВАНИЯ  
И СООРУЖЕНИЙ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ПЕТЛИ  
МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов,  
изделий, веществ и природной среды (технические науки)

Томск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский индустриальный университет» (ФГБОУ ВО «ТИУ»)

Диссертация посвящается памяти профессора, доктора физико-математических наук, заслуженного работника высшей школы Новикова Виталия Фёдоровича.

**Научный руководитель:**

**Муратов Камиль Рахимчанович**

кандидат технических наук, доцент, кафедра «Физика и приборостроение» Института промышленных технологий и инжиниринга ФГБОУ ВО «ТИУ», доцент

**Официальные оппоненты:**

**Бехер Сергей Алексеевич**

доктор технических наук, доцент, кафедра «Физика, электротехника, диагностика и управление в технических системах» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения», профессор

**Ничипурук Александр Петрович**

доктор технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России), главный научный сотрудник (лаборатория магнитного структурного анализа)

Защита состоится 04.06.2024 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.13 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: Национальный исследовательский Томский политехнический университет 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте [dis.tpu.ru](http://dis.tpu.ru) при помощи QR-кода.

Автореферат разослан 17.04.2024 г

Ученый секретарь  
диссертационного совета ДС.ТПУ.13  
кандидат технических наук, доцент

  
подпись

Шевелева Елена Александровна

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы**

Физико-механические свойства стали зависят от различных факторов, включая тип кристаллической решетки, химический состав, взаимодействие элементов и наличие различных дефектов структуры. Локальная неоднородность химического состава и структуры стали может вызывать различия свойств в отдельных областях материала и влиять на надежность и долговечность изделия, изготовленного из него.

Случайный многокомпонентный характер нагрузок, действующих на стальные конструкции в реальных условиях эксплуатации, приводит к ускорению процесса разрушения материала. Этот процесс усугубляет локальная неоднородность свойств стали. Поэтому возникает необходимость в проведении периодического контроля свойств стальных материалов для обеспечения надёжной, безопасной и бесперебойной работы изготавливаемых из них конструкций и оборудования.

Поиск критериев контроля физико-механических свойств стали или особенностей её структурных изменений осуществляется уже долгое время. Для достижения цели могут применяться магнитные методы неразрушающего контроля. Однако у корреляционных связей между магнитными параметрами, физико-механическими свойствами и структурой стали обнаруживаются недостатки, которые затрудняют их использование в качестве контрольных параметров. Так, например, известные зависимости коэрцитивной силы, остаточной намагниченности могут быть применимы лишь для узкого спектра структурных состояний или отражать закономерности для небольшого набора разных марок стали. Вследствие этого в науке и практике актуализируется значительная потребность в универсальных приборных методах и методиках определения физико-механических свойств и структуры стали, что подтверждается большим количеством опубликованных исследований данной тематики.

Относительная простота измерения магнитных характеристик стали способствует широкому распространению магнитных методов в целях контроля структурного состояния и физико-механических свойств. В совокупности с математическими методами обработки экспериментальных данных, измерение магнитных свойств позволяет преодолеть ряд ограничений в ситуации применения магнитных методов в реальных условиях. Для повышения достоверности определения физико-механических свойств стали магнитными методами используют многопараметровый подход.

### **Степень разработанности темы исследования**

Поиск приборных методов контроля механических и коррозионных свойств стали проводится на регулярной основе, что необходимо для проведения технического освидетельствования опасных производственных объектов. Основными методами контроля при этом являются разрушающие испытания, проводимые, в основном, в специализированных условиях. Необходимость проведения испытания в лабораторных условиях приводит к потребности в изготовлении специальных образцов установленной нормативно-технической документацией формы и размеров, а также к временным издержкам, связанным с особенностью проводимых испытаний и временем пробоподготовки. Именно по этим причинам по настоящий момент проводятся различные исследования, направленные на нахождение наиболее простого метода контроля механических и коррозионных свойств сталей, изделий и конструкций из них.

Возможность применения магнитных методов для контроля механических свойств исследовалась в работах В. В. Клюева, С. Г. Сандомирского, Э. С. Горкунова, В. А. Захарова, В. Н. Костина, В. Г. Кулеева, А. П. Ничипурука, В. Ф. Новикова и др. Кроме стандартных методов, основанных на измерении различных магнитных величин, в работах Н. Н. Зацепина, Г. М. Попова, П. М. Коваленко, Н. А. Потапова, М. А.

Карамышева, Г. А. Сайфутдинова, Н. О. Гусак, Ю. Ф. Понамарева рассматривается применение высших гармонических составляющих ЭДС индукции, наводимой во вторичной катушке в качестве параметра контроля механических свойств стали.

В работе Н. П. Садовниковой предложен метод выделения высших гармоник в спектре петли магнитного гистерезиса, полученной при воздействии внешнего переменного магнитного поля определенной частоты на объект контроля. Подобный подход имеет недостаток, связанный с влиянием на регистрируемые величины вихревых токов.

В рассматриваемых работах изучаются методы определения механических свойств сталей, однако, кроме механических свойств, в условиях эксплуатации на работоспособность стального изделия влияет и его сопротивляемость процессам коррозии. Коррозионные повреждения стали ослабляют объект, снижая требуемые от него характеристики. Для контроля коррозионных свойств сталей применяются стандартные методы, основанные на разрушении объекта исследования или лабораторных образцов. Применение магнитных параметров в качестве критерия оценки коррозионных свойств стали рассматривались лишь в ограниченном перечне работ под авторством В. Ф. Новикова и В. А. Рышкова.

Проведенный анализ специальных источников показывает, что применение гармонического анализа относительно реальной квазистатической петли магнитного гистерезиса, полученной для стали в различных структурно-фазовых состояниях, для определения её механических и коррозионных свойств не производилось.

**Целью** работы является разработка магнитного метода контроля механических и коррозионных свойств стали на основе анализа поведения параметров гармонических составляющих, полученных по петле магнитного гистерезиса при вариациях химического, фазового и структурного состава стали.

**Объектами исследования** являются термообработанные образцы, изготовленные из различных марок сталей: 15ХСНД, Ст3, 09Г2С, ЭИ961, 45Х, 10ХСНДА и др.

**Предметом исследования** является установление корреляционной связи физико-механических и коррозионных свойств сталей с параметрами гармонических составляющих, полученными по петле магнитного гистерезиса.

Для достижения цели работы необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать алгоритм обработки петли магнитного гистерезиса стали с возможностью извлечения отдельных параметров спектральных составляющих. Определить метрологические критерии и методические особенности предлагаемого алгоритма.

2. Установить технические и методические ограничения разрабатываемого магнитного метода, связанные с влиянием формы петли магнитного гистерезиса и основных магнитных характеристик на их гармонические составляющие.

3. Сформулировать требования, предъявляемые к количественной оценке параметров контроля механических и коррозионных свойств сталей по петле магнитного гистерезиса.

4. Определить влияние структуры стали на её магнитные параметры, характеристики гармонического спектра и параметры, используемые в разрабатываемом магнитном методе контроля.

5. Установить корреляционные связи физико-механических и коррозионных свойств стали с характеристиками гармонических составляющих петли магнитного гистерезиса и параметрами, используемыми в разрабатываемом методе контроля.

#### **Научная новизна работы**

Научная новизна полученных в работе результатов состоит в следующем:

1. Разработан новый метод контроля механических и коррозионных свойств сталей, основанный на измерении и гармоническом анализе петли магнитного гистерезиса.

2. Разработан способ разложения петли магнитного гистерезиса в гармонический спектр, включающий ее преобразование в псевдореальный сигнал, с применением методов численного интегрирования. Установлено, что такой подход дает возможность получать наименьшее искажение гармонических составляющих измеряемых магнитных параметров, вызванное индуцируемыми вихревыми токами и дискретностью получаемых данных.

3. На примере модельной петли магнитного гистерезиса выявлен характер влияния величины магнитных параметров (коэрцитивной силы, остаточной индукции, индукции насыщения) на гармонический спектр петли гистерезиса, комплексный параметр контроля и погрешность расчёта гармонических составляющих.

4. Выполнен поиск критериев контроля физико-механических свойств и скорости коррозии материала по спектральным характеристикам петли магнитного гистерезиса. С помощью метода разделения диагнозов в пространстве признаков (в диагностическом пространстве) и метода группового учета аргументов обнаружены комплексные параметры, основанные на величине амплитуды нескольких гармонических составляющих, обладающие наибольшей чувствительностью к изменению механических и коррозионных свойств стали. Показана возможность применения комплексного параметра для определения скорости коррозии стали с удовлетворительной точностью в различных по составу агрессивных средах.

5. Установлены ограничения предлагаемого метода контроля стали, связанные со способом спектральной обработки исходного массива данных и способом регистрации петли магнитного гистерезиса. Сформулированы основные требования, предъявляемые к разрабатываемому методу контроля.

6. Создано программное обеспечение, которое в совокупности с измерительной системой и изложенными в работе требованиями позволит реализовать предлагаемый метод магнитного контроля физико-механических и коррозионных свойств сталей.

#### **Теоретическая и практическая значимость результатов работы**

Результаты, полученные в диссертационной работе, направлены на разработку нового метода магнитного неразрушающего контроля физико-механических и коррозионных свойств сталей. Приведенные результаты исследований имеют значение для проведения организационно-технических мероприятий, выполняемых на объектах нефтегазовой, химической, металлургической промышленности в целях контроля состояния оборудования в пределах установленных норм.

Часть результатов использована на предприятии «Завод БКУ» – филиал ООО «Уралмаш НГО Холдинг» в Тюмени и филиале АО «Мостострой-11» фирмы «Мостоотряд-36» для создания метода неразрушающего магнитного контроля физико-механических свойств бурового оборудования и металлических рам.

#### **Методология и методы исследований**

В работе использовались экспериментальные и расчётные методы исследования магнитных, механических свойств, химического состава и структуры стали. Обработка и анализ полученных экспериментальных результатов осуществлялись в системе математических вычислений Mathcad, а также с помощью набора программ, разработанных автором диссертации.

**Достоверность** основных научных положений, выводов и приводимых результатов обеспечивается корректностью постановки задач, физической обоснованностью полученных экспериментальных данных и используемых моделей, применением современных и стандартизованных методов обработки результатов, а также

подтверждается непротиворечивостью и воспроизводимостью полученных экспериментальных результатов и расчетами других авторов.

#### **Положения, выносимые на защиту**

Способ преобразования и спектрального анализа петли магнитного гистерезиса, основанный на её временном представлении, дискретном преобразовании Фурье и методе численного интегрирования, позволяющий определять амплитуды гармонических составляющих, для массивов данных, содержащих минимум 128 строк с погрешностью, не превышающей 5 %.

Определяющее влияние магнитных свойств стали, структурно-фазового состава на амплитудные составляющие петли магнитного гистерезиса и установленные на их основе корреляционные зависимости амплитуда – коэрцитивная сила, амплитуда – остаточная индукция, амплитуда – индукция насыщения.

Метод определения и основные положения применения комплексного параметра для неразрушающего контроля физико-механических и коррозионных свойств сталей по гармоническому спектру петли гистерезиса. При этом обнаруженные корреляционные зависимости имеют в худшем случае коэффициент детерминации порядка 0,7, а величина ошибки определения свойств материала не превышает 30 %.

Требования, предъявляемые к измерительной системе, математическим методам обработки и исходному массиву анализируемых данных, а также интерпретация обнаруженных закономерностей и изменений параметров структуры материала.

#### **Личный вклад**

Результаты, представленные в диссертационной работе, получены лично автором. Постановка цели и задач исследования проводилась автором совместно с первым научным руководителем, выдающимся ученым, доктором физико-математических наук, профессором В. Ф. Новиковым (1937-2022). Автором проведены экспериментальные исследования, описанные в диссертации, обработаны полученные результаты. Анализ результатов и их интерпретация проводились совместно с научным руководителем и соавторами, указанными в приводимых публикациях. Полученные результаты исследований докладывались автором на научных мероприятиях различного уровня организации и значимости.

#### **Апробация результатов**

Основные результаты диссертации были доложены автором и обсуждены на следующих российских и международных конференциях в числе которых: VII Всероссийская конференция «Безопасность и мониторинг природных и техногенных систем» (г. Кемерово, 2020 г.); XVII International Forum-Contest of Students and Young Researchers «Topical Issues of Rational Use of Natural Resources» (г. Санкт-Петербург, 2021 г.); X Международная конференция школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» (г. Томск, 2021 г.); Девятая международная молодежная научная конференция «Физика. Технологии. Инновации», (ФТИ-2022) (г. Екатеринбург, 2022 г.); XI Международная конференция школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» (г. Томск, 2022 г.); V Всероссийская научно-практическая конференция «Инновации и долговечность объектов транспортной инфраструктуры (материалы, конструкции, технологии)» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.); XXXIV Уральская конференция с международным участием «Физические методы неразрушающего контроля» (Янусовские чтения) (г. Пермь, 2023 г.).

#### **Публикации**

Основное содержание работы отражено в 40 публикациях, в том числе 7 научных статьях в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, 1 статья в издании, индексируемом в РИНЦ, в 6 статьях входят в базу данных Web of Science, в 2 патентах РФ на изобретение, в 3 свидетельствах о государственной регистрации программы для ЭВМ и 21 публикации в других изданиях.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 218 наименований, четырех приложений; содержит 185 страниц текста, 77 рисунков и 12 таблиц.

**Тематика работы** соответствует паспорту специальности 2.2.8 - Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий:

п.1 «Научное обоснование новых и совершенствование существующих методов, аппаратных средств и технологий контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующее повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды»;

п.3 «Разработка, внедрение, испытания методов и приборов контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующих повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды»;

п.4 «Разработка методического, математического, программного, технического, приборного обеспечения для систем технического контроля и диагностирования материалов, изделий, веществ и природной среды, экологического мониторинга природных и техногенных объектов, способствующих увеличению эксплуатационного ресурса изделий и повышению экологической безопасности окружающей среды».

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, показана степень ее разработанности, сформулирована цель и определены основные задачи, описаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость проводимых исследований, перечислены основные положения, выносимые на защиту. Приведена апробация результатов исследования и описан личный вклад автора.

**В первой главе** представлен обзор специальных научных источников, содержащих описание и анализ современных методов исследования физико-механических и коррозионных свойств сталей. Рассмотрены магнитные методы контроля механических свойств сталей и использование спектрального метода для анализа петли магнитного гистерезиса, влияние структурного и фазового состава стали на её коррозионные свойства и способы их контроля.

На основе результатов критического анализа источников были поставлены изложенные выше цель и задачи исследований настоящей работы.

**Во второй главе** описан способ математической обработки петель магнитного гистерезиса стали. Для применения Фурье-анализа к петлям магнитного гистерезиса производится их трансформация в квазивременной сигнал. Петля магнитного гистерезиса после такой обработки представлена в виде функции:

$$B = f(H) = f(H(t)) \quad (1)$$

Полученная функция далее подвергается преобразованию Фурье. Ввиду наличия дискретности исходного массива данных преобразование Фурье было модифицировано добавлением метода численного интегрирования (2, 3).

$$a_i = \frac{1}{l} \sum_{j=0}^{m-1} \left\{ f[x_j] \cos\left(\frac{2\pi}{l} i(x[j] - x_n)\right) + f[x_{j+1}] \cos\left(\frac{2\pi}{l} i(x[j+1] - x_n)\right) \right\} (x[j+1] - x[j]), \quad (2)$$

$$b_i = \frac{1}{l} \sum_{j=0}^{m-1} \left\{ f[x_j] \sin\left(\frac{2\pi}{l} i(x[j] - x_n)\right) + f[x_{j+1}] \sin\left(\frac{2\pi}{l} i(x[j+1] - x_n)\right) \right\} (x[j+1] - x[j]), \quad (3)$$

где  $l$  – период функции;  $x_n$  – начальное значение аргумента;  $x_j$  – значение аргумента в анализируемой точке;  $m$  – число анализируемых точек;  $x[j+1] - x[j]$  – шаг дискретизации по аргументу.

Амплитуды гармоник определяются согласно формуле 4.

$$A_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2}, \quad (4)$$

где  $a_i, b_i$  – коэффициенты ряда Фурье при косинусах и синусах, соответственно.

Проанализирована связь гармонических составляющих петли магнитного гистерезиса с её формой на примере реальных данных и модельного эксперимента. Полученные результаты гармонического анализа позволяют оценить вклад отдельных гармоник, вносимый в форму петли магнитного гистерезиса.

Проанализированы погрешности, возникающие при ограничении количества гармонических составляющих, участвующих при восстановлении петли магнитного гистерезиса, на отдельных ее участках. В таблице 1 представлены полученные результаты.

Таблица 1 – Относительное отклонение восстановленных по гармоническим составляющим кривых от исходной зависимости на различных участках

Рассматриваемый участок	Модуль относительного отклонения $\Delta$ , %						
	1	1-3	1-5	1-7	1-9	1-11	1-13
1	81,53	67,41	54,59	43,81	34,77	27,54	20,89
2	55,19	25,41	6,97	5,59	3,67	3,10	1,66
3	0,68	4,38	0,84	0,21	0,13	0,07	0,05

Полученные результаты дают представление об ограниченном рассмотрении гармонических составляющих временного сигнала петли гистерезиса. При таком ограничении существует большая вероятность потери части информативных составляющих. Наиболее существенное влияние на форму петли оказывают гармоники с 1 по 13.

Использование модельной петли гистерезиса, полученной по аналитическим формулам, описанным Р. В. Лапшиным, позволило оценить степень влияния основных точек на петли гистерезиса, таких как  $H_c, B_r, B_s$  определяющих ее форму, на гармонический спектр. Стоит учесть, что при таком подходе величины  $H_c^*, B_r^*, B_s^*$  являются условными. Установлено, что изменения перечисленных величин оказывают неравномерное влияние на величину отдельных гармонических составляющих.

Зависимости гармонических составляющих от какого-либо переменного аргумента при неизменности остальных настолько разнообразны и сложны, что расшифровка их физической сущности затруднена. Ее можно уяснить только при анализе простых, идеализированных условий, например, предельно нелинейной кривой перемагничивания и т. п. Вид отдельных критериев может быть установлен из частных случаев, когда их роль определяющая, а влияние других критериев незначительно или отсутствует. Анализ взаимосвязи между этими критериями позволяет глубже понять физическую сущность рассматриваемых явлений, а также использовать методы физического подобия.

При анализе зависимости изменения гармонических составляющих от различных параметров ограничимся рассмотрением следующей зависимости:

$$B = \sum A_n \cdot \cos\left(n \cdot \frac{2\pi}{\Delta H} \cdot H + \varphi_n\right), \quad (5)$$

где  $\varphi_n$  – фаза рассматриваемой компоненты.

Из анализа взаимного влияния формы петли и гармонических составляющих следует, что размах развёрнутой петли магнитного гистерезиса определяется в большей мере первой гармонической составляющей, начальная фаза которой равна нулю. При рассмотрении величины магнитной проницаемости в поле, равном коэрцитивной силе, фаза сигнала должна равняться  $-90^\circ$ , тогда  $\sin(-90) = -1$ .

Тогда магнитная восприимчивость, определенная по первой гармонике равна

$$\chi \approx \frac{1}{\mu_0} \cdot \left| A_1 \cdot \frac{2\pi}{\Delta H} \right| - 1 \quad (6)$$

На рисунке 1 представлен пример сопоставления величин  $\chi(A)$  магнитной восприимчивости, рассчитанной по гармоническим составляющим петли гистерезиса, и  $\chi(BH)$ , полученной при её прямом анализе в точке, соответствующей коэрцитивной силе, для стали 34ХН3М. Высокий коэффициент корреляции 0,92 и линейный вид полученной зависимости с угловым коэффициентом, близким к единице, свидетельствуют о наличии прямой связи между рассматриваемыми величинами.

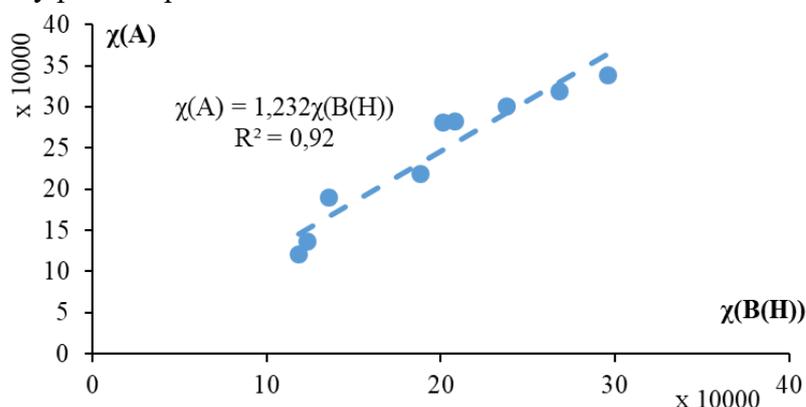


Рисунок 1 – Зависимость магнитной восприимчивости стали 34ХН3М с различной температурой отпуска, определенной по амплитуде первой гармоники от магнитной восприимчивости, определенной по исходной петле её магнитного гистерезиса

Погрешность измерения играет заметную роль в достоверности оценки получаемых результатов. Случайные флуктуации могут существенным образом исказить гармонический спектр. Во второй главе рассматривается случай, когда к модельной петле добавляются случайные помехи при помощи прямоугольной функции. Уровень помех лежал в пределах 1-10 % от максимальной величины условной магнитной индукции модельной петли гистерезиса. Для примера на рисунке 2 представлены относительные погрешности определения амплитудных составляющих гармоник, полученных по петле гистерезиса, при наличии случайных помех в исходном массиве данных в 5 % от максимальной величины условной магнитной индукции.

При анализе установлено, что минимальное количество точек в массиве исходных данных, при котором погрешность определения амплитудных составляющих не превышает 5 %, составляет 126.

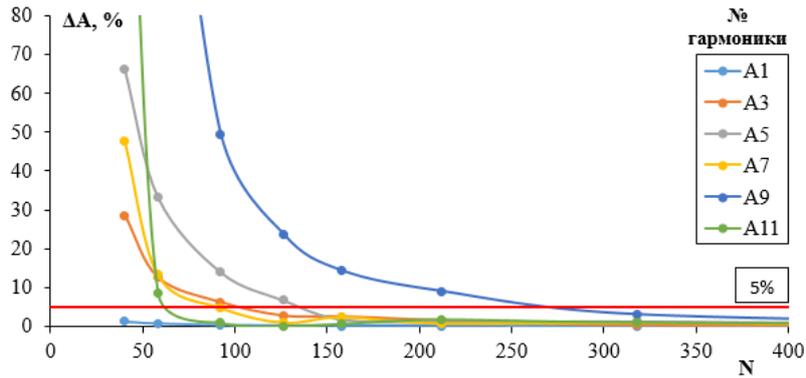


Рисунок 2 – Погрешность определения амплитудных составляющих гармоник модельной петли гистерезиса при различном содержании данных в исходном массиве

Определение величины погрешности измерения гармонических составляющих магнитного гистерезиса при использовании аппаратно-программной системы магнитной структуроскопии DIUS-1.15M производилось на стандартизированных калибровочных образцах с коэрцитивной силой 2,5; 20,4; 38,2 А/см по 10 измерениям.

Установлено, что с ростом коэрцитивной силы происходит уменьшение величины погрешности, что связано с уменьшением влияния свойств сердечника измерительного блока при фиксации магнитных величин.

На примере модели рассмотрено основное преимущество предлагаемого подхода по сравнению с методами регистрации и анализа ЭДС индукции, наводимой во вторичной катушке. Показано, что при регистрации ЭДС индукции на получаемые гармонические составляющие оказывает влияние частота изменения создаваемого магнитного поля. С увеличением частоты и номера гармоники происходит более сильное искажение величины амплитуды гармонических составляющих относительно искомых значений (рисунок 3).

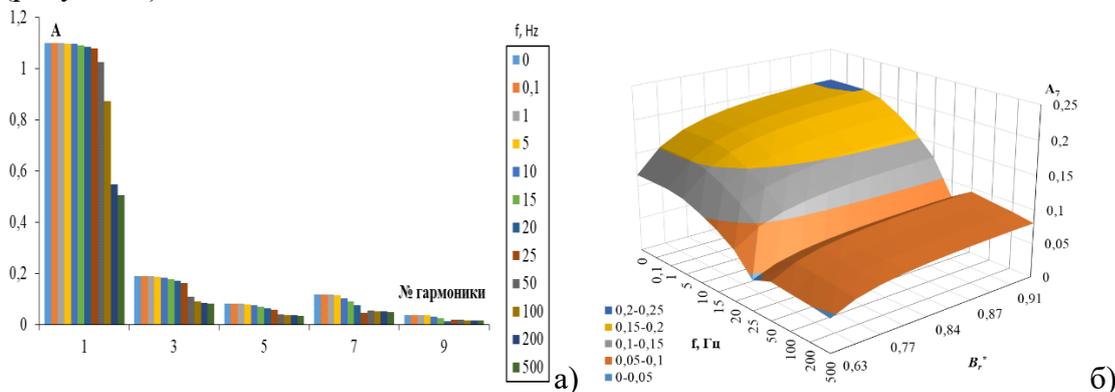


Рисунок 3 – а) Изменение амплитуд гармоник N, полученных по модельной петле гистерезиса с величиной  $B_r^*=0,46$  и  $H_c^*=0,1$  при вариации частоты вихревых токов; б) изменение величины амплитуды седьмой гармоники при вариации частоты вихревых токов и  $B_r^*$

**В третьей главе** рассмотрена возможность применения гармонических составляющих временного сигнала петли магнитного гистерезиса как критерия для оценки величины твердости материала и предела его прочности.

Исследуемые образцы подвергались термической обработке для создания различных вариаций структуры и физических свойств стали. Применение стандартной методики оценки механических свойств сталей, опирающейся на измерение величины коэрцитивной силы, для широкого набора марок стали не дает высокой достоверности,

о чем говорит коэффициент детерминации, равный  $R^2=0,43$ , полученный для рассматриваемого случая.

Применение амплитудных составляющих, полученных по петле магнитного гистерезиса, дает более высокий коэффициент корреляции, что показано на рисунке 4.

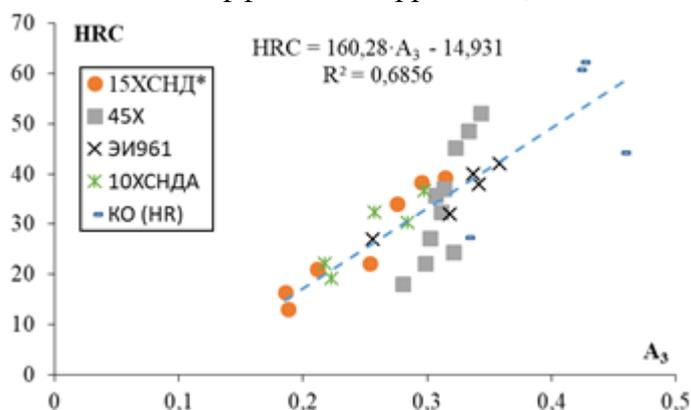


Рисунок 4 – Связь амплитуды третьей гармоники, полученной по частной петле магнитного гистерезиса, для набора сталей и их твердости HRC

Измерение отдельных гармонических составляющих магнитного гистерезиса стали для контроля её механических свойств ограничивает достоверность получаемых результатов. Однако использование многопараметрового подхода, основанного на измерении и анализе амплитуд нескольких гармоник, позволит расширить возможности разрабатываемого метода контроля.

Определение твердости стали по спектру Фурье-разложения ее петли магнитного гистерезиса становится задачей разделения диагнозов в пространстве признаков. Однако здесь может возникнуть ложное представление о существовании абсолютной корреляции между петлей магнитного гистерезиса (или спектром ее Фурье-разложения) и твердостью. Твердость и петля магнитного гистерезиса являются параметрами, определяемыми состоянием стали, но не определяют его. Оно задается составом и строением материала. Прямой опосредованной взаимосвязи между величиной твердости и гармоническими составляющими нет, но из-за влияния состояния материала на все физико-механические свойства, включая гармонические составляющие, величина которых обусловлена параметрами петли магнитного гистерезиса, возникает косвенная связь между этими величинами. В конечном итоге это означает, что заданному значению твердости материала будут соответствовать определенные пространственные координаты – набор амплитуд гармонических составляющих петли гистерезиса.

Положение в той или иной точке этого пространства будут отражать соответствующую твердость материала. Определение комплексного параметра и его функциональной зависимости во многом схоже с процессом определения новых осей в методе главных компонент.

$$P_1 = \sqrt{\frac{A_1^2}{A_3^2 + A_5^2}}. \quad (7)$$

Полученный комплексный параметр и твердость материала описываются функцией с коэффициентом детерминации 0,72, что отражено на рисунке 5. Данный коэффициент выше, чем при рассмотрении коэрцитивной силы и отдельных спектральных составляющих.

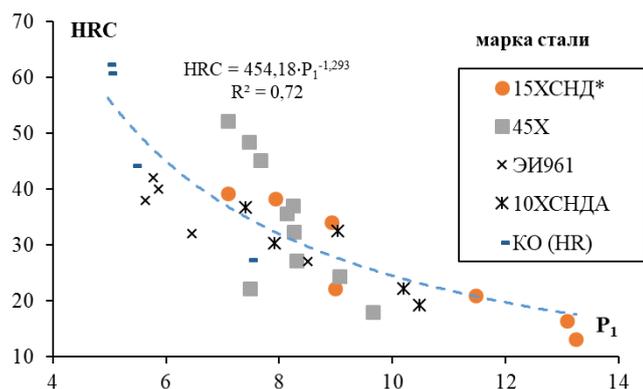


Рисунок 5 – Зависимость твердости стали от величины комплексного параметра  $P_1$ , полученного по частной петле магнитного гистерезиса

Применение описанного выше подхода для определения твердости материала показывает достаточно высокую достоверность, о чем свидетельствует рисунок 6.

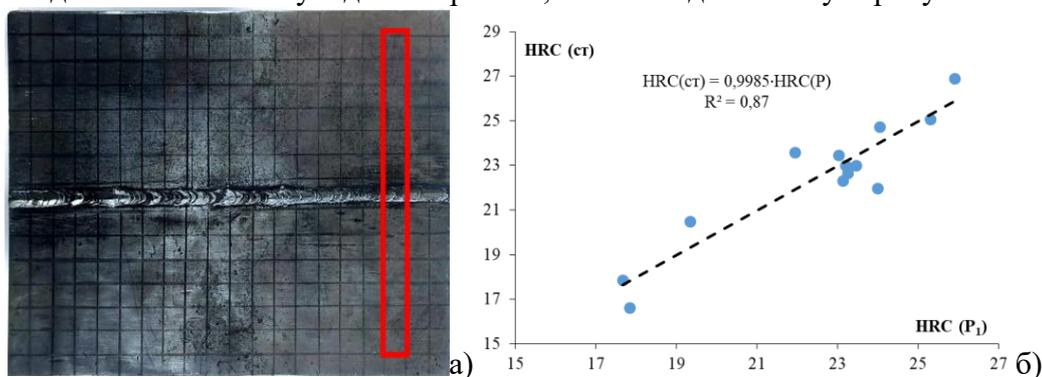


Рисунок 6 - а) Границы области измерения твердости по стыковому сварному соединению; б) Зависимость величины твердости материала сварного стыкового соединения, полученной при стандартных измерениях, и величины твердости, полученной при использовании разрабатываемого метода

Способ измерения петли магнитного гистерезиса стали существенным образом сказывается на её форме. На примере спектрального анализа петель магнитного гистерезиса, полученных для сталей 09Г2С и Ст3, произведена оценка изменения комплексного параметра  $P_1$  в зависимости от способа его получения.

Для снятия петель магнитного гистерезиса в открытой магнитной цепи использовалась лабораторная установка. Поле, намагничивающее стальной образец, создается индуктивной катушкой при подключении её к управляемому источнику питания АКТАКОМ АТН-7338. Управление источником осуществляется через компьютер путем введения функции изменения напряжения во времени. Напряжение, подаваемое на индуктивную катушку, имело форму треугольника, максимальное значение равнялось  $U_{\max} = 30$  В. Сигнал, пропорциональный величине создаваемого катушкой намагничивающего поля, фиксировался первым каналом виртуального осциллографа Velleman PCS500. Переключатель полярности в данной схеме предназначен для намагничивания образца в двух противоположных направлениях. При помощи микроверметра Ф192 регистрировалось изменение магнитного потока в измерительной катушке. Генерируемый в цепи микроверметра сигнал, пропорциональный магнитной индукции образца, поступал на второй канал прибора.

При обработке петель магнитного гистерезиса учтен размагничивающий фактор формы исследуемых образцов влияющий на регистрируемую величину  $B$  и  $H$ .

На рисунке 7 показано различие в величине комплексного параметра, найденного при анализе данных предельных петель магнитного гистерезиса, полученных на лабораторной установке в открытой магнитной цепи, и на магнитном структуроскопе АПС DIUS 1.15 в замкнутой магнитной цепи.

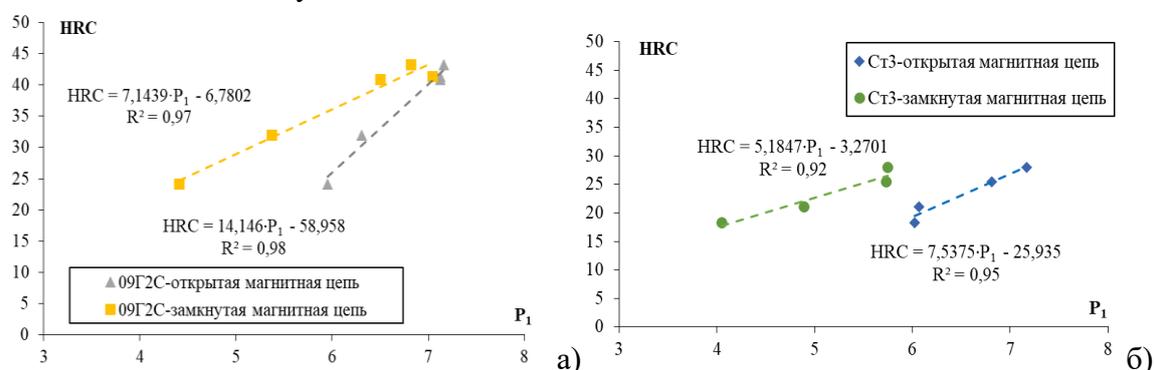


Рисунок 7 – Зависимость твердости стали 09Г2С (а) и Ст3 (б) от комплексного параметра  $P_1$ , полученного для различных способов измерения петли магнитного гистерезиса

Наличие косвенной связи обусловлено структурой стали и её химическим составом. На примере стали 09Г2С показано, что изменения, вызванные термической обработкой, сказываются на параметрах структуры, фазовом составе, магнитных и механических свойствах, а также на величине гармонических составляющих петли гистерезиса и комплексном параметре  $P_1$ . Изменение комплексного параметра происходит вследствие того, что он является многозависимой функцией коэрцитивной силы, остаточной намагниченности и др. Поэтому эффективность его использования для контроля механических свойств стали несколько выше, чем эффективность использования каждого из этих магнитных параметров в отдельности.

Проведенный дисперсионный и регрессионный анализ обнаруженных зависимостей показывает, что достоверность двух найденных моделей (корреляционных зависимостей, полученных в открытой и замкнутой магнитных цепях) различается на 2,65 % и характеризуется уровнем значимости существенно меньшим, чем пороговое значение 0,05. При этом возрастание величины твердости относительно увеличения величины комплексного параметра в рассматриваемых случаях отличается примерно в 2 раза. Стандартная ошибка в рассматриваемых моделях отличается на 1 %.

Осуществив проверку статистической значимости, основанной на сравнении дисперсий, обусловленной межгрупповым и внутригрупповым разбросом, автор установил, что нулевая гипотеза о наличии корреляционной зависимости между твердостью стали и комплексным параметром справедлива.

Также проанализирована чувствительность изменения амплитуд гармонических составляющих магнитного гистерезиса к изменению твердости стали как тангенс угла наклона его линейных участков. Установлено, что изменение чувствительности гармонических составляющих по отношению к изменению твердости стали повышается с увеличением номера гармоники.

Поскольку установлена связь между твердостью стали и пределом её прочности возможно использовать описанную выше методику для определения величины предела прочности материала. На рисунке 8 представлены зависимости предела прочности сталей 15ХСНД, Ст3, 09Г2С от величины комплексного параметра  $P_1$  и  $P_2$ . Найденные закономерности имеют коэффициент детерминации  $R^2$  более 0,9.

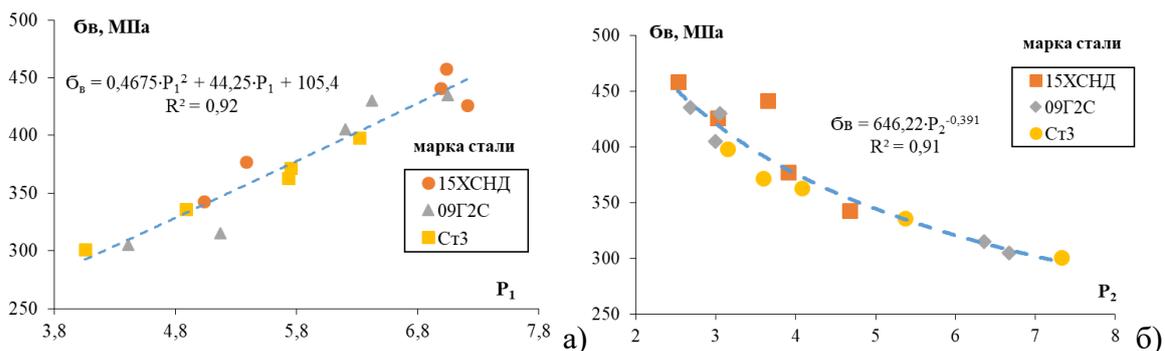


Рисунок 8 – Зависимость предела прочности сталей 15ХСНД, 09Г2С, Ст3 от величины комплексного параметра: а)  $P_1$ ; б)  $P_2$

**В четвертой главе** рассмотрены результаты определения скорости коррозии стали, находящейся в агрессивной среде, с использованием комплексного параметра  $P_k$ , полученного по петле магнитного гистерезиса. Проанализированы причины изменения скорости коррозии стали после термической обработки, которые были сопоставлены с соответствующим изменением её магнитных свойств. Показано влияние структуры стали, формируемой её термической обработкой, на скорость коррозии, а также предложен комплексный параметр, применяемый для определения скорости коррозии в определенной агрессивной среде. Скорость коррозии стали определялась стандартным способом по результатам трех взвешиваний.

Одним из параметров структуры, влияющим на протекание коррозионного процесса в стали, является ее дисперсность. Критерием дисперсности стали может выступать разнородность. В работе для морфологического анализа структуры и определения фактора разнородности были проанализированы снимки микроструктуры исследуемых сталей и произведены расчёты фактора их разнородности по формуле:

$$F_z = \frac{f_{max} \cdot Z_{max}}{\sum f_i \cdot Z_i}, \quad (8)$$

где  $f_i$  – доля зерна с определенным баллом, %;  $f_{max}$  – доля зерна, занимающего максимальную площадь на шлифе, %;  $Z_i$  – балл зерна;  $Z_{max}$  – балл зерна, занимающего максимальную площадь на шлифе.

На рисунке 9 представлена зависимость изменения величины фактора разнородности от скорости коррозии стали в морской воде.

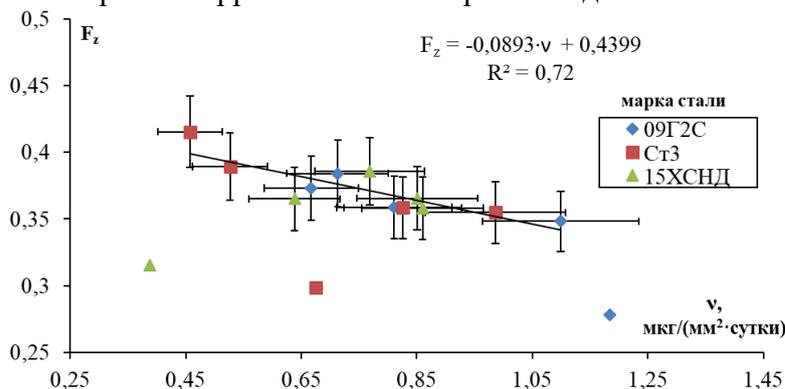


Рисунок 9 – Зависимость величины фактора разнородности от скорости коррозии сталей 09Г2С, Ст3, 15ХСНД в морской воде

Кроме дисперсности, на скорость коррозии стали оказывают влияние локальные включения посторонних фаз, что отражено на рисунке 10. Эксперименты показывают, что подобные включения могут менять свою форму при внешнем воздействии на сталь,

тем самым вызывая изменения скорости её локальной коррозии. Такие включения являются центрами образования атмосфер Коттрелла, в которых концентрация углерода выше, чем в соседних зонах, что приводит к возникновению дополнительной разности потенциалов между соседними областями стали, а, следовательно, и увеличения скорости коррозии в них. Эффект показан на рисунке 11.

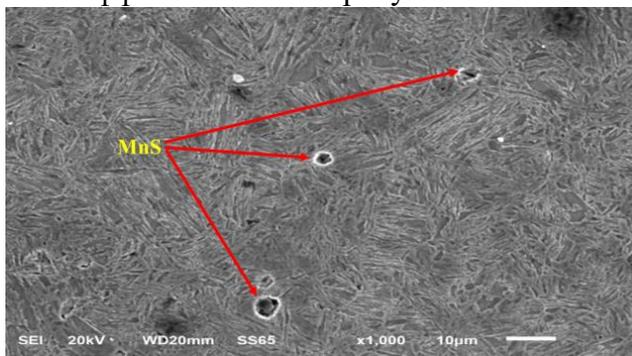


Рисунок 10 – Структура образцов из стали 09Г2С после закалки, полученная на растровом электронном микроскопе.

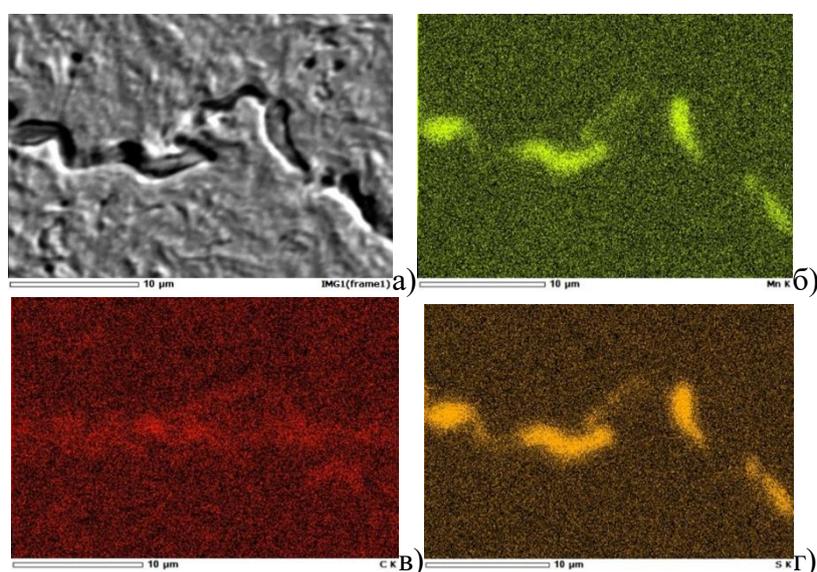


Рисунок 11 – Включения сульфида марганца в образце из стали 09Г2С, отпущенном при 500 °С:  
 а) изображение области сканирования, полученное в растровом электронном микроскопе;  
 б) распределение марганца по области сканирования; в) распределение углерода по области сканирования; г) распределение серы в области сканирования

Так как структура стали, химический и фазовый состав оказывают влияние на её физические свойства, включая магнитные характеристики, то для определения скорости коррозии материала возможно применить комплексные критерии, найденные по гармоническим составляющим временного сигнала петли гистерезиса.

$$P_k = \sqrt{A_1^2 + A_3^2 + A_5^2}, \quad (9)$$

На рисунке 12 представлены зависимости скорости коррозии сталей Ст3 и 09Г2С в различных агрессивных средах от величины комплексного параметра  $P_k$ .

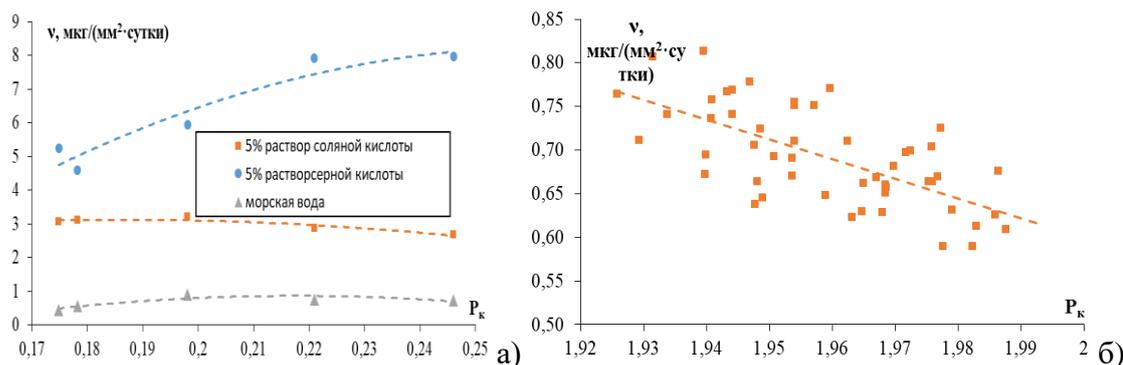


Рисунок 12 – Зависимость скорости коррозии стали в различных агрессивных средах от изменения её комплексного параметра  $P_k$ : а) листовая сталь Ст3 после термической обработки в растворе соляной, серной кислоты и морской воде; б) трубная сталь 09Г2С в состоянии поставки в растворе соляной кислоты

Качественное и количественное сравнение существующих приборных решений и разрабатываемого метода оценки скорости коррозии сталей представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение количественных параметров скорости коррозии разрабатываемого и существующих методов

№ п.п.	Метод контроля	Параметр сравнения							
		Достоверность измерений, %	Предварительная подготовка	Время одного измерения	Диапазон температур, С	Условия проведения	Наличие коррозионной среды	Использование дополнительного оборудования	Разрушение объекта
1	Весовой метод	до 87 %	да	от 12 ч.	н.у.	Л	да	да	да
2	Метод образцов-свидетелей коррозии	до 80 %	да	от 30 д.	30...+40	Л / П	да	да	да
4	Метод электрохимического потенциала	до 80 %	да	от 10 мин.	н.у.	Л	да	да	да
5	Ультразвуковые методы	до 93 %	нет	от 0,1 мин.	-5...+35	Л / П	да	да	да
7	Разрабатываемый метод	до 91 %	нет	0,5 мин	15...+40	Л / П	нет	нет	нет

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие основные результаты:

1. Создан алгоритм математической обработки петли магнитного гистерезиса сталей, основанный на извлечении его спектральных составляющих. Определены метрологические критерии и методические особенности предлагаемого решения с набором требований, предъявляемых к анализируемому массиву данных.

2. Определены технические и методические ограничения разрабатываемого метода; установлено, что минимальный массив анализируемых данных должен содержать 128 строк.

3. Проанализирована степень влияния формы петли гистерезиса стали, обусловленного её магнитными характеристиками, на гармонический спектр, и проведена ее оценка, направленная на разграничение влияния основных магнитных характеристик на гармонические составляющие.

4. Разработана методика контроля механических и коррозионных свойств стали на основе применения метода учета группового аргумента и гармонических составляющих, полученных при анализе петли магнитного гистерезиса. Проанализирована возникающая косвенная связь между рассматриваемыми параметрами на основе изменений, происходящих в структуре стали, её фазовом составе.

5. Установлена зависимость твёрдости и прочности стали от комплексного параметра, получаемого в результате гармонического анализа петли магнитного гистерезиса. Обнаружена аналитическая связь между скоростью коррозии стали в различных агрессивных средах и комплексным параметром, рассчитываемым по результатам измерения амплитуд гармонических составляющих временного сигнала петли гистерезиса. Проведен регрессионный и дисперсионный анализ, показывающий наличие закономерной связи между гармоническими составляющими и механическими и коррозионными свойствами стали. Показанные регрессионные зависимости имеют коэффициент детерминации выше, чем у других магнитных параметров.

6. Разработан новый магнитный метод контроля механических и коррозионных свойств сталей, основанный на корреляционной зависимости комплексного параметра, определяемого в результате спектрального анализа петли магнитного гистерезиса, от твёрдости, прочности, размеров зерна стали. К преимуществам разработанного метода можно отнести возможность его применения на локальном участке эксплуатируемой конструкции.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в научных изданиях, учитываемых ВАК РФ**

1. Новиков, В. Ф. Использование квазистатических петель магнитного гистерезиса для контроля структуры стали / В. Ф. Новиков, Д. Ф. Нерадовский, Р. А. Соколов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2016. – Т. 18, № 2. – С. 38-49. – DOI 10.15593/2224-9877/2016.2.03.

2. Определение коррозионной стойкости низколегированных сталей магнитным методом / В. Ф. Новиков, К. Р. Муратов, Р. А. Соколов, В. П. Устинов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2020. – Т. 86, № 5. – С. 31-36. – DOI 10.26896/1028-6861-2020-86-5-31-36.

3. Определение взаимосвязи фактора разнотерности и скорости коррозии конструкционной стали / Р. А. Соколов, В. Ф. Новиков, К. Р. Муратов, А. Н. Венедиктов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 106-125. – DOI 10.17212/1994-6309-2020-22.3-106-125.

4. Оценка влияния дисперсности структуры стали на магнитные и механические свойства / Р. А. Соколов, В. Ф. Новиков, К. Р. Муратов, А. Н. Венедиктов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 93-110. – DOI 10.17212/1994-6309-2021-23.4-93-110.

5. Влияние термической обработки на образование соединения MNS в низкоуглеродистой конструкционной стали 09Г2С / Р. А. Соколов, В. Ф. Новиков, И. М. Ковенский [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 113-126. – DOI 10.17212/1994-6309-2022-24.4-113-126.

6. Соколов, Р. А. Исследование коррозионных свойств конструкционных сталей с использованием магнитных характеристик / Р. А. Соколов, В. Ф. Новиков, К. Р. Муратов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2022. – Т. 88, № 12. – С. 44-50. – DOI 10.26896/1028-6861-2022-88-12-44-50.

7. Соколов, Р. А. Применение параметров спектральных характеристик кривой перемагничивания для определения твердости ферромагнитного материала / Р. А. Соколов, К. Р. Муратов, В. Ф. Новиков // Дефектоскопия. – 2023. – № 6. – С. 70-72. – DOI 10.31857/S0130308223060064.

#### **Публикации в журналах, входящих в базы цитирования Web of Science и Scopus**

8. A technique for predicting steel corrosion resistance / V. F. Novikov, R. A. Sokolov, D. F. Neradovskiy, K. R. Muratov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 6th International Conference: Modern Technologies for Non-Destructive Testing, Tomsk, 09–14 октября 2017 года. Vol. 289. – Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018. – P. 012013. – DOI 10.1088/1757-899X/289/1/012013.

9. Effect of Thermal Influence on Mechanical and Relaxation Magnetic Characteristics of St3 steel / R. Sokolov, V. Novikov, K. Sergei, A. Venedictov // Materials Today: Proceedings, Sevastopol, 10–14 сентября 2018 года. Vol. 11. – Sevastopol: Elsevier Ltd, 2019. – P. 169-174. – DOI 10.1016/j.matpr.2018.12.126.

10. Influence of surface treatment of construction steels on determination of internal stresses and grain sizes using X-ray diffractometry method / R. Sokolov, V. Novikov, K. Muratov, A. Venedictov // Materials Today: Proceedings : International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2019, Sevastopol, 09–13 сентября 2019 года. Vol. 19. – Sevastopol: Elsevier Ltd, 2019. – P. 2584-2585. – DOI 10.1016/j.matpr.2019.09.015.

11. Application of magnetic hysteresis loop for analysis of corrosion properties of steel / R. Sokolov, V. Novikov, K. Muratov // AIP Conference Proceedings : 7, Ekaterinburg, 18–22 мая 2020 года. – Ekaterinburg, 2020. – P. 060017. – DOI 10.1063/5.0032347.

12. Determination of influence of grain size factor on the corrosion speed of structural steel / V. F. Novikov, R. A. Sokolov, K. R. Muratov, A. N. Venediktov // Materials Today: Proceedings, Sevastopol, 07–11 сентября 2020 года. – Sevastopol, 2021. – P. 1749-1751. – DOI 10.1016/j.matpr.2020.08.250.

13. Dispersion of the Steel Structure and its Effect on Magnetic and Mechanical Properties of Steel / R. A. Sokolov, V. F. Novikov, K. R. Muratov // . – 2022. – Vol. 910 KEM. – P. 908-913. – DOI 10.4028/p-5p8b9u.

#### **Публикации в других изданиях**

14. Нерадовский, Д. Ф. Гармонический анализ квазистатических петель магнитного гистерезиса для стали 34ХН3М / Д. Ф. Нерадовский, Р. А. Соколов // Новые технологии - нефтегазовому региону : Материалы Всероссийской с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Тюмень, 18–22 мая 2015 года. Том III. – Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2015. – С. 229-232.

15. Муратов, К. Р. Расширение возможности применения квазистатических петель магнитного гистерезиса / К. Р. Муратов, Р. А. Соколов // Нефть и газ Западной Сибири : Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения Косухина Анатолия Николаевича, Тюмень, 15–16 октября 2015 года. Том III. – Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2015. – С. 77-81.

16. Нерадовский, Д. Ф. Расширение возможности использования квазистатических петель магнитного гистерезиса в магнитной структуроскопии / Д. Ф. Нерадовский, Р. А. Соколов // Нефтегазовый терминал : сборник научных статей Международной научно-технической конференции, Тюмень, 17–20 ноября 2015 года /

Под общей редакцией С.Ю. Подорожникова. Том Выпуск 8. – Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2015. – С. 139-142.

17. Соколов, Р. А. Контроль коррозионной стойкости и ресурса стальных изделий с помощью гармонического анализа квазистатических петель магнитного гистерезиса / Р. А. Соколов, Д. Ф. Нерадовский // Севергеоэкотех-2016 : Материалы XVII Международной молодежной научной конференции. В 6-ти частях, Ухта, 23–25 марта 2016 года. Том Часть II. – Ухта: Ухтинский государственный технический университет, 2016. – С. 205-209.

18. Соколов, Р. А. Контроль коррозионной стойкости и ресурса стальных изделий с помощью гармонического анализа квазистатических петель магнитного гистерезиса / Р. А. Соколов // Проблемы геологии и освоения недр : Труды XX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета: в 2 томах, Томск, 04–08 апреля 2016 года / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Институт природных ресурсов (ИПР); Общество инженеров-нефтяников, международная некоммерческая организация, Студенческий чептер; Под редакцией А. Ю. Дмитриева. Том 2. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2016. – С. 957-959.

19. Соколов, Р. А. Контроль качества термообработки стальных изделий с помощью гармонического анализа квазистатических петель магнитного гистерезиса / Р. А. Соколов // Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии : материалы международной научно-практической конференции молодых ученых, приуроченной к 60-летию высшего нефтегазового образования в Республике Татарстан, Альметьевск, 26–29 сентября 2016 года / Альметьевский государственный нефтяной институт. Том 8. №1. – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2016. – С. 157-158.

20. Соколов, Р. А. Контроль качества термообработки стальных изделий с помощью гармонического анализа квазистатических петель магнитного гистерезиса / Р. А. Соколов, Д. Ф. Нерадовский // Международная научно-практическая конференция молодых исследователей им. Д.И. Менделеева : материалы конференции, Тюмень, 26–30 октября 2016 года / Тюменский индустриальный университет, Институт промышленных технологий и инжиниринга. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2016. – С. 268-270.

21. Новиков, В. Ф. Магнитный контроль свойств стали 18ХНВА / В. Ф. Новиков, Р. А. Соколов // Транспорт и машиностроение Западной Сибири. – 2017. – № 1. – С. 58-61.

22. Сафаргалиев, Р. Ф. Разработка магнитного метода обнаружения и контроля эрозии трубопроводов нефтегазовой отрасли / Р. Ф. Сафаргалиев, Р. А. Соколов, К. В. Тихонов // Новые технологии - нефтегазовому региону : Материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Тюмень, 24–28 апреля 2017 года. Том III. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2017. – С. 263-266.

23. Соколов, Р. А. Уменьшение погрешности коэрцитиметрии при использовании магнитного структуроскопа АПС dius-1.15M / Р. А. Соколов // Материалы Международной научно-практической конференции молодых исследователей им. Д. И. Менделеева, Тюмень, 24–27 октября 2017 года. Том 1. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2017. – С. 241-243.

24. Соколов, Р. А. Магнитный контроль твердости стали / Р. А. Соколов, А. Н. Венедиктов // *Материалы Международной научно-практической конференции молодых исследователей им. Д. И. Менделеева, Тюмень, 24–27 октября 2017 года. Том 1.* – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2017. – С. 239-241.
25. Кулак, С. М. Обнаружения неоднородностей механических свойств стального проката / С. М. Кулак, В. Ф. Новиков, Р. А. Соколов // *Нефть и газ Западной Сибири : материалы Международной научно-технической конференции, Тюмень, 02–03 ноября 2017 года. Том 2.* – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2017. – С. 63-66.
26. Соколов, Р. А. Влияние температуры отпуска стали Ст 3 на размер зерен и внутренние напряжения / Р. А. Соколов, А. Н. Венедиктов, Д. Ф. Нерадовский // *Новые технологии - нефтегазовому региону : материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Тюмень, 17–18 мая 2018 года / Ответственный редактор П. В. Евтин. Том III.* – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2018. – С. 113-116.
27. Соколов, Р. А. Исследование анизотропии коэрцитивной силы стальных пластинчатых образцов круглой и прямоугольной формы / Р. А. Соколов, С. М. Кулак // *Новые технологии - нефтегазовому региону : материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Тюмень, 17–18 мая 2018 года / Ответственный редактор П. В. Евтин. Том III.* – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2018. – С. 196-198.
28. Соколов, Р. А. Контроль предела прочности конструкционной углеродистой стали Ст 3 с различной температурой отпуска по релаксационной коэрцитивной силе / Р. А. Соколов, К. В. Тихонов, В. В. Проботюк // *Новые технологии - нефтегазовому региону : материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Тюмень, 17–18 мая 2018 года / Ответственный редактор П. В. Евтин. Том III.* – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2018. – С. 199-200.
29. Соколов, Р. А. Магнитный метод контроля предела прочности конструкционной стали применяемой при изготовлении вертикальных резервуаров / Р. А. Соколов, В. Ф. Новиков, К. Р. Муратов // *Нефтегазовый терминал : Сборник научных трудов международной научно-технической конференции имени профессора Н.А. Малыгина, Тюмень, 15 марта 2020 года / Под общей редакцией М.А. Александрова. Том Выпуск 18.* – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2020. – С. 236-238.
30. Соколов, Р. А. Контроль механических свойств стали по параметрам предельной кривой перемагничивания / Р. А. Соколов // *Актуальные проблемы недропользования : Тезисы докладов XIX Всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов, Санкт-Петербург, 12–16 апреля 2021 года. Том 5.* – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – С. 156-157.
31. Соколов, Р. А. Магнитный метод контроля предела прочности конструкционной стали применяемой при изготовлении вертикальных резервуаров / Р. А. Соколов, В. Ф. Новиков, К. Р. Муратов // *Нефтегазовый терминал : материалы Международной научно-технической конференции «Транспорт и хранение углеводородного сырья», Тюмень, 28–29 мая 2020 года / Под общей редакцией С. Ю. Подорожникова. Том Выпуск 19.* – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2021. – С. 382-384.
32. Sokolov, R. A. Control of the mechanical properties of steel according to the parameters of the limiting magnetization curve / R. A. Sokolov // *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources : XVII International Forum-Contest of Students and Young*

Researchers. Scientific conference abstracts, St Petersburg, 31 мая – 06 2021 года. Vol. 2. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – Р. 136-137.

33. Соколов, Р. А. Чувствительность к параметрам предельной кривой перемагничивания к изменению механических свойств стали / Р. А. Соколов, К. Р. Муратов // Ресурсосберегающие технологии в контроле, управлении качеством и безопасности : Сборник научных трудов XI Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых, Томск, 08–10 ноября 2022 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2023. – С. 232-235.

34. Соколов, Р. А. Использование спектрального анализа магнитных параметров для определения структурных изменений в стали при термическом воздействии / Р. А. Соколов, К. Р. Муратов // Материалы Международной научно-практической конференции им. Д. И. Менделеева : сборник статей Международной научно-практической конференции им. Д. И. Менделеева, Тюмень, 24–26 ноября 2022 года. Том 2. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2023. – С. 306-308.

35. Соколов, Р. А. Применение параметров спектральных характеристик кривой перемагничивания для определения твердости ферромагнитного материала / Р. А. Соколов, К. Р. Муратов, В. Ф. Новиков // Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения) : Тезисы докладов XXXIV Уральской конференции с международным участием, Пермь, 20–21 апреля 2023 года. – Екатеринбург: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, 2023. – С. 76-77.

#### **Патенты и свидетельства на РИД**

36. Патент № 2777695 С1 Российская Федерация, МПК G01N 17/00. Способ оценки стойкости сталей и сплавов к коррозии : № 2021132922 : заявл. 12.11.2021 : опубл. 08.08.2022 / Р. А. Соколов, В. Ф. Новиков, К. Р. Муратов.

37. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022612165 Российская Федерация. "COR.S.I.M" (Программа для анализа магнитных данных и определения скорости коррозии) : № 2022610934 : заявл. 25.01.2022 : опубл. 08.02.2022 / Р. А. Соколов, В. В. Антипин.

38. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022662386 Российская Федерация. Hysteresis : № 2022660697 : заявл. 08.06.2022 : опубл. 01.07.2022 / Р. А. Соколов.

39. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022667731 Российская Федерация. Программа для определения гармонических составляющих дискретного сигнала "Спектр" : № 2022667054 : заявл. 16.09.2022 : опубл. 23.09.2022 / К. Р. Муратов, Р. А. Соколов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет».

40. Патент № 2805248 С1 Российская Федерация, МПК G01N 17/00. Устройство для измерения магнитных характеристик ферромагнетика: № 2022131599 : заявл. 05.12.2022: опубл. 12.10.2023 / В. Ф. Новиков, С. М. Кулак, Р. А. Соколов, К.Р. Муратов.